



Fernanda Dutra Alves

**Avaliação dos efeitos da amplitude de ondulação
(*ripple*) na calibração de padrões de alta tensão
em corrente contínua**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Metrologia 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,
novembro de 2020



Fernanda Dutra Alves

**Avaliação dos efeitos da amplitude de ondulação
(*ripple*) na calibração de padrões de alta tensão em
corrente contínua**

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) do Centro
Técnico Científico da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia - PUC-Rio

Prof. Régis Pinheiro Landim,

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO

Marcelo Guimarães Rodrigues

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

Rio de Janeiro, 26 de novembro de 2020

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial, do trabalho é proibida sem autorização, da universidade, da autora e do orientador.

Fernanda Dutra Alves

Formada em Engenharia Elétrica pelo UNIFOA, Centro universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, Brasil em 2017.

Ficha Catalográfica

Alves, Fernanda Dutra

Avaliação dos efeitos da amplitude de ondulação (*ripple*) na calibração de padrões de alta tensão em corrente contínua / Fernanda Dutra Alves ; orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa. – 2020.
98 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2020.

Inclui bibliografia

1. Metrologia - Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação - Teses. 3. Alta tensão em corrente contínua. 4. Amplitude de Ripple. 5. Fator de Ripple. 6. Padrões. 7. Processamento de sinal. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. III. Título.

CDD: 389.1

A Deus, responsável por ter chegado até aqui. Ao meu marido Diego Durade Nunes, aos meus pais, Dorvalino Alves Filho e Luciana Vieira Dutra Mendes Lopes, aos seus respectivos esposa e esposo, avós e tios, por todo o incentivo durante a realização do mestrado.

Agradecimentos

À PUC-Rio e ao Cepel, pelos auxílios concedidos, sem os quais este mestrado não poderia ter sido realizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

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

Ao pesquisador Luiz Carlos de Azevedo por me motivar e incentivar na realização do mestrado, por todo apoio durante toda a fase de estudos.

Aos meus companheiros de trabalho Marcus Vinícius Barros Lopes, Carlos Magno Rodrigues Vasques e a Lilian Santos Ferreira pelas correções, orientação e apoio ao longo da pesquisa. E a todos os colaboradores de outros laboratórios que também contribuíram, transmitindo seu conhecimento.

Aos companheiros de trabalho, Valdir Remilson, Osmar Fontes e Marcio Thelio, atualmente aposentados, também contribuintes com conhecimento para realização do mesmo.

A Marcio Ferreira Costa e Silva pela paciência e apoio incondicional na realização do algoritmo que foi essencial para a conclusão deste trabalho.

Ao diretor de Laboratórios e Pesquisa Experimental (DL) Orsino Borges de Oliveira Filho por todo apoio institucional e pelo incentivo à pesquisa, correções e ensinamentos proporcionando o aumento do nosso conhecimento.

Aos ex-gerentes de Departamento de Laboratório de Adrianópolis (DLA), Alexandre Neves, Alberto Junqueira e o atual Wagner Duboc por todo apoio institucional e pelo incentivo à pesquisa.

Aos professores, funcionários e alunos do Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio.

Ao meu marido e maior incentivador durante esses anos, a distância não impediu que estivesse presente sempre que necessário.

Aos meus pais por sempre sonharem os meus sonhos junto comigo e ajudarem para a realização deles.

A toda minha família pelo suporte e compreensão por minha ausência ao longo desses anos.

Resumo

Alves, Fernanda Dutra; Barbosa, Carlos Roberto Hall. **Avaliação dos efeitos da amplitude de ondulação (*ripple*) na calibração de padrões de alta tensão em corrente contínua.** Rio de Janeiro, 2020. 98p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Existe uma perspectiva crescente da utilização de alta tensão em corrente contínua (ATCC). Assim, com base em informações da literatura sobre ensaios elétricos em equipamentos para ATCC e em exigências quanto à confiabilidade de procedimentos metrológicos, nesta dissertação, propõe-se o monitoramento e análise de um parâmetro (*ripple*) de forma que se possa garantir a rastreabilidade de sistemas de medição de referência (SMR). Os SMRs permitem apenas uma análise quantitativa da tensão de calibração, sendo preciso avaliar e garantir que a incerteza não seja influenciada por *ripples* de até 3 %, mas torna-se necessário também fazer uma avaliação qualitativa. No caso de ensaios em ATCC, o uso de diferentes fontes e retificadores provoca *ripple* em diferentes níveis, influenciando na qualidade da tensão fornecida e possivelmente em outros parâmetros relevantes descritos na norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013. Nesse contexto, o objetivo desta dissertação foi o aperfeiçoamento e validação, com o rascunho da norma IEC 61083-4, de um algoritmo de medição previamente desenvolvido em LabVIEW que se comunique com um multímetro de 8½ dígitos e estime todos os parâmetros normalizados. Estabeleceu-se, ainda, os procedimentos necessários para calibração em ATCC e a análise da influência do *ripple* a partir dos parâmetros definidos pela norma. Para validar a metodologia proposta nesta dissertação foram feitos ensaios com diferentes arranjos, cuja finalidade foi comparar, estatisticamente, as incertezas de medição da calibração com diferentes níveis de *ripple* no SMR. Finalmente, os resultados obtidos indicam que o *ripple* não influencia na calibração.

Palavras-chave

Alta Tensão em Corrente Contínua; Amplitude de *Ripple*; Fator de *Ripple*; Padrões; Processamento de sinal.

Abstract

Alves, Fernanda Dutra; Barbosa, Carlos Roberto Hall (Advisor). **Evaluation of the effects of ripple amplitude in the calibration of high voltage standards in direct current.** Rio de Janeiro, 2020. 98 p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

There is a growing prospect of using high voltage in direct current (HVDC). Thus, based on information from the literature on dielectric tests in equipment for HVDC and requirements regarding the reliability of metrological procedures, this dissertation aims at monitoring and analyzing a specific parameter (ripple) in a way that can guarantee the traceability of reference systems. The reference systems allow only a quantitative analysis of the calibration voltage, being necessary to evaluate and ensure that the measurement uncertainty is not influenced by ripples of up to 3 %, but it is also necessary to make a qualitative assessment. In the case of HVDC tests, the use of different power supplies and rectifiers causes ripple at different levels, influencing the quality of the supplied voltage and possibly other relevant parameters for the ABNT NBR IEC 60060-1:2013 standard. In this context, the objective of this dissertation was the improvement and validation, with the draft of the IEC 61083-4 standard, of a signal acquisition and processing algorithm developed in LabVIEW that communicates with an 8½ digit multimeter and estimates all the normalized parameters. It is also intended to establish the procedures introduced for HVDC calibration and an analysis of the ripple influence from the parameters defined by the standard. To validate the methodology proposed in this dissertation, tests were made with different arrangements, with universal and purely resistive dividers, and different ripple levels, in the laboratory, statistically comparing the calibration measurement uncertainties with different ripple levels in the traceability of reference systems. Finally, the results indicate that the ripple does not influence the calibration.

Keywords

High Voltage in Direct Current; Ripple amplitude; Ripple factor; Signal processing; Standards.

Sumário

1. Introdução.....	19
1.1. Contextualização	20
1.2. Motivação	22
1.3. Objetivos: geral e específicos.....	23
1.4. Estrutura da dissertação.....	24
2. Ensaio com alta tensão em corrente contínua (ATCC)	26
2.1. Fonte de Tensão em Corrente Contínua de até 240 kV	28
2.2. Sistema de Medição em ATCC	29
2.2.1. Dispositivo de conversão	31
2.2.2. Sistema de Transmissão.....	34
2.2.3. Instrumentos Digitais de Medição para ATCC	35
2.3. Parâmetros normalizados para calibrações em ATCC	36
2.3.1. Instalações e condições ambientais.....	40
2.3.2. Fontes de incerteza de medição para calibração de um sistema para ATCC	41
3. Retificação para Geração de Alta Tensão em Corrente Contínua.....	47
3.1. Retificador de meia onda.....	47
3.2. Retificação de onda completa	48
3.3. Retificadores em Cascata (COCKROFT-WALTON).....	49
3.4. Minuta da norma IEC 61083-4.....	52
4. Instrumento Virtual para Avaliação dos Parâmetros de Ensaio ATCC	54
4.1. Instrumentação Virtual.....	55
4.2. Dispositivos de Aquisição de Dados.....	55
4.3. Algoritmo de controle em LabVIEW.....	56
4.4. Ensaio experimental	58
4.4.1. Ensaio com TDG	60
4.4.2. Verificação em baixa tensão (BT)	61
4.4.3. Ensaio em Alta tensão em Corrente Contínua	63
4.5. Incerteza de medição	64
5. Influência da ondulação (<i>ripple</i>) na calibração em ATCC	66
5.1. Planilha de aquisição.....	66

5.2. Ensaio de linearidade	67
5.3. Calibração	73
5.3.1. Ensaio com a fonte CC.....	76
5.4. Incerteza do Fator de Escala.....	77
5.4.1. Ensaio com fonte CA + retificador	77
5.4.2. Ensaio com a fonte CC.....	80
5.4.3. Resumo da Influência do <i>Ripple</i>	81
6. Considerações finais e motivação para trabalhos futuros.....	84
Referências bibliográficas	89

Lista de figuras

Figura 1 - Custo do investimento da transmissão em CA e CC, adaptado de [14].	27
Figura 2- Fonte de Tensão Hipotronics série 8000 com 60 kV/módulo, adaptado de [15].	29
Figura 3 - Esquema de construção de divisores universal (esquerda) e resistivo (direita).	32
Figura 4 – Divisor resistivo intitulado SMR7.	33
Figura 5 - Divisor resistivo intitulado SMR21.	33
Figura 6 - Divisor universal intitulado SMR2.	34
Figura 7 - Divisor universal intitulado SMR3.	34
Figura 8 – Multímetro Agilent 3458A Digital de 8½ dígitos [18].	36
Figura 9- Ondulação (<i>ripple</i>) pós-retificação, adaptado de [19].	37
Figura 10 - (a) Circuito completo (com as perdas) do retificador em meia onda, contendo todos os elementos; (b) Retificador de meia onda simplificado; (c) Forma de onda senoidal retificada, adaptado de [8].	48
Figura 11 - Forma de onda na saída do retificador de onda completa, adaptado de [19].	49
Figura 12 – Circuito do retificador em cascata Cockcroft-Walton.	50
Figura 13 – Retificadores em cascata (Cockcroft-Walton) do Cepel.	51
Figura 14 - Software desenvolvido para gerar as formas de onda padrão da norma IEC 61083-4.	53
Figura 15 – Interface do Instrumento Virtual (a) Configuração remota dos multímetros, (b) Aquisição de dados.	57
Figura 16 – Voltímetro de Crista DMI 551.	59
Figura 17 - Instrumentos utilizados na sala de controle para calibração ATCC.	60
Figura 18 - Última versão apresentada pelos desenvolvedores da norma IEC 61083-4 para corrente contínua com ondulação.	60
Figura 19 – Última versão disponível em arquivo .txt pela minuta da norma.	61
Figura 20 - Resultado da incerteza expandida das medições em baixa tensão em diferentes níveis de tensão.	63
Figura 21 (cont.) – Planilha adaptada para os ensaios em alta tensão em corrente contínua (a) Aba “Linearidade (Polaridade positiva)”; (b) Aba “Incerteza da amplitude” fontes que compõem a incerteza do fator de escala; (c) Fontes para cálculo de incerteza dos parâmetros em estudo na dissertação.	67
Figura 22 - Incerteza expandida relacionada com a não linearidade do Fator de Escala [7].	68
Figura 23 - Arranjo de calibração para ATCC com dois divisores resistivos.	69
Figura 24 - Linearidade com <i>ripple</i> em 1 %, usando divisor (SMR) resistivo e objeto sob calibração resistivo.	70
Figura 25 - Linearidade com <i>ripple</i> em 3 %, usando divisor (SMR) resistivo e objeto sob calibração resistivo.	70

Figura 26 - Linearidade com <i>ripple</i> em 6 %, usando divisor (SMR) resistivo e objeto sob calibração resistivo.	70
Figura 27 - Linearidade com <i>ripple</i> em 1 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração resistivo.	71
Figura 28 - Linearidade com <i>ripple</i> em 3 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração resistivo.	71
Figura 29 - Linearidade com <i>ripple</i> em 6 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração resistivo.	72
Figura 30 - Linearidade com <i>ripple</i> em 1 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração universal.	72
Figura 31 - Linearidade com <i>ripple</i> em 3 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração universal.	73
Figura 32 - Linearidade com <i>ripple</i> em 6 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração universal.	73
Figura 33 – Incerteza expandida do arranjo com divisor de referência universal e divisor sob calibração resistivo.	82
Figura 34 - Incerteza combinada do arranjo com divisor de referência resistivo e divisor sob calibração resistivo.	82
Figura 35 - Incerteza combinada do arranjo com divisor de referência universal e divisor sob calibração universal.	83
Figura 36 - Medição de corrente com o software e comparação das medições com o osciloscópio.	85
Figura 37 - SMR resistivo com SMA resistivo.	86
Figura 38 - SMR universal com SMA universal.	87
Figura 39 - SMR universal com SMA resistivo.	87
Figura 40 - Incerteza Expandida em diferentes arranjos e níveis de <i>ripple</i> variados.	88

Lista de tabelas

Tabela 1 - Ensaios requeridos para um sistema de medição de tensão contínua aprovado, de acordo com a NBR IEC 60060, parte 2.	39
Tabela 2 - Intervalo aceitável para os parâmetros de condições ambientais conforme calibração de instrumentos utilizados nas medições.....	41
Tabela 3 – Fontes de incertezas consideradas e utilizadas pelo CA2 para calibração em ATCC do laboratório CA2 (aba para cálculo de incerteza nas calibrações) [18]	44
Tabela 4 – Tolerância para ensaios em sistemas de medição aprovados.....	58
Tabela 5 - Diferenças encontradas em baixa tensão entre o instrumento de referência, voltímetro de crista, e o Instrumento Virtual usando um gerador de funções. (Anexo)	62
Tabela 6 - Diferenças encontradas em alta tensão entre o instrumento de referência e o software utilizando uma fonte de alta tensão em corrente contínua e um divisor de tensão. (Anexo).....	63
Tabela 7 - Fontes utilizadas no cálculo de incerteza para validação do instrumento virtual. (Anexo)	64
Tabela 8 - Incerteza expandida da amplitude e fator de ondulação para cada nível de tensão. (Anexo)	65
Tabela 9 - Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de construção diferente (Universal com Resistivo) e fonte CA com retificação (fator de <i>ripple</i> em 3 %).	74
Tabela 10 - Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de construção diferente (Universal com Resistivo) e fonte CA com retificação (fator de <i>ripple</i> em 5 %).	74
Tabela 11 - Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesma construção (Resistivo com Resistivo) e fonte CA com retificação (fator de <i>ripple</i> em 3 %).	74
Tabela 12 - Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesma construção (Resistivo com Resistivo) e fonte CA com retificação (fator de <i>ripple</i> em 6 %).	75
Tabela 13 - Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesmo tipo construtivo (Universal com universal) e fonte CA com retificação (fator de <i>ripple</i> em 3 %).	75
Tabela 14 – Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesmo tipo construtivo (Universal com universal) e fonte CA com retificação (fator de <i>ripple</i> em 5 %).	75
Tabela 15 – Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de construção diferente (Universal com Resistivo) e fonte CC (fator de <i>ripple</i> em 1 %).	76

Tabela 16 – Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesmo tipo construtivo (resistivo com resistivo) e fonte CC (fator de <i>ripple</i> em 1 %).	76
Tabela 17 – Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesmo tipo construtivo (universal com universal) e fonte CC (fator de <i>ripple</i> em 1 %).	77
Tabela 18 – Incerteza de calibração com 3 % de <i>ripple</i> entre divisores universal e resistivo.	77
Tabela 19 - Incerteza de calibração com 6 % de <i>ripple</i> entre divisores universal e resistivo.	78
Tabela 20 – Incerteza de calibração com 3 % de <i>ripple</i> entre divisores resistivo e resistivo	78
Tabela 21 – Incerteza de calibração com 6 % de <i>ripple</i> entre divisores resistivo e resistivo	79
Tabela 22 – Incerteza de calibração com 3 % de <i>ripple</i> entre divisores universal e universal	79
Tabela 23– Incerteza de calibração com 5 % de <i>ripple</i> entre divisores universal e universal	80
Tabela 24 – Incerteza de calibração com 1 % de <i>ripple</i> entre divisores universal e resistivo.	80
Tabela 25– Incerteza de calibração com 1 % de <i>ripple</i> entre divisores resistivo e resistivo.	81
Tabela 26 – Incerteza de calibração com 1 % de <i>ripple</i> entre divisores universal e universal.	81

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Cepel - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

NBI – Nível Básico de Isolamento

IAP – Impulso Atmosférico Pleno

IAC- Impulso Atmosférico Cortado

IM – Impulso de Manobra

CA1 - Laboratório de Calibração

CA2 - Laboratório de Referência em Medição de Alta Tensão

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR - Norma Brasileira

IEC - International Electrotechnical Commission

SM - Sistema de Medição

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Contínua

INM - Institutos Nacionais de Metrologia

CIGRÉ - *Conseil international des grands réseaux électriques*

RMS - Raiz do valor quadrático médio

f - Frequência

SMA - Sistema de Medição Aprovado

k - Fator de abrangência

BIPM - *Bureau international des poids et mesures*

R_T - Resistência total

FE - Fator de Escala

VI – *Virtual Instrument*

f_s - Frequência de amostragem

σ - Desvio padrão

V_{pp} - Tensão de pico a pico

Z - Impedância

AT - Alta Tensão

BT - Baixa Tensão

v_i - Graus de liberdade

c_i - Coeficiente de sensibilidade

v_{eff} - Graus de liberdade efetivos

TDG – Test Data Generator

1.

Introdução

Os agentes responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica gerenciam e mantêm os sistemas de energia elétrica, detendo em conjunto a responsabilidade de fornecer tensões e correntes elétricas em alta tensão com qualidade, de forma eficiente e segura [1].

Com a crescente demanda por energia elétrica, são necessárias mais pesquisas relacionadas a estes sistemas de geração, proteção, transmissão e distribuição, de forma a aumentar sua eficiência e confiabilidade. O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) é uma instituição de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D+I) para o sistema Eletrobras, possuindo infraestrutura única no hemisfério Sul, com laboratórios de ensaios para alta tensão até 800 kV e ultra alta tensão, classes de tensão em 1200 kV em corrente alternada e ± 1000 kV em corrente contínua, localizados na unidade Adrianópolis em Nova Iguaçu. Estes laboratórios são dedicados à pesquisa experimental em equipamentos elétricos, ensaios e calibração de sistemas de medição para alta tensão em corrente contínua, corrente alternada e impulsos de tensão e corrente [2].

Os sistemas elétricos são projetados para operar com determinadas tensões e correntes nominais, e algumas das preocupações em termos de segurança estão relacionadas ao dielétrico do equipamento alimentado por corrente contínua ou alternada, que deve suportar o nível básico de isolamento (NBI) de cada equipamento. A verificação desta suportabilidade é feita por meio de ensaios com alta tensão em corrente alternada e contínua.

Além dos ensaios descritos acima, necessários para a operação segura do sistema elétrico, os sistemas não funcionam de forma ideal e, na prática, os valores obtidos estão sujeitos a solicitações elétricas transitórias e elevadas, provocadas, por exemplo, por descargas atmosféricas quando os sistemas de proteção não atuarem. Tais anomalias são simuladas em laboratório por meio de ensaios de impulso atmosférico pleno (IAP), e impulso atmosférico cortado (IAC). Esses

surtos de tensão podem ocorrer também ao se realizar uma manobra de chaveamento do sistema, e o ensaio que representa tal fenômeno é o impulso de manobra (IM). Todos esses ensaios são realizados rotineiramente em laboratórios de alta tensão [3].

Esta dissertação insere-se, portanto, na área de ensaios em equipamentos elétricos para alta tensão, que envolve principalmente a aplicação de alta tensão em corrente contínua (ATCC). A pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios de referência em calibração em alta tensão (CA2) e de calibração (CA1) do CEPEL, localizados no complexo de laboratórios de Adrianópolis e dedicados, respectivamente, à calibração de sistemas de medição utilizados em alta e baixa tensão.

1.1.

Contextualização

Atualmente, devido ao desenvolvimento econômico e ao crescimento da demanda por energia elétrica, o uso de alta tensão em corrente contínua vem aumentando, inclusive nas áreas de transmissão e energia renovável, devido ao menor custo e à redução das perdas de energia [1]. Desta forma, a utilização de equipamentos calibrados nos ensaios relacionados a este tipo de energia é extremamente importante e, quanto menor a incerteza associada à calibração, maior a confiabilidade no uso de tais sistemas.

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) começou a atuar na área de alta tensão em corrente contínua em 2008. Desde então, para aumentar o desenvolvimento científico e tecnológico, pesquisas relacionadas à melhoria de produtos e serviços metrológicos em baixa e alta tensão em corrente contínua começaram a ser desenvolvidas e incentivadas [4].

O Programa de Pós-graduação em Metrologia (PósMQI) da PUC-Rio tem uma parceria com o CEPEL desde 2009, com uma série de dissertações relacionadas a ensaios de alta tensão, destacando-se o projeto e desenvolvimento de padrão para alta tensão em corrente contínua na faixa de 1 kV a 50 kV [5], no qual construiu-se um protótipo de divisor resistivo de alta impedância para ensaios com ATCC na faixa de 1 kV a 50 kV, preenchendo uma lacuna de rastreabilidade entre

o padrão nacional do Inmetro e os laboratórios industriais, constituindo assim um sistema de medição de referência (SMR) para calibração de Sistemas de Medição (SM) utilizados em laboratórios industriais para ensaios com ATCC na faixa de 1 kV a 250 kV.

As fontes de alimentação de alta tensão em corrente contínua (ATCC) e baixa tensão em corrente contínua (BTCC) são amplamente utilizadas em muitas indústrias de processo e em laboratórios de pesquisa científica e de testes, como é o caso dos laboratórios do CEPEL. Essas fontes geram as tensões utilizadas nos ensaios dos equipamentos elétricos de potência.

Existem normas que definem os requisitos e parâmetros que devem ser monitorados, sendo que, no caso da calibração em alta tensão em corrente contínua (ATCC), a que descreve tais parâmetros é a ABNT NBR IEC 60060-1:2013 [6]. Contudo, alguns dos parâmetros requeridos por esta norma ainda não são analisados, por falta de equipamentos adequados, com baixa incerteza e quantidade de bits suficientes em comparação aos objetos em calibração, sendo uma alternativa viável a substituição por um sistema de digitalização associado a um software de processamento de sinais digitais.

Existe um ganho econômico na utilização de software nesse tipo de procedimento, além de diminuir e otimizar o tempo gasto em anotações manuais. Deve haver um cuidado no desenvolvimento do software para evitar não conformidades (não atendimento a determinados requisitos estabelecidos por norma) em todos os estágios de desenvolvimento e manutenção, assim como a facilidade na interface, usabilidade e eficiência.

Um dos parâmetros que mais influenciam na qualidade do sinal de tensão contínua gerado para utilização em ensaios de equipamentos elétricos para alta tensão é o fator de ondulação (*ripple*), que é a componente em 60 Hz ou 120 Hz remanescente do processo de retificação da tensão alternada. Embora exista um grande número de laboratórios que ainda não o monitorem, sua avaliação, seguida de medidas para garantir sua redução ou filtragem, torna-se essencial para garantir que esteja dentro dos limites especificados pelas normas aplicáveis [7].

A dissertação “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” [7], desenvolvida anteriormente no PósMQI, realizou ensaios sintéticos e experimentais com

osciloscópio em baixa e alta tensão, validando os algoritmos de forma que estivessem de acordo com o rascunho da norma IEC 61083-4:2011 [8], que define os requisitos para software que analise as formas de onda digitalizadas referentes a ensaios em corrente alternada e contínua.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido em LabVIEW [9] poderia então ser aperfeiçoado e utilizado na avaliação da influência do *ripple*, nos ensaios em ATCC, sendo este um dos objetivos da presente dissertação de mestrado em Metrologia.

1.2.

Motivação

Os laboratórios de calibração do CEPEL possuem vários dos seus serviços de calibração acreditados pela CGCRE (Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO) e todos os seus procedimentos são baseados nas normas nacionais e internacionais relevantes.

Assim, a motivação para esta pesquisa de mestrado em Metrologia é suprir a lacuna existente na análise da qualidade de um parâmetro cuja avaliação é determinada pelas normas ABNT NBR IEC 60060-1:2013 [6] e ABNT NBR IEC 60060-2:2016 [7]. Para esta análise foi utilizado e otimizado, no decorrer dessa pesquisa, um sistema de aquisição e análise de dados baseado em LabVIEW, intitulado HVAT AC & DC (High Voltage Analysis Tests), previamente desenvolvido na dissertação de mestrado em Metrologia de Yuri dos Reis Oliveira [9], de modo que este possa ser validado após a publicação da norma IEC 61083-4 [8], que ainda está em desenvolvimento.

Com base nessas considerações, a dissertação desenvolvida servirá como base para avaliações da possível influência do *ripple* nas calibrações de sistemas de medição em alta tensão, atendendo assim a critérios de confiabilidade metrológica.

1.3.

Objetivos: geral e específicos

A proposta desta dissertação é analisar a qualidade da tensão contínua que é gerada por meio de processos de retificação da tensão alternada, de forma a identificar uma possível influência do fator de *ripple* sobre a calibração de sistemas de medição utilizados em laboratórios de ensaios, bem como se os níveis de tal influência estão de acordo com os parâmetros e limites estabelecidos pelas normas ABNT NBR IEC 60060-1:2013 [6] e ABNT NBR IEC 60060-2:2016 [7].

Assim, esta pesquisa de mestrado em Metrologia tem como objetivo geral avaliar o impacto da ondulação remanescente da retificação (*ripple*) na calibração de sistemas de medição de referência (SMRs), utilizados como padrões de referência para a calibração de sistemas de medição para alta tensão, aperfeiçoando-se inicialmente um sistema computacional previamente desenvolvido para o processamento de formas de onda de ensaios em laboratórios de alta tensão, intitulado HVAT AC & DC [9].

Para alcançar este objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as normas aplicáveis a ensaios em baixa e alta tensão em corrente contínua e os procedimentos de ensaio, incluindo sistemas de geração, divisores de tensão e sistemas de medição;
- Levantar os métodos de retificação para geração de baixa e alta tensão em corrente contínua e os mecanismos de formação de *ripple*, assim como sua influência na calibração;
- Aperfeiçoar o algoritmo de um sistema computacional previamente desenvolvido em LabVIEW, para comunicar-se com um multímetro de 8½ dígitos, e adquirir dados provenientes de ensaios e calibração em baixa e alta tensão em corrente contínua, os mesmos adquiridos pelo HVAT AC & DC, com VI diferente;
- Simular ensaios e realizar calibração de baixa e alta tensão em corrente contínua com diferentes níveis de *ripple*; e

- Avaliar o efeito do nível de *ripple* nos algoritmos computacionais de estimativa dos parâmetros relevantes para ensaios de ATCC e BTCC, com base em simulações em LabVIEW e ensaios de baixa tensão (BT) e alta tensão (AT) em corrente contínua com diferentes níveis de *ripple*.

1.4.

Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos, que abordam temas relacionados à influência do *ripple* em calibrações de equipamentos de AT em laboratórios de ensaios com aplicação de tensão em corrente contínua, fornecendo ao leitor uma abordagem que identifica e contextualiza lacunas da literatura científica especializada, contribuindo para aspectos de segurança, à comunidade científica e operadores do sistema, por meio de dados obtidos no decorrer desta pesquisa.

Este **Capítulo 1** refere-se à introdução da dissertação, na qual buscou-se estabelecer uma relação do leitor com o tema proposto, dando uma ideia dos parâmetros que serão avaliados, contexto, motivação, objetivos geral e específicos e a estrutura da avaliação.

O **Capítulo 2** descreve detalhadamente os requisitos dos ensaios em laboratórios para equipamentos de AT segundo as normas ABNT NBR IEC 60060-1:2013 [6] e ABNT NBR IEC 60060-2:2016 [7], para os ensaios em alta tensão em corrente contínua.

No **Capítulo 3**, descrevem-se as técnicas de retificação de tensão alternada e os parâmetros de qualidade relacionados à tensão retificada, incluindo o *ripple*. Também consideram-se os limites estabelecidos para as formas de onda que contenham *ripple*, obtidas digitalmente, de forma que o software de análise possa ser validado de acordo com o atual rascunho da norma IEC 61083-4 [8].

No **Capítulo 4** apresenta-se o aperfeiçoamento do software HVAT AC & DC [9], juntamente com ensaios em baixa e alta tensão em corrente contínua, utilizando o software aperfeiçoado.

O **Capítulo 5** apresenta a discussão dos resultados experimentais e a análise da influência do fator de *ripple*, em calibrações com equipamentos elétricos, assim como na calibração de Sistemas de Medição de Referência utilizados nos experimentos desta dissertação, que é o objetivo geral.

O **Capítulo 6** apresenta as considerações finais e motivação para trabalhos futuros.

2.

Ensaio com alta tensão em corrente contínua (ATCC)

Os estudos e as aplicações práticas da eletricidade começaram com corrente contínua. A corrente alternada veio mais tarde. A Guerra das Correntes ou Batalha das Corrente, como costuma ser chamada a disputa entre Nikola Tesla (CA) e Thomas Edson (CC) nas últimas décadas do século XIX, é um marco importante na história da Corrente Contínua. As limitações técnicas da época impossibilitavam tensões tão altas em CC como em CA, o que levava a maiores perdas de transmissão em CC. Isto tem mudado com o avanço da tecnologia (principalmente, eletrônica de potência) [10].

O primeiro sistema completo em ATCC foi desenvolvido em 1945, mas não se tornou operacional devido à segunda guerra mundial [11]. O primeiro sistema operacional em ATCC que chegou a operar foi em Gotland, na Suécia, em 1954.

Atualmente, a tensão em corrente contínua vem sendo utilizada em projetos de pesquisa científica, para testar equipamentos que não devem ser ensaiados utilizando fontes CA com alto carregamento capacitivo, algumas aplicações em equipamentos industriais e hospitalares, e sistemas de transmissão [12].

O Brasil tem redes de ATCC com aproximadamente 800 kV e devem ser analisadas, para cada caso, o vantagens em comparação à transmissão em ATCA, que tipicamente são [13]:

- Menor risco de falhas – Os sistemas ATCC podem interligar pontos de frequência não sincronizadas com frequências diferentes utilizando o sistema HVDC (High-Voltage Direct Current – ATCC) *back-to-back*. Dessa forma, aumenta a estabilidade do sistema elétrico, uma vez que desacopla sistemas e permite controlar todo o fluxo de potência, reduzindo possíveis falhas em cascata (contingências geradas de um lado do ponto de conexão que se refletem no outro lado do ponto), e diminuindo a possibilidade de apagões devido à restrição de cargas em linhas de transmissão/transformadores;

- Redução de perdas na transmissão de energia – Para o mesmo nível de corrente transmitida, as perdas em CC comparadas a CA são menores. Na transmissão CC não há efeito pelicular, devido à frequência idealmente nula; as perdas por efeito corona são menores; há menos rádio interferência, principalmente sob condições climáticas adversas, em um condutor de mesmo diâmetro e tensão eficaz (RMS);
- Redução de custos a partir de 1000 km – Comparada à mesma potência e condições de transmissão a partir de certas distâncias com linhas aéreas, e com cabo subterrâneo ou marítimo (além de ter que respeitar o limite técnico para transmissão em CA), a Figura 1 mostra a comparação do custo da transmissão CA x CC;

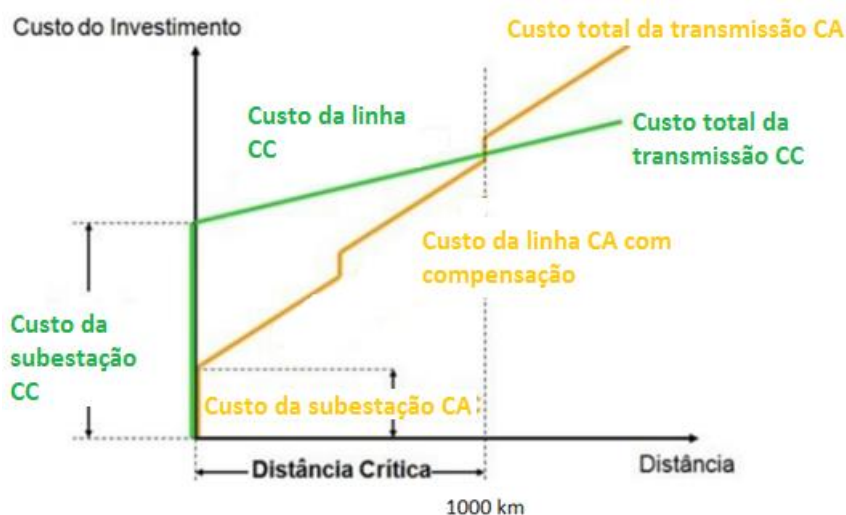


Figura 1 - Custo do investimento da transmissão em CA e CC, adaptado de [14].

- Menor impacto ambiental – Tamanho menor se comparada a uma rede CA (cuja faixa de servidão é maior, além do ruído audível e impacto visual), além da possibilidade de uso do caminho de retorno por terra ou mar em operação monopolar; e
- Aumento da segurança energética – A transmissão em CC é necessária para uma melhor captação de fontes de energia renováveis que, com o aumento da utilização da energia, tornam-se cruciais, já que as reservas naturais são cada vez mais escassas.

As principais desvantagens da transmissão em ATCC em comparação a ATCA são:

- Custos mais elevados para pequenas distâncias. Não necessita de compensação de reativos da linha de transmissão, porém os custos aumentam devido à necessidade de instalação de conversores e filtros;
- Complexidade dos sistemas de controle;
- Geração de harmônicos no processo de retificação/conversão que necessitam ser filtrados.

Com o objetivo de atender aos diversos ensaios em alta tensão em corrente contínua relacionados à pesquisa científica, em equipamentos industriais e sistemas de transmissão, a norma IEC 60060-1:2013 [6] estabelece quais parâmetros devem ser analisados nos ensaios e calibrações, conforme descrito nas próximas seções.

2.1.

Fonte de Tensão em Corrente Contínua de até 240 kV

Para que um sistema de medição CC seja mais confiável é necessário o uso de uma fonte estável.

A fonte de tensão em corrente contínua da HAEFELY HIPOTRONICS série 8000 fornece uma tensão de até 60 kV por módulo e corrente de 16 mA. No laboratório CA2 do CEPEL, possui 4 módulos, gerando então uma tensão de até 240 kV, com isolamento a ar e baixa ondulação (*ripple*) teórica de 0,2 % por mA. A Figura 2 mostra a fonte que alimenta o sistema de medição de referência para calibração em CC do CA2 [15].

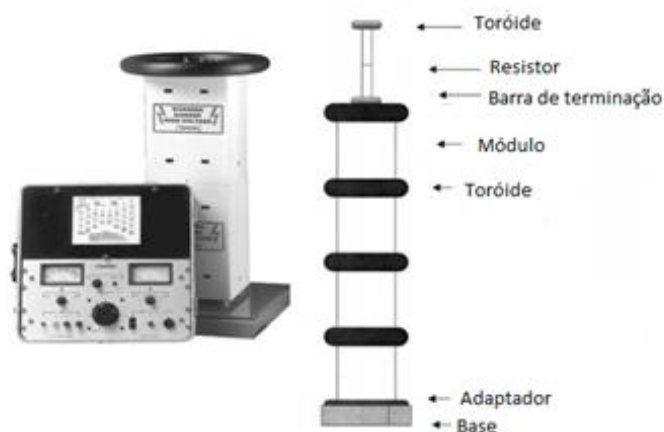


Figura 2- Fonte de Tensão Hipotronics série 8000 com 60 kV/módulo, adaptado de [15].

2.2.

Sistema de Medição em ATCC

Esta seção apresenta os sistemas de medição em ATCC e o desenvolvimento do algoritmo de medição utilizado para estimar os parâmetros dos ensaios em ATCC, assim como as ferramentas e métodos usados no processamento e pré-processamento, sendo também apresentada a plataforma de programação LabVIEW, na qual o software foi desenvolvido.

Um Sistema de Medição (SM) é um conjunto de um ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, incluindo, se necessário, reagentes e insumos adequados para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de naturezas especificadas [16].

Os sistemas de medição utilizados em alta tensão são denominados SMAT, sendo compostos basicamente por dispositivos de conversão, sistema de transmissão e instrumentos indicadores e/ou registradores. Quando é utilizado um software para estimar os parâmetros das medições, este também faz parte do SM.

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 [6], um SM com uma incerteza de medição menor ou igual a 1 % pode ser 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 é calibrado por meio da comparação com um SMR.

Os sistemas de medição de alta tensão são caracterizados pelas condições operacionais sob as quais o sistema opera dentro dos limites da incerteza, que incluem: Fator de Escala atribuído, tensão nominal de operação, faixa de medição do sistema, tempo de operação e tipo da forma de onda de entrada, taxa de aplicações e condições ambientais. O Fator de Escala atribuído a um sistema completo inclui os respectivos Fatores de Escala de todo o sistema, ou seja, o divisor, o cabo, os atenuadores e o instrumento de medição (multímetro, osciloscópio, etc.). O Fator de Escala deve ser calibrado para que a medição seja rastreável a um padrão. A calibração é influenciada por duas principais condições. A primeira é que o Fator de Escala deve ser calculado incluindo o comportamento dinâmico do sistema. A segunda é que a incerteza de medição de toda a cadeia de medição deve ser aproximada ou estimada com uma precisão adequada. Quando estas condições são atendidas, tendo em vista as tolerâncias da norma IEC 60060-2:2016 [7], o sistema torna-se um sistema de medição aprovado (SMA) e pode ser usado em laboratórios de ensaios para equipamentos de alta tensão.

Em laboratórios de ensaios em alta tensão (AT), utiliza-se a tensão em corrente contínua, entre outras aplicações, para verificar a suportabilidade dielétrica dos equipamentos que fazem parte de sistemas de transmissão em ATCC. Nestes ensaios, a tensão aplicada ao equipamento deve ser medida por um sistema de medição aprovado (SMA) de acordo com as normas aplicáveis (IEC 60060-1:2013 e 60060-2:2016 [6,7]), sendo este composto por um divisor de tensão, cabo de transmissão e instrumento de medição.

Para calibração desses sistemas de medição de ATCC, o laboratório de calibração deve dispor de uma fonte de ATCC capaz de gerar o nível de tensão

necessário, de forma estável e com ondulação dentro de limites estabelecidos em norma, e um sistema de medição de referência (SMR) com características conforme a norma aplicável [17].

2.2.1.

Dispositivo de conversão

Os dispositivos convencionais utilizados na indicação e/ou registro de medições, normalmente utilizados em laboratórios de alta tensão, não foram construídos com a finalidade/capacidade de medir altas tensões sem o uso de um dispositivo de conversão de tensão/corrente. Estes dispositivos de conversão (transdutores) têm o intuito de, como o próprio nome já diz, converter a amplitude da tensão/corrente medida a níveis que não danifiquem os registradores convencionais de baixa tensão.

São construídos, usualmente, por meio de resistores, capacitores ou uma combinação (utilizando os dois componentes), podendo estar associados em série e/ou paralelo, conforme o tipo e forma de tensão a ser medida.

A dimensão do divisor (tamanho) está relacionada à tensão disruptiva da unidade de alta tensão, sendo que, quanto maior a altura (relacionado ao dielétrico), maior será a tensão nominal de operação do divisor. A distância de isolamento entre o ponto sobre o potencial de alta tensão e o ponto de aterramento, ou equipamentos aterrados, deve ser de 2,5 m/MV a 3 m/MV para tensões contínuas (ATCC) [12].

Os divisores indicados para medição ATCC são o Resistivo de alta impedância e o Universal, mostrados na Figura 3. A resistência do divisor deve ser de elevado valor ôhmico, na faixa de centenas de $M\Omega$ em sua unidade de alta tensão e de dezenas de $M\Omega$ em sua unidade de baixa tensão para que, devido à limitação da corrente, o divisor não sofra influência do dielétrico externo, alterando o seu Fator de Escala, e nem da elevação de temperatura. A corrente que circula no divisor é baixa, mesmo assim, deve-se tomar cuidado para que não seja maior que 0,5 mA, conforme recomendado pela norma [17], para minimizar a incerteza de medição devida a correntes de fuga.

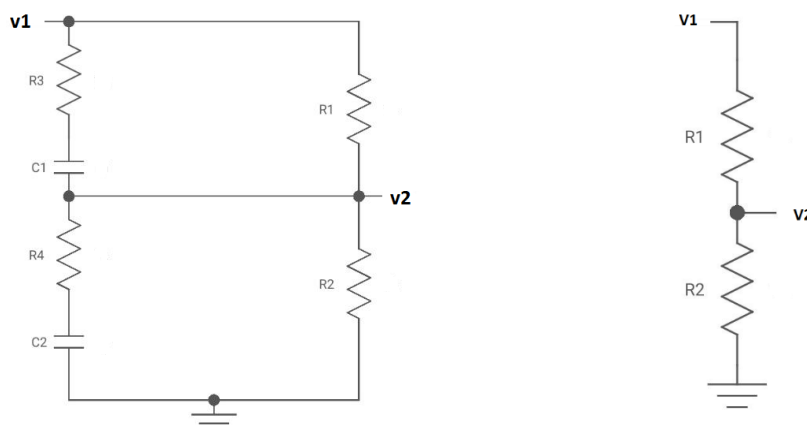


Figura 3 - Esquema de construção de divisores universal (esquerda) e resistivo (direita).

Mesmo o divisor resistivo de alta impedância sendo indicado para medição ATCC, deve-se atentar aos níveis de ondulação pois, caso o divisor seja uma carga elevada para o retificador, a ondulação será intensificada pelo mesmo. Assim, quando for necessária uma medição com critérios mais rígidos e avaliações qualitativas de tensão (a partir de baixos níveis de ondulação de tensão), é aconselhável a utilização um divisor do tipo universal (capacitor em série com resistor e também um braço em paralelo com resistor) ou, caso as medições sejam feitas por meio de um osciloscópio, utilizar o acoplamento CA.

No laboratório de referência em calibração em alta tensão do CEPEL (CA2) são encontrados diversos divisores com construções e aplicações diferentes, de acordo com o seu tipo. Esta dissertação dá destaque aos utilizados na calibração em alta tensão em corrente contínua. São eles:

- Divisores resistivos (impedâncias resistivas), denominados SMR7 e SMR21:

Para a utilização de divisores resistivos em ensaios CC as resistências de sua construção devem ser de alta impedância, na faixa de $M\Omega$ / $G\Omega$.

O divisor resistivo de referência, intitulado SMR7, apresentado na Figura 4, foi desenvolvido no CEPEL utilizando resistores estáveis e com tolerância de 1 %, sendo o equipamento dividido em duas partes, de alta e baixa tensão. A resistência total na alta tensão é de $14,92 M\Omega$, na baixa tensão é de $5,11 k\Omega$ e a tensão máxima CC é de 15 kV.



Figura 4 – Divisor resistivo intitulado SMR7.

O divisor SMR21, apresentado na Figura 5, possui componentes com os mesmos valores em alta e baixa tensão do SMR7, e foi utilizado como objeto sob ensaio para calibração entre divisores de mesma construção.



Figura 5 - Divisor resistivo intitulado SMR21.

- Divisores Universais, denominados SMR2 e SMR3:

O divisor do fabricante HAEFELY é um divisor de referência com faixa de operação de até 180 kV em CC, incerteza de 1 %, resistor primário de 400 Ω , resistor primário paralelo de 225 M Ω e capacitância primária de 500 pF. A Figura 6 mostra o divisor.



Figura 6 - Divisor universal intitulado SMR2.

O Divisor Universal denominado SMR3 possui R_1 de $1200\text{ M}\Omega$ e C_1 de 500 pF , usado como objeto sob ensaio em comparação a outro divisor de mesma forma construtiva. A Figura 7 mostra o divisor SMR3.



Figura 7 - Divisor universal intitulado SMR3.

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 coaxiais de transmissão, podendo ser utilizado um atenuador no final do cabo, conforme o instrumento indicador ou registrador utilizado.

Geralmente os atenuadores de tensão são utilizados quando é necessário realizar medições em instrumentos que possuem uma entrada de tensão limitada (a tensão de ensaio é maior do que a tensão limite de entrada do instrumento de medição). Estes atenuadores são construídos com características de comportamento dinâmico melhores ou iguais às do divisor, de modo a não influenciar nas medições.

Quanto ao Fator de Escala do SM, quando existe a utilização de atenuadores é notório que estes influenciarão diretamente em seu valor.

É importante se atentar aos cabos (tamanho e impedância), pois cada sistema é composto por um cabo. Uma vez calibrado, deverá ser utilizado o mesmo cabo no uso do sistema e realizar a medição da impedância do mesmo.

Na calibração em ATCC, o cabo por si só não influencia no Fator de Escala do sistema de medição, por se tratar de uma tensão/corrente estacionária. Porém, quando se faz o ensaio de resposta em frequência, realizado na tensão residual alternada (*ripple*), de 60 Hz até em torno de 420 Hz, deve-se atentar em relação ao cabo associado à unidade de baixa tensão do divisor. Uma frequência de até 420 Hz é considerada baixa quanto à utilização de cabo coaxial, dessa forma não influenciaria no Fator de Escala, porém esse cabo é uma capacitância que, somada a elementos indutivos e capacitivos, possivelmente encontrados na unidade de baixa tensão do transdutor, leva à necessidade de uma análise mais detalhada, pois o mesmo pode ou não ressonar com componentes internos do sistema (influenciando no FE) [8].

2.2.3.

Instrumentos Digitais de Medição para ATCC

Os instrumentos de medição são utilizados para realizar medições, individualmente ou associados a um ou mais dispositivos suplementares [16].

Os instrumentos de medição são usados 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 8½ dígitos é o instrumento utilizado nos sistemas de medição em ATCC do Cepel. Um exemplo de um instrumento com estas características é apresentado na Figura 8.



Figura 8 – Multímetro Agilent 3458A Digital de 8½ dígitos [18].

Instrumentos com estas características, se usados como instrumentos de bancada sem um software associado, apenas indicam o valor médio da tensão de ensaio, não permitindo ao usuário que monitore simultaneamente os parâmetros de avaliação qualitativa, como o fator de ondulação 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 de 8 bits de resolução vertical, associados ao algoritmo de medição que foi desenvolvido nesta dissertação.

Os instrumentos de medição/software utilizados em sistemas de medição para alta tensão em corrente alternada, alta tensão em corrente contínua e corrente ainda não têm um requisito regulamentado por documento normativo em vigor, porém existe uma norma internacional ainda em fase de desenvolvimento, a IEC 61083-4 [8].

2.3.

Parâmetros normalizados para calibrações em ATCC

Nesse tipo de ensaio, a tensão geralmente é obtida por meio de circuitos retificadores e, de acordo com o tipo de equipamento a ser ensaiado e suas condições, existem requisitos a que a fonte de tensão deve atender. Após a

retificação pelos circuitos retificadores, a onda passa por uma etapa de filtragem, composta por capacitores, cuja função é deixar a forma de onda de saída o mais próximo de uma tensão contínua pura. Porém, por não ser ideal, devido ao capacitor e à corrente consumida pela carga, ainda aparece uma ondulação na tensão fornecida pela fonte, conhecida como *ripple*. A Figura 9 exibe um exemplo de *ripple*.

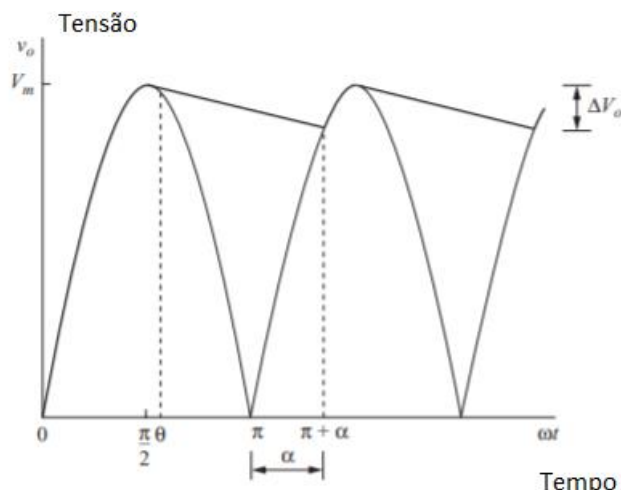


Figura 9- Ondulação (*ripple*) pós-retificação, adaptado de [19].

A norma IEC 60060-1 [6] estabelece os parâmetros a serem analisados:

- **Valor da tensão de ensaio** – Valor médio aritmético da tensão aplicada durante um período, conforme equação (1). Para ensaio com duração menor ou igual a 60 s, a tolerância é de $\pm 1 \%$ e a incerteza deve ser $\leq 3 \%$; para duração maior que 60 s, a tolerância é de $\pm 3 \%$ e a incerteza deve ser $\leq 3 \%$;

$$V_{cc} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (1)$$

Onde:

T é o período de tempo; e

$v(t)$ é a tensão aplicada.

- **Ondulação (*ripple*)** – Desvio periódico do valor médio aritmético da tensão de ensaio.
- **Amplitude da ondulação (amplitude de *ripple*)** – Metade da diferença entre os valores máximo e mínimo da oscilação do sinal de tensão, sendo esta oscilação a componente CA que compõe a tensão CC, conforme equação (2). A incerteza de medição deve ser $\leq 10 \%$;

$$\delta V = \frac{1}{2} (V_{MAX} - V_{MIN}) \quad (2)$$

Obs: Quando a forma da ondulação é quase senoidal, valores eficazes verdadeiros multiplicados pela raiz quadrada de dois são aceitáveis para a determinação da amplitude da ondulação;

- **Fator de ondulação (fator de *ripple*)** – Relação entre a amplitude da ondulação e o valor da tensão de ensaio, conforme a equação (3). Deve ter um valor $\leq 3 \%$;

$$Fr = \frac{\delta V}{V_{cc}} \cdot 100 \quad (3)$$

- **Queda de tensão** – Redução instantânea da tensão de ensaio por um curto período até alguns poucos segundos, podendo ser causada por descargas não disruptivas.

Os sistemas de medição são submetidos a ensaios iniciais realizados em sua construção e projeto, seguidos por ensaios de desempenho e verificações de desempenho ao longo de sua vida útil, descritos a seguir:

- **Ensaio de tipo:** Ensaio de conformidade para um sistema de medição, compreendido como um ensaio realizado em um componente ou em um sistema de medição completo do mesmo projeto, ou seja, é um ensaio realizado logo após a fabricação do componente e/ou sistema, para caracterizá-lo em condições de operação.
- **Ensaio de rotina:** Ensaio de conformidade realizado em cada item individual durante e/ou após a fabricação em tempo determinado.
- **Ensaio de Desempenho:** Ensaio realizado em um sistema de medição completo para caracterizá-lo em condições de operação.
- **Verificação de desempenho:** Procedimento para assegurar que o resultado do ensaio de desempenho mais recente ainda está válido.

A Tabela 1 sintetiza os ensaios requeridos e os tipos/quando devem ser feitos para um sistema de medição de alta tensão em corrente contínua aprovado [8].

Tabela 1 - Ensaios requeridos para um sistema de medição de tensão contínua aprovado, de acordo com a NBR IEC 60060, parte 2.

Tipo de ensaio	Ensaio de tipo	Ensaio de rotina	Ensaio de Desempenho	Verificação de Desempenho
Fator de Escala na calibração			X	
Verificação do Fator de Escala				X
Linearidade		X	X (se aplicável)	
Comportamento dinâmico *	X			
Estabilidade a longo prazo	X		X (se aplicável)	
Efeito da temperatura ambiente	X			
Estabilidade a curto prazo		X		
Efeito da proximidade	X (se aplicável)		X (se aplicável)	
Efeito do programa de computador	X (se aplicável)			
Ensaio de suportabilidade a seco no dispositivo de conversão	X	X (se aplicável)		
Ensaio de suportabilidade sob chuva ou poluição no dispositivo de conversão	X (se aplicável)			
Fator de Escala do dispositivo de conversão	X	X		
Fator de Escala do sistema de transmissão que não seja um cabo	X	X		
Fator de Escala do instrumento de medição	X	X		

*Comportamento dinâmico pela resposta amplitude/frequência: aplica-se aos ensaios em ATCC somente quando é feita a análise do *ripple*, pois o sistema de medição é submetido, geralmente, a uma baixa tensão senoidal, sendo esta controlada, e medindo a sua saída. São feitas repetidas medições para uma faixa de frequências entre 0,5 a 7 vezes da frequência fundamental da ondulação [7]. A diferença das tensões medidas deve estar dentro de 3 dB. E a verificação de desempenho para sistema de medição de ondulação é feita medindo o Fator de Escala pelos mesmos métodos da tensão alternada.

As calibrações e verificações de desempenho são realizadas periodicamente (entre 1 e 5 anos, dependendo do equipamento e condições de uso às quais é submetido), com o intuito de determinar o Fator de Escala e garantir que o sistema de medição esteja indicando valores confiáveis e com 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 calibração. Sua estabilidade deve estar dentro da faixa especificada pela norma [6, 7] em $\pm 3\%$ do Fator de Escala, para que grandes variações não ocorram em longos períodos de tempo.

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 (em avaliações de *ripple*) 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 frequências avaliadas. O sistema de medição deve ser capaz de medir a amplitude de *ripple* com uma incerteza menor que 10 %.

2.3.1.

Instalações e condições ambientais

O início do ensaio é considerado válido após se medir e registrar a tensão, frequência da rede, temperatura e umidade relativa. Se esses parâmetros estiverem dentro dos intervalos descritos na Tabela 2, a calibração pode ser iniciada. Se estiverem fora desses limites, a calibração não pode ser iniciada e providências devem ser tomadas para que sejam adequadas às especificações. Caso existam intervalos diferentes aos citados, os mesmos serão identificados por meio de etiqueta fixada no corpo do instrumento [18].

Tabela 2 - Intervalo aceitável para os parâmetros de condições ambientais conforme calibração de instrumentos utilizados nas medições

Tensão da rede (V)	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Frequência
108 a 132	18 a 28	40 a 80	Industrial

Em relação à influência da temperatura em divisores resistivos (para utilização em ATCC), estes devem possuir um elevado valor ôhmico, na faixa de centenas de $M\Omega$ em sua unidade de alta tensão e de dezenas de $M\Omega$ em sua unidade de baixa tensão, provocando uma limitação da corrente, e dessa forma evitando a influência devido à elevação de temperatura. [19]

O Fator de Escala (FE) de um sistema de medição pode ser afetado pela temperatura ambiente. Este efeito pode ser quantificado pela determinação do FE em diferentes temperaturas ambiente ou por cálculos computacionais.

O fator de correção de temperatura para o FE pode ser usado em casos onde a temperatura ambiente varia em grandes escalas. O resultado de um teste é uma estimativa de uma mudança do FE devido à temperatura ambiente [6, 20]. A incerteza padrão do tipo B é dada pela equação (4):

$$u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_T}{F} - 1 \right| \quad (4)$$

Onde:

- u_{B5} – Incerteza relativa ao efeito da temperatura, sendo o subscrito “B5” referenciado à norma NBR IEC 60060-1 e 2;
- F_T – Fator de Escala no teste de efeito de temperatura;
- F – Fator de Escala da temperatura na calibração.

2.3.2.

Fontes de incerteza de medição para calibração de um sistema para ATCC

A seguir, são descritas as fontes de incerteza que são analisadas nas calibrações do laboratório CA2 [18]:

- **Incerteza de medição do SMR:** Incerteza de calibração em relação ao valor do padrão utilizado como referência. Encontrada no certificado de calibração do padrão.
- **Desvio padrão experimental:** Desvio padrão máximo obtido das medições. Calculado a partir do desvio padrão máximo das amostras.
- **Incerteza de medição do instrumento de baixa tensão do SMA:** Incerteza do instrumento de baixa tensão utilizado na medição no SMA. Encontrado no certificado de calibração do instrumento.
- **Resolução do SMR e SMA:** Mínimo quantificável pelo instrumento.

Os instrumentos de medição digitais podem influenciar diretamente os resultados obtidos e faz-se necessária a avaliação da incerteza de medição dos mesmos [13, 21]. A incerteza padrão do tipo B para esses indicadores digitais é calculada pela equação 5:

$$u_{B8} = \frac{1}{\sqrt{12}} \frac{dx}{x} \quad (5)$$

Onde:

- u_{B8} – Incerteza relativa à resolução do instrumento, subscrito referenciado da norma IEC 60060-1 e 2;
- dx – Resolução do instrumento;
- x – Indicação do instrumento.

- **Comportamento dinâmico:** Comportamento dos divisores com relação ao tempo e à polaridade. Encontra-se calculando o FE médio e utilizando o maior desvio em relação ao FE médio.
- **Estabilidade:** Variação do FE em relação à tensão ao longo do tempo (calibrações anteriores). O tempo causa uma mudança inevitável da resistência, seguida por uma mudança na relação do divisor.
- **Linearidade:** Proporciona uma extensão da validade do FE a partir da tensão máxima em que a calibração foi realizada até o limite superior da faixa de medição atribuída.

- **Proximidade:** Variações do FE ou de outro parâmetro de um dispositivo devido aos efeitos de proximidade podem ser determinadas por meio de medições realizadas para diferentes distâncias do dispositivo em relação a paredes aterradas ou estruturas energizadas.
- **Graus de liberdade efetivos:** De acordo com o ISO GUM [21], o número de graus de liberdade efetivos da incerteza padrão combinada de um mensurando é calculado pela equação (6):

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (6)$$

- v_{eff} – Graus de liberdade efetivos;
- u_i – Incertezas padrões que compõem a incerteza combinada;
- n – Número de incertezas padrões que compõem a incerteza combinada;
- u_c – Incerteza padrão combinada;
- v_i – Graus de liberdade correspondentes.

O número de graus de liberdade é um número inteiro. Sempre que houver números decimais no valor dos graus de liberdade efetivos, somente a parte inteira do número deve ser considerada. De acordo com o ISO GUM [21], o número de graus de liberdade de uma incerteza-padrão tipo B é considerado infinito.

- **Fator de abrangência:** O fator de abrangência (“k”) é definido a partir da tabela de distribuição t de Student, e o mesmo depende da probabilidade de abrangência e também do número de graus de liberdade efetivos da incerteza-padrão combinada do mensurando. Geralmente a probabilidade de abrangência é de 95%.

A Tabela 3 sintetiza as fontes de incerteza descritas acima que são consideradas e utilizadas no formulário utilizado nas calibrações do laboratório CA2, informando o tipo de distribuição de probabilidade, graus de liberdade e o fator divisor desse caso.

Tabela 3 – Fontes de incertezas consideradas e utilizadas pelo CA2 para calibração em ATCC do laboratório CA2 (aba para cálculo de incerteza nas calibrações) [18]

Fontes de Incerteza	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor
Incerteza do SMR	NORMAL	∞	k_1
Desvio padrão experimental	NORMAL	9	$\sqrt{10}$
Instrumento do sistema sob calibração	NORMAL	∞	k_2
Resolução do SMR	RETANGULAR	∞	$\sqrt{12}$
Resolução do sistema sob calibração	RETANGULAR	∞	$\sqrt{12}$
Comportamento dinâmico do sistema sob calibração	RETANGULAR	∞	$\sqrt{3}$
Estabilidade do SMR	*	∞	$\sqrt{2}$
Estabilidade do sistema sob calibração	*	∞	$\sqrt{3}$
Linearidade do SMR	RETANGULAR	∞	$\sqrt{3}$
Linearidade do sistema sob calibração	RETANGULAR	∞	$\sqrt{3}$
Proximidade	RETANGULAR	∞	$\sqrt{3}$

*Pode ser normal ou retangular, depende da análise.

- **Incerteza dos Parâmetros de Ensaio:** A determinação das incertezas associadas aos parâmetros de ensaio deve ser feita a partir da incerteza padrão combinada, de forma que, através dela, possa ser obtida a incerteza expandida. O guia para expressão de incerteza de medição (GUM) estabelece alguns métodos que serão abordados nos itens a seguir [21]:

- **Incerteza Padrão Combinada:** Conforme a equação (7) é possível estimar a incerteza padrão combinada, sendo esta a combinação entre todas as incertezas padrão do tipo A e B:

$$u_c = \sqrt{u_{p1}^2 + u_{p2}^2 + u_{p3}^2 + \dots + u_{pn}^2} \quad (7)$$

Onde:

u_c – Incerteza padrão combinada;

u_{p1} , u_{p2} , u_{p3} e u_{pn} – Incertezas padrões.

- **Incerteza Expandida:** É a expansão da incerteza combinada através de um fator de abrangência, ligada diretamente ao nível de confiança desejado. É importante ressaltar que, se as incertezas não forem do tipo A ou B, é estipulado um fator de abrangência igual a 2, de modo que a confiabilidade seja de 95,45 %.

De maneira a auxiliar a avaliação do valor dessa abrangência, utiliza-se o método da distribuição Student, por meio do cálculo de graus de liberdade efetivo (v_{eff}), dado pela fórmula de Welch-Satterthwaite. A equação (8) para a incerteza expandida é mostrada abaixo:

$$U = k u_c \quad (8)$$

Onde:

- U – Incerteza expandida;
- k – Fator de abrangência;
- u_c – Incerteza combinada;

Para laboratórios de calibração, é comum utilizar um nível de confiança de 95,45 %, de modo que, quando houver incertezas padrões do tipo A, o número de graus de liberdade será $n-1$, e quando houver incertezas padrões do tipo B, são considerados infinitos graus de liberdade.

- **Incerteza de Calibração:** Por meio da equação (9) é possível estimar a incerteza expandida de calibração, calculada a partir de um SMR com suas respectivas incertezas padrões do tipo A e do tipo B.

$$U_{cal} = k u_{cal} = k \sqrt{u_{ref}^2 + u_A^2 + \sum_{i=0}^N u_{Bi}^2} \quad (9)$$

Onde:

- U_{cal} – Incerteza combinada de calibração;
- k – Fator de abrangência;

- u_{ref} – Incerteza padrão combinada do fator de escala do sistema de medição de referência em sua calibração;
 - u_A – incerteza do tipo A na determinação do fator de escala;
 - u_{Bi} – Incerteza do tipo B;
 - N – Quantidade de incertezas do tipo B.
- **Incerteza de Medição:** Sendo uma incerteza de responsabilidade do usuário, é calculada a partir da incerteza padrão combinada do FE atribuído e contribuições de incertezas padrões do tipo B, conforme a equação (10):

$$U_M = k u_M = k \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + \sum_{i=1}^N u_{Bi}^2} \quad (10)$$

Onde:

- U_M – Incerteza padrão combinada de medição utilizando um SMA;
- k – Fator de abrangência;
- u_{cal} – Incerteza padrão combinada de calibração do SMA;
- u_{Bi} – Incertezas tipo B;
- N – Quantidade de incertezas do tipo B.

3.

Retificação para Geração de Alta Tensão em Corrente Contínua

O circuito retificador é a forma mais utilizada e também a mais eficiente para se obter uma tensão contínua com amplitude elevada, porém somente por retificação não é possível obter uma tensão puramente contínua. 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. Os diodos utilizados nos retificadores são dispositivos semicondutores e, se forem de silício, provocam uma queda de tensão de 0,6 V a 0,7 V, embora suportem tensões reversas de pico de 2500 V. São associados em série em retificadores de alta tensão, formando blocos de diodos, de maneira que, durante o período de não condução, a tensão reversa seja distribuída igualmente pelos diodos associados em série, tendo assim a capacidade de suportar uma maior tensão reversa [22].

Nesta dissertação serão descritos apenas os três tipos de retificadores encontrados nos laboratórios do Cepel, e utilizados para ensaios em ATCC, nas seções a seguir.

3.1.

Retificador de meia onda

O retificador monofásico de meia onda, teoricamente, é a estrutura mais simples empregada em eletrônica de potência. Usa apenas um diodo, e isso o faz ter baixa eficiência. Recebe esse nome por permitir apenas a passagem de um semiciclo da tensão alternada. A Figura 10 mostra o circuito completo com as reatâncias do transformador, a resistência de condução do diodo e o capacitor não ideal.

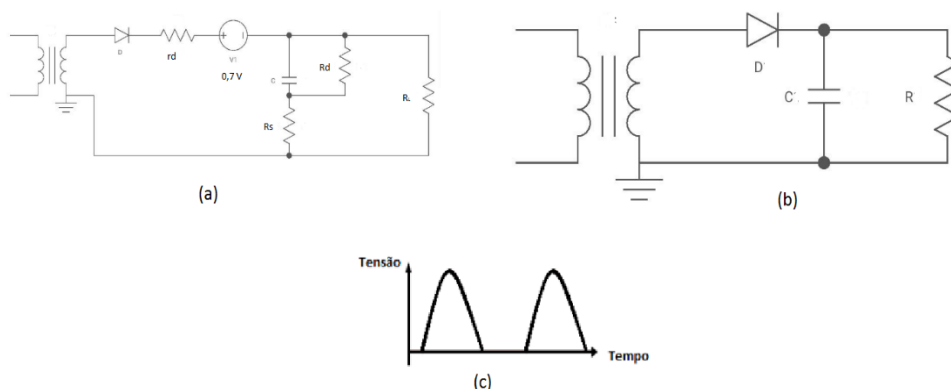


Figura 10 - (a) Circuito completo (com as perdas) do retificador em meia onda, contendo todos os elementos; (b) Retificador de meia onda simplificado; (c) Forma de onda senoidal retificada, adaptado de [8].

Após o recebimento da tensão alternada pelo transformador, o sinal senoidal passa pelo diodo, que conduz apenas um semiciclo (devido ao modo de funcionamento do mesmo), retificando todo o sinal no momento que atinge a tensão de operação no semiciclo de condução. Dessa forma, a orientação do diodo é importante para a polaridade do semiciclo retificado.

O capacitor carrega quando a tensão do transformador é maior que a tensão mínima de ondulação e descarrega durante o período em que o diodo não conduz [23].

3.2.

Retificação de onda completa

Acrescentando poucos componentes pode-se transformar um retificador de meia onda em onda completa, que aproveita ambos os semiciclos do sinal de entrada.

Com o retificador de onda completa podem-se utilizar capacitores de capacitância menor para a mesma ondulação na tensão de saída.

Há dois circuitos possíveis para o retificador de onda completa: derivação central e ponte, sendo que nesta dissertação será abordado somente o circuito com derivação central.

O funcionamento deste circuito é muito simples. Quando a tensão de entrada está no semiciclo positivo, o diodo que está diretamente polarizado conduz e passa este semiciclo para a carga. O diodo que está reversamente polarizado está aberto, e não passa corrente pela parte inferior do circuito. Quando o sinal de entrada se inverte, o diodo que no semiciclo anterior estava reversamente polarizado passa a ficar diretamente polarizado, assim a carga recebe a corrente. Deve-se observar que, ao contrário da retificação de meia onda, na qual em um dos semiciclos não há fluxo de corrente, no retificador de onda completa ambos os semiciclos são aproveitados e a carga recebe sempre a corrente no mesmo sentido [24].

A Figura 10 mostra a forma de onda na saída do retificador de onda completa.

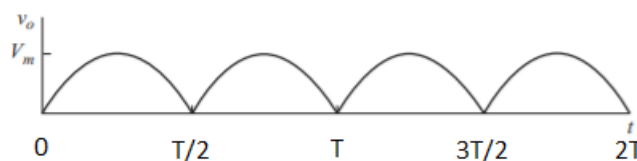


Figura 11 - Forma de onda na saída do retificador de onda completa, adaptado de [19].

No caso de onda completa a carga está sempre conectada com a tensão de entrada. Em ambos os casos apenas uma polaridade do sinal é aplicada à carga.

3.3.

Retificadores em Cascata (COCKROFT-WALTON)

Os circuitos retificadores configurados em cascata permitem que sejam alcançados níveis maiores de tensão com a utilização de componentes simples no circuito, com uma classe de isolamento mais baixa, sem a necessidade de elementos especialmente projetados. Com isso, o custo se torna mais acessível [25].

O retificador de meia onda em cascata do tipo Cockcroft-Walton é um multiplicador de tensão que converte energia elétrica CA ou CC pulsante de um

nível de baixa tensão para um nível mais elevado de tensão CC. É constituído por um multiplicador de tensão em rede de capacitores e diodos para gerar altas tensões. Usando apenas capacitores e diodos em cascata, esses multiplicadores são muito mais leves e mais baratos que os transformadores.

Outra vantagem da tensão do circuito multiplicador é o seu pico de tensão em cada estágio, que será o dobro. O circuito Cockcroft-Walton da Figura 12 permite a obtenção de tensão contínua com valor até o dobro do pico da tensão alternada de entrada.

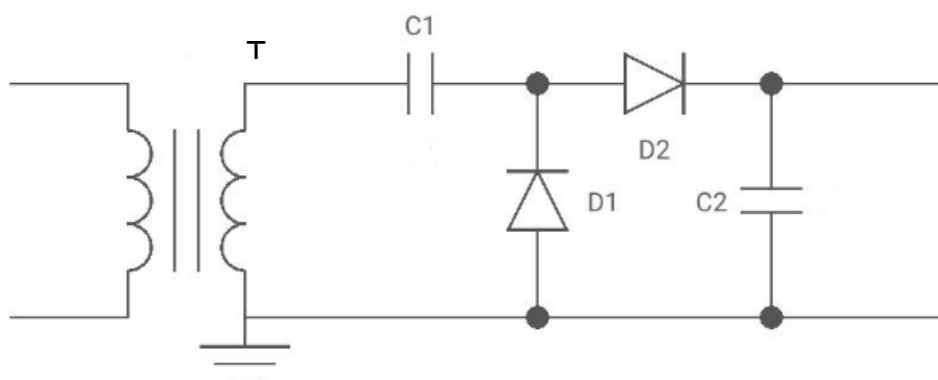


Figura 12 – Circuito do retificador em cascata Cockcroft-Walton.

Durante o semiciclo em que a tensão no terminal T do secundário do transformador é negativa, a corrente fluirá através do diodo D_1 , carregando o capacitor C_1 .

Devido à baixa impedância oferecida pelo diodo D_1 e à alta impedância oferecida pelo diodo D_2 , nenhuma corrente atinge a carga.

Durante o semiciclo seguinte, os diodos D_1 e D_2 invertem, ou seja, D_1 passa a oferecer alta impedância e o diodo D_2 passa a oferecer baixa impedância.

Consequentemente, a tensão do capacitor C_1 , somada com a tensão do secundário do transformador, é aplicada ao capacitor C_2 e à carga.

Portanto, no primeiro semiciclo, nenhuma tensão é aplicada à carga, mas no segundo semiciclo, duas vezes a tensão de entrada é aplicada à carga.

O capacitor C_2 atua como um reservatório que mantém a tensão aplicada na carga durante os semiciclos nos quais o capacitor D_1 está sendo carregado.

Portanto, a saída do multiplicador é igual $V_{\max} * N$, onde N é o número de estágios do multiplicador.

A tensão de ondulação do multiplicador pode ser calculada por [25]

$$VRIP = I(N2 + \frac{N}{2})/8FC \quad (11)$$

Onde:

F é a frequência;

C é a capacitância;

I é a corrente; e

N é o número de estágios do multiplicador.

A Figura 13 apresenta os retificadores em cascata (Cockcroft-Walton) do Cepel montados em uma configuração bifásica. Atualmente, esses retificadores são montados em módulos de 200 kV e 400 kV e esses módulos são superpostos até que a tensão de ensaio pretendida seja obtida [25].



Figura 13 – Retificadores em cascata (Cockcroft-Walton) do Cepel.

3.4.

Minuta da norma IEC 61083-4

A minuta da 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”) [8], prevista para publicação em 2021, cita os requisitos, parâmetros e os meios de verificação e/ou validação de software utilizado para ensaios em Alta Tensão em Corrente Alternada, Contínua e ensaios de Alta Corrente.

A validação do software será feita mediante o processamento de formas de onda padronizadas incluídas na minuta da norma [8], que serão utilizadas como entrada, comparando-se o resultado deste processamento, ou seja, os dados de saída, aos valores de referência indicados também na minuta, devendo estar dentro do intervalo de aceitação proposto para cada parâmetro. Essas formas de onda são divididas em 7 grupos, no total de 27 formas de onda. Dessas formas de onda, somente 3 são de tensão contínua e 2 de corrente contínua, utilizadas nesta dissertação.

Existe um software, intitulado TDG 61083-4 (Test Data Generator) e ilustrado na Figura 14, que foi desenvolvido para gerar as formas de onda padronizadas (virtuais) para a validação de software de acordo com a norma IEC 61083-4, assim que esta for publicada. A Figura 13 apresenta uma das interfaces do software TDG com o usuário, sendo que as formas de onda inseridas no mesmo ainda estão em fase de desenvolvimento e por enquanto não possuem os valores finais dos parâmetros que serão estabelecidos (informação fornecida pela equipe de desenvolvimento da IEC 61083-4). Estes dados digitais aproximam-se das características encontradas em digitalizadores que são utilizados em ensaios de alta tensão, considerando um intervalo de amostragem de 20 μ s, escolhido na tentativa de reproduzir as características dos digitalizadores normalmente utilizados em ensaios de alta tensão.

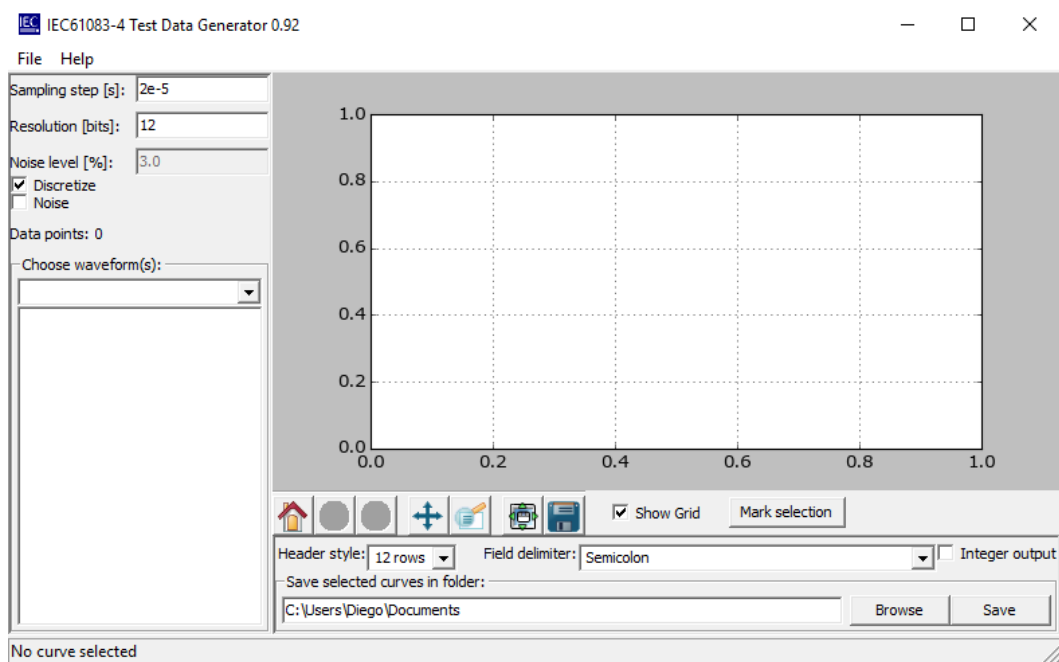


Figura 14 - Software desenvolvido para gerar as formas de onda padrão da norma IEC 61083-4.

Um software que venha a ser desenvolvido para utilização em ensaios de alta tensão alternada, contínua e corrente (incluídos nessa norma) deverá estar com os valores dos parâmetros analisados pela norma dentro de uma tolerância aceitável quando comparados aos valores de referência gerados pelo TDG, para ser considerado apto.

4.

Instrumento Virtual para Avaliação dos Parâmetros de Ensaio ATCC

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 [9].

Atualmente, tem-se presenciado uma evolução tecnológica. O computador é um dos melhores exemplos desta evolução, com seu desenvolvimento significativo, o que se reflete na instrumentação aplicada e na automação de processos. Desta evolução surge o conceito de instrumentação virtual, associado a um conjunto de benefícios direcionados aos seus utilizadores. Instrumentos tradicionais como os multímetros, osciloscópios, geradores de sinal, entre outros, veem na instrumentação virtual características de expansão na sua utilização, ultrapassando alguns limites em relação aos quais foram fabricados. Sendo equipamentos com custos significativamente elevados e concebidos pelos fabricantes de modo a desempenhar funções específicas, tornam-se complexos de adaptar a outras funções que possam surgir, limitando a sua utilização. O seu desenvolvimento passa por instrumentos de programação adaptáveis, com uma aquisição flexível que, associada a um computador, possa desempenhar de forma mais eficaz as antigas funções das instrumentações tradicionais. Tendo como base o computador, os instrumentos virtuais possuem os mais recentes recursos no que diz respeito às tecnologias incorporadas nos mesmos. Ferramentas como a Internet aumentam o desempenho destes instrumentos, tornando-os sistemas computacionais mais poderosos [26].

Existe ainda outra vantagem, que é a possibilidade de se tornarem portáteis, facilitando muitas vezes sua utilização. A sua aplicação à experimentação veio reduzir custos, com a possível substituição de instrumentos de medição mais

complexos para bancadas de ensaios experimentais, podendo um utilizador capacitado criar e gerir os seus próprios instrumentos, alterando-os segundo a sua necessidade de trabalho.

Portanto, nesta dissertação os dados dos ensaios em ATCC são adquiridos e processados em formato digital mediante algoritmos associados a registradores digitais de dados. A International Electrotechnical Commission (IEC) está desenvolvendo a norma [8], atualmente em fase final de publicação. Esta norma terá o objetivo principal de garantir que o instrumento virtual utilizado esteja validado e possua exatidão nas medições dos parâmetros de ensaios em ATCC e ATCA.

4.1.

Instrumentação Virtual

A combinação entre computador, dispositivos de aquisição de dados e software concebido para uma determinada aplicação define o conceito de instrumentação virtual. A relação entre o hardware e o software torna possível ao operador atuar e controlar o sistema através apenas de uma interface gráfica proporcionada pelo software. Esta interface é composta por gráficos, mostradores, botões, displays, etc. O software pode não só realizar a leitura de parâmetros diretos, como indiretos. O conceito de instrumentação virtual consiste na criação de um software que incorpore instrumentos tradicionais, onde possam ser geridos recursos e aplicativos. De uma forma genérica, os instrumentos virtuais reúnem os seguintes elementos: computador, placa de aquisição de dados, sensores e software desenvolvido para a instrumentação [27].

4.2.

Dispositivos de Aquisição de Dados

O hardware associado a um instrumento virtual é dividido em duas classes: equipamento de aquisição de dados e dispositivos de controle de instrumentos. Os equipamentos destinados à aquisição de dados promovem a ligação entre o computador e o ambiente de aplicação, sendo em sua maioria placas de aquisição

de dados, que se destinam a realizar o processamento de dados provenientes de sensores. O controle de instrumentos é realizado por meio da interface gráfica oferecida ao utilizador. Esta se comunica com placas de processamentos de dados, que injetam informação no lugar desejado. Nessa dissertação foi utilizado o controle de instrumentos via USB/GPIB.

4.3.

Algoritmo de controle em LabVIEW

O algoritmo de medição foi desenvolvido em uma plataforma de desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados e controle de instrumentos denominada LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), desenvolvido pela National Instruments (NI), com linguagem de programação G.

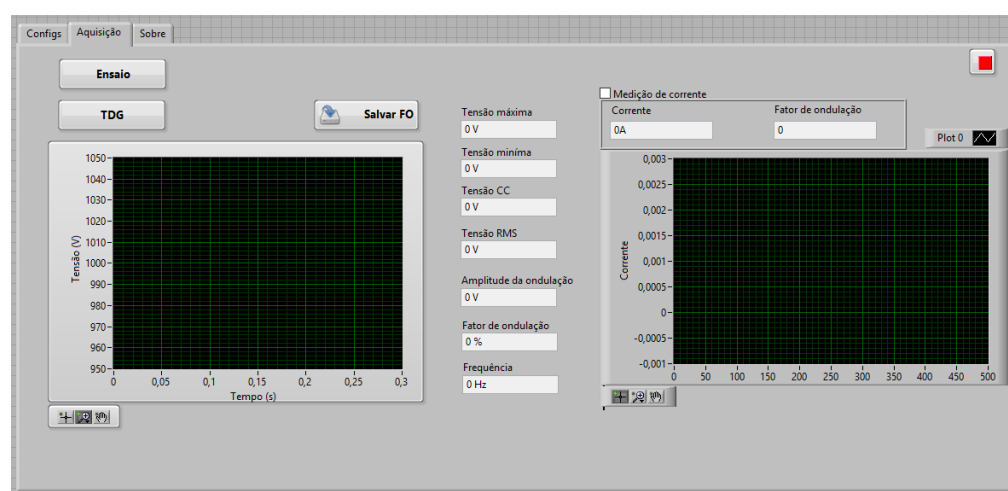
O LabVIEW é compatível com diversos protocolos de comunicação e interfaces, além de possuir recursos internos para a conexão à Internet. Nesta dissertação foi utilizada a interface GPIB para conexão com os instrumentos de bancada, conforme mencionado na seção anterior.

O software (Figura 15) controla e analisa os parâmetros dos ensaios em ATCC por multímetros Agilent e/ou Hewlett-Packard (HP), modelo 3458A, com resolução de 8½ dígitos. O software foi desenvolvido com o principal objetivo de implementar o monitoramento do nível de *ripple* nas calibrações segundo as normas [6] e [7], dando subsídios ao laboratório de calibração em alta tensão do Cepel (CA2), gerando uma economia em relação à aquisição de um equipamento específico para essa medição.

O software foi validado baseado em ensaios experimentais, a partir da comparação dos valores medidos pelo software e os medidos por um instrumento de referência do laboratório. Isto ocorreu porque as formas de onda com parâmetros normalizados para ATCC ainda não foram finalizadas e validadas até a última versão do rascunho da norma (atualmente).



(a)



(b)

Figura 15 – Interface do Instrumento Virtual (a) Configuração remota dos multímetros, (b) Aquisição de dados.

Assim, para a validação do algoritmo de processamento do sinal, foram realizados ensaios experimentais, avaliando os parâmetros: tensão média, amplitude de ondulação e fator de ondulação. Utilizou-se um gerador de funções, uma fonte de alta tensão e um instrumento de referência que atende aos requisitos e está disponível no CA2 (um voltímetro de crista DMI551), a fim de verificar se o instrumento virtual realiza medições com valores compatíveis com o instrumento de referência. Os ensaios experimentais foram divididos em duas partes:

- Baixa tensão (BT) – Verificação em baixa tensão, com o auxílio de um gerador de funções; e
- Alta tensão (AT) – Ensaio de verificação em alta tensão, utilizando uma fonte de alta tensão.

As tolerâncias para os parâmetros medidos nesses ensaios estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Tolerância para ensaios em sistemas de medição aprovados.

Parâmetros da tensão de ensaio	Duração do Ensaio	Tolerância	Incerteza de Medição
Valor da tensão de ensaio	≤ 60 s	± 1 %	≤ 3 %
	> 60 s	± 3 %	
Amplitude de <i>ripple</i>	-	-	≤ 10 %
Fator de <i>ripple</i>	-	$\leq 3\%$	-

4.4.

Ensaaios experimentais

Conforme mencionado na seção anterior, os experimentos foram realizados com a finalidade de validar o instrumento virtual (composto pelos VIs que processam, calculam e tratam os dados) e avaliar a tensão, amplitude de ondulação e fator ondulação na calibração.

O Instrumento Virtual possui uma interface de Configuração, apresentada na Figura 15(a), que permite que o usuário ajuste adequadamente as configurações do multímetro, que deverá estar conectado ao computador por intermédio de um cabo conversor GPIB-USB, visando adquirir o sinal de tensão proveniente do ensaio realizado. A forma de onda adquirida é visualizada na tela do computador, assim como os parâmetros pré-estabelecidos pela norma.

Os ensaios experimentais foram divididos em 3 etapas, para a aquisição e comparação dos valores obtidos utilizando os VIs com outros instrumentos:

- Primeira etapa: Ensaio com TDG, onde foram comparados os valores de referência (nominal) da norma [8] com os parâmetros estimados pelos VIs, como resultado do processamento dos dados digitais do TDG nas 5 formas de onda disponíveis atualmente para tensão em corrente contínua e corrente contínua.
- Segunda etapa: Ensaio em baixa tensão (BT), com auxílio do gerador de função Tektronix AFG 3022B, utilizado como fonte (até 5 V), e um voltímetro de crista Haefely DMI551 (Figura 16) como

instrumento de medição de referência. Este experimento teve como objetivo provocar níveis de ondulação conhecidos para comparação do DMI551 com o algoritmo.



Figura 16 – Voltímetro de Crista DMI 551.

- Terceira etapa: Foi feita a calibração em alta tensão (AT), cujo objetivo foi avaliar o comportamento do algoritmo como um todo, nas condições reais de uso no laboratório de alta tensão (CA2), além do estudo da influência do *ripple* em níveis (provocados com a adição de carga) que ultrapassassem o limite estabelecido pela norma. Foi realizada a determinação do Fator de Escala em alta tensão com os dispositivos de conversão disponíveis no laboratório e pelo algoritmo desenvolvido neste trabalho, avaliou-se a linearidade nos 5 níveis de tensão calibrados, além das incertezas de calibração. Nessa etapa, pode-se medir a corrente, se desejável pelo usuário.
- A Figura 17 mostra os equipamentos na sala de controle para esse tipo de medição (ATCC).

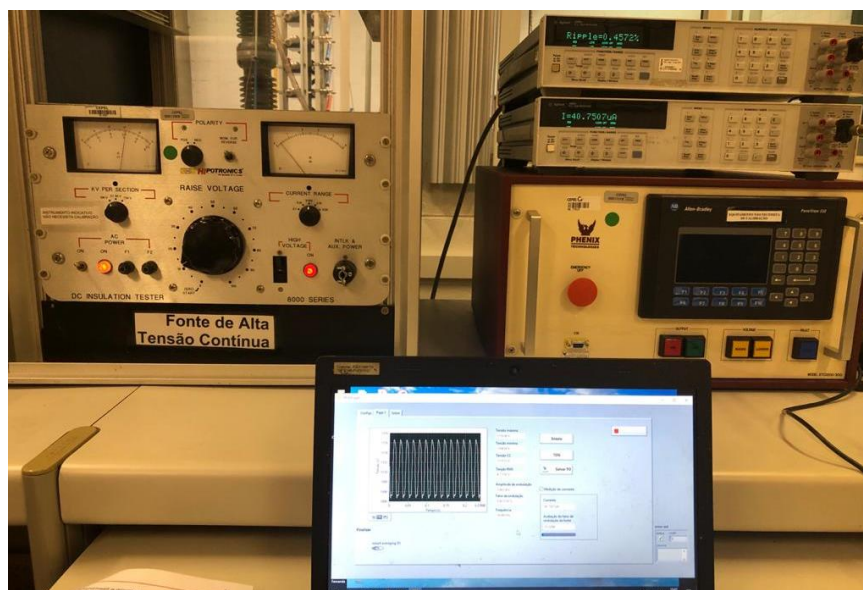


Figura 17 - Instrumentos utilizados na sala de controle para calibração ATCC.

4.4.1.

Ensaio com TDG

Foram obtidas formas de onda preliminares, geradas pelo software TDG e fornecidas pelo grupo de pesquisa que desenvolve a norma, porém ainda não existe uma versão final. A Figura 18 mostra um exemplo de forma de onda com ondulação, obtida no software da norma.

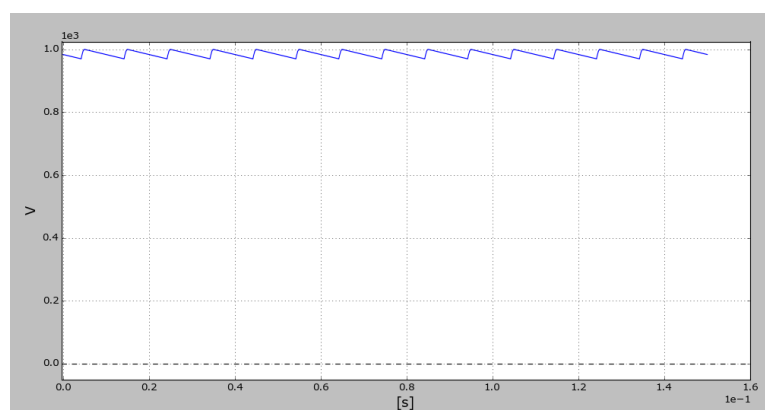


Figura 18 - Última versão apresentada pelos desenvolvedores da norma IEC 61083-4 para corrente contínua com ondulação.

O sistema em LabVIEW conseguiu reproduzir a forma de onda da versão anterior do TDG, com as mesmas características visuais (mesma forma de onda) que foram reproduzidas em Python pelo TDG (Figura 19), mas o mesmo não estima os parâmetros de interesse, o que dificulta a validação utilizando-o.

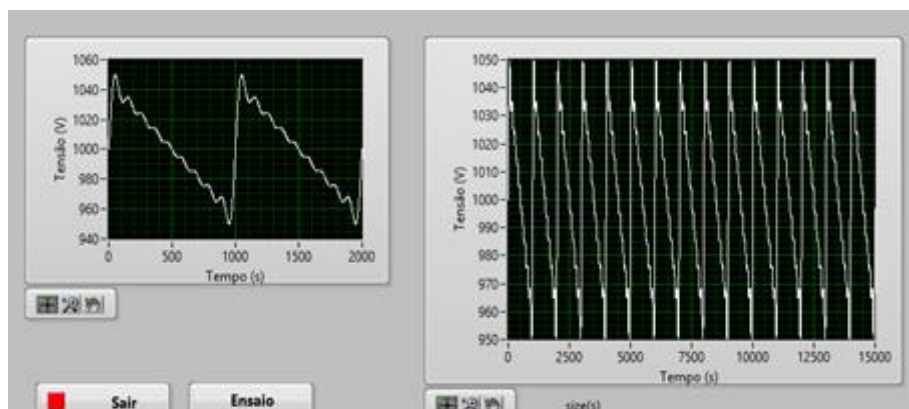


Figura 19 – Última versão disponível em arquivo .txt pela minuta da norma.

A última versão adquirida é a da Figura 17, porém desde 2011 não existe alteração na minuta e essa forma de onda ainda não está incluída na última versão, então não foi possível adquirir um arquivo .txt desta última versão do TDG, impossibilitando a comparação com os valores teóricos da minuta da norma, uma vez que o TDG não mede os parâmetros solicitados pela norma ABNT NBR 60060-1 e 2, e os valores teóricos do rascunho ainda não foram obtidos pelos desenvolvedores (em forma de onda). Conforme pode ser observado na Figura 17, a tensão máxima está em 1 kV, sendo que teoricamente a tensão máxima deveria ser 1030 V e a tensão mínima 970 V para atingir os 3 % teóricos.

Essa última versão disponível claramente não se trata de um *ripple* convencional, devido à presença de uma oscilação de alta frequência dentro de cada período.

4.4.2.

Verificação em baixa tensão (BT)

O software foi utilizado para estimar os parâmetros em baixa tensão em corrente contínua (BTCC), com o gerador de funções programado para gerar vários níveis de ondulação (1 %, 2 %, 3 % e 5 %) em 120 Hz, com uma tensão contínua de 5 V. As comparações foram feitas com a ajuda de um voltímetro de crista (limitado a um certo nível de tensão de entrada).

A Tabela 5 mostra a média das diferenças percentuais, conforme equação (12), de amplitudes da ondulação e diferença de fator de ondulação encontradas para 10 medições, que já são suficientes para obter informações sobre a média e o desvio padrão da medida, conforme pré-estabelecido pela norma, em cada nível de ondulação (1 %, 2 %, 3 % e 5 %) em baixa tensão (5 V). (Anexo)

$$\text{Diferença} = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor referência}}{\text{Valor referência}} * 100 \quad (12)$$

Tabela 5 - Diferenças encontradas em baixa tensão entre o instrumento de referência, voltímetro de crista, e o Instrumento Virtual usando um gerador de funções. (Anexo)

Nível de ondulação		1 %	2 %	3 %	5 %
Instrumento de Referência	Amplitude de ondulação (V)	0,048	0,097	0,147	0,244
	Fator de ondulação (%)	0,977	1,982	3,024	5,115
Instrumento virtual	Amplitude de ondulação (V)	0,049	0,099	0,148	0,247
	Fator de ondulação (%)	1,000	2,018	3,055	5,200
Diferença	Amplitude de ondulação (%)	2,083	2,062	0,680	1,230
	Fator de ondulação (%)	0,022	0,035	0,031	0,085

Por se tratar de um gerador de funções, o operador define o nível de tensão e de *ripple* e, após as medições, mantendo 5 níveis de tensão para cada nível de *ripple* e os níveis de *ripple* em 1 %, 2 %, 3 % e 5 %, a incerteza padrão manteve-se constante nos diferentes casos, conforme Figura 20.

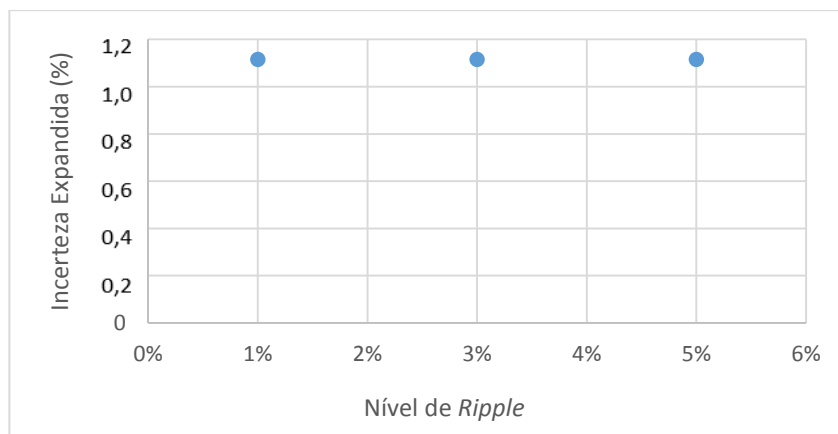


Figura 20 - Resultado da incerteza expandida das medições em baixa tensão em diferentes níveis de tensão.

4.4.3.

Ensaio em Alta tensão em Corrente Contínua

O ensaio em alta tensão foi realizado até 4 kV para que não fosse necessária a utilização de um atenuador para o DMI, e evitar uma possível alteração na medição do *ripple*, adicionando carga ao sistema, ou seja, modificando a sua reatância final, em comparação ao software. Mesmo o *ripple* sendo dado pela fonte, se esta enxergar cargas distintas, o sistema de medição pode medir parâmetros distintos, podendo vir a influenciar no *ripple*. A Tabela 6 mostra a média das diferenças encontradas em alta tensão para diferentes níveis de tensão.

Tabela 6 - Diferenças encontradas em alta tensão entre o instrumento de referência e o software utilizando uma fonte de alta tensão em corrente contínua e um divisor de tensão. (Anexo)

Nível de tensão		2 kV	3 kV	4 kV	- 2 kV	- 3 kV
Instrumento de Referência	Amplitude de ondulação (V)	0,020	0,031	0,043	0,020	0,031
	Fator de ondulação (%)	3,000	3,027	3,133	3,012	3,017
Instrumento virtual	Amplitude de ondulação (V)	0,020	0,031	0,042	0,020	0,031
	Fator de ondulação (%)	3,086	3,095	3,117	3,085	3,095
Diferença	Amplitude de ondulação (%)	0,000	0,000	-2,325	0,000	0,000

	Fator de ondulação (%)	0,087	0,068	-0,016	0,073	0,078
--	---------------------------------------	-------	-------	--------	-------	-------

4.5.

Incerteza de medição

As incertezas de medição obtidas nos ensaios foram abaixo de 2 %, sendo que deve-se levar em consideração que a quantidade de dígitos do instrumento de referência e do software em análise são diferentes e isso tem grande contribuição na incerteza final. Enquanto o voltímetro de crista apresenta até a terceira casa decimal, o multímetro 3458A tem resolução de 8½ dígitos.

A Tabela 7 apresenta as fontes de incerteza utilizadas nos cálculos, e a Tabela 8 mostra as incertezas entre as diferenças observadas no instrumento de referência e o Instrumento Virtual desenvolvido em LabVIEW.

Tabela 7 - Fontes utilizadas no cálculo de incerteza para validação do instrumento virtual. (Anexo)

Fonte de incerteza	Estimativa (%)	Distribuição de Probabilidade	vi	Fator divisor	Coefficiente de sensibilidade
Resolução do 3458A (10 V)	X1	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1
Desvio padrão DMI	X2	Normal	9	$\sqrt{10}$	1
Desvio padrão do software	X3	Normal	9	$\sqrt{10}$	1
Resolução do DMI	X4	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1
Exatidão do DMI	X5	Retangular	∞	$\sqrt{3}$	1
Incerteza do SMR7	X6	Retangular	∞	2	1
Incerteza do multímetro	X7	Retangular	∞	2	1

O fator de abrangência k foi obtido por meio de um número de graus de liberdade efetivos maior que 100, de acordo com a tabela t-Student, para o nível de

confiança de 95,45 %. A Tabela 8 apresenta as incertezas associadas à aquisição do multímetro controlado por um instrumento virtual, para cada nível de tensão para as amplitudes da ondulação e fatores de ondulação.

Tabela 8 - Incerteza expandida da amplitude e fator de ondulação para cada nível de tensão.

(Anexo)

Tensão aplicada (kV)	Amplitude da ondulação	Incerteza de Medição (%)	k	Fator de ondulação	Incerteza de Medição (%)	k
2	0,020	1,7	2,00	3,086	1,5	2,00
3	0,031	1,9		2,301	1,6	
4	0,042	2,2		3,117	2,5	
-2	0,020	1,5		3,085	1,1	
-3	0,031	1,5		3,095	1,2	

5.

Influência da ondulação (*ripple*) na calibração em ATCC

Neste capítulo serão descritas como foram feitas as calibrações e as análises realizadas nos dados obtidos, além dos resultados e dos conceitos abordados para a conclusão se a ondulação influencia ou não na calibração, caso seja ultrapassado o limite estabelecido pela norma [7].

5.1.

Planilha de aquisição

Uma planilha existente no laboratório CA2 foi adaptada para esse tipo de calibração, gerando uma redução no tempo gasto e maior confiabilidade, uma vez que elimina a chance de cálculo errado de médias e incertezas, e gera os registros na formatação adequada exigida pela Garantia da Qualidade [28]. A Figura 20 mostra a aba de aquisição (a) e das fontes de incerteza calculadas para FE (b) e para os parâmetros relacionados ao *ripple*.

Avaliação da linearidade								
1º Nível	Ordem	Tensão sugerida			0	Fator de		kV
		Vsmr	Fator de	Amplitude de	Vsma	Ripple SMR	Amplitude de	FE
		V	Ripple SMR	ripple SMR	V	Ripple SMA	ripple SMA	VR/VL
	1			0				#DIV/0!
	2			0				#DIV/0!
	3			0				#DIV/0!
	4			0				#DIV/0!
	5			0				#DIV/0!
	6			0				#DIV/0!
	7			0				#DIV/0!
	8			0				#DIV/0!
	9			0				#DIV/0!
	10			0				#DIV/0!
Média:		#DIV/0!	#DIV/0!		Média:	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
$\sigma (n-1)$:		#DIV/0!	#DIV/0!		$\sigma (n-1)$:	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

(a)

Figura 20 – Planilha adaptada para os ensaios em alta tensão em corrente contínua (a) Aba “Linearidade (Polaridade positiva)”; (b) Aba “Incerteza da amplitude” fontes que compõem a incerteza do fator de escala; (c) Fontes para cálculo de incerteza dos parâmetros em estudo na dissertação.

Mensurando	Fontes de Incerteza	Estimativa de Entrada (%)	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão (%)
Calibração de ATCC De kV a kV e de - kV a - kV	Incerteza do SMR	0,00E+00	NORMAL	∞	0	1	0,00E+00
	Desvio padrão experimental	0,00E+00	NORMAL	9	√10	1	0,00E+00
	Instrumento do sistema sob calibração	0,00E+00	NORMAL	0	0	1	0,00E+00
	Resolução do SMR	0,00E+00	RETANGULAR	∞	√12	1	0,00E+00
	Resolução do sistema sob calibração	0,00E+00	RETANGULAR	∞	√12	1	0,00E+00
	Comportamento dinâmico do sistema sob calibração	0,00E+00	RETANGULAR	∞	√3	1	0,00E+00
	Estabilidade do SMR	0,00E+00	RETANGULAR	∞	√2	1	0,00E+00
	Estabilidade do sistema sob calibração	0,00E+00	RETANGULAR	∞	√3	1	0,00E+00
	Linearidade do SMR	0,00E+00	RETANGULAR	∞	√3	1	0,00E+00
	Linearidade do sistema sob calibração	0,00E+00	RETANGULAR	∞	√3	1	0,00E+00
FE definido		Incerteza combinada (%)					0,000000000
#VALOR!		Incerteza Expandida (%)					0,00000000
V_{eff}		∞		k=		2,00	

(b)

Fontes de Incerteza	Estimativa de Entrada (%)	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão (%)
Desvio padrão experimental (Fator de ripple)	0,00E+00	NORMAL	9	√10	1	0,00E+00
Desvio padrão experimental (Âmplitude de ripple)	0,00E+00	NORMAL	9	√10	1	0,00E+00

(c)

Figura 21 (cont.) – Planilha adaptada para os ensaios em alta tensão em corrente contínua (a) Aba “Linearidade (Polaridade positiva)”; (b) Aba “Incerteza da amplitude” fontes que compõem a incerteza do fator de escala; (c) Fontes para cálculo de incerteza dos parâmetros em estudo na dissertação.

5.2.

Ensaio de linearidade

O ensaio de linearidade é destinado a proporcionar uma extensão da validade do fator de escala a partir da tensão máxima em que a calibração foi realizada, até o limite superior da faixa de medição realizada [7].

A saída do sistema de medição (objeto sob calibração) deve ser comparada com um dispositivo ou sistema que tenha sua linearidade já comprovada (sistema de medição de referência) ou que possa se presumir que seja linear em toda a faixa de tensão. O valor da dispersão em relação à média não deve ultrapassar 1 %, conforme estabelecido por norma [7]. A avaliação da linearidade é baseada no desvio máximo do FE, em cada nível de tensão, em relação à média final de todos os níveis.

Baseando-se no procedimento do CA2, o qual foi utilizado na presente dissertação, o desvio R_g é o maior desvio dentre 10 ensaios para cada nível de tensão

(b), havendo 5 níveis. O desvio máximo é tomado como uma estimativa do tipo B da incerteza padrão relacionada com a não linearidade do fator de escala na faixa estendida de tensão, conforme equação (13).

$$u_{B1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^b \left| \frac{R_g}{R_m} - 1 \right| \quad (13)$$

Onde:

- u_{B1} – incerteza padrão tipo B causada pela não linearidade do fator de escala na faixa estendida de tensão, sendo “B1” uma nomenclatura usada na norma 60060;
- R_g – Relação em cada nível de tensão;
- R_m – Relação média;
- b – Quantidade de níveis de tensão no teste de linearidade.

A Figura 22 esquematiza um ensaio de linearidade do sistema de medição com um dispositivo linear na faixa estendida de tensão [7].

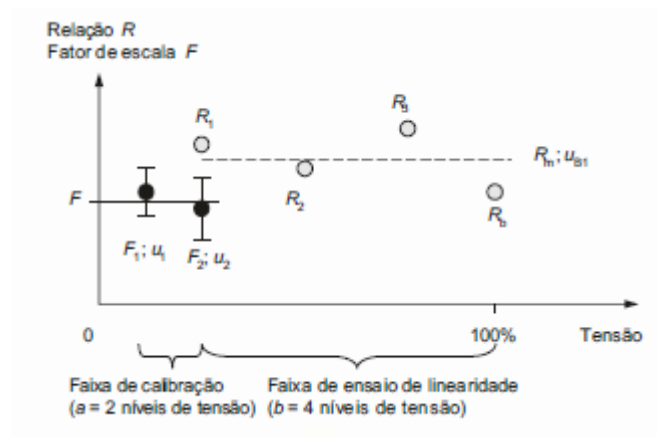


Figura 22 - Incerteza expandida relacionada com a não linearidade do Fator de Escala [7].

Onde:

- F_1, F_2 – Fatores de escalas determinados por calibração com o divisor de referência na faixa de calibração;
- u_1, u_2 – Incertezas padrão dos fatores de escala F_1 e F_2 ;
- F – Média de F_1 e F_2 ;

- $R_1...R_b$ – Relações determinadas dentro da faixa de tensão prolongada somente para teste de linearidade;
- R_m – Média das relações determinadas com um dispositivo linear dentro da faixa de tensão prolongada;
- u_{B1} – Incerteza padrão do tipo B causado pela não linearidade do fator de escala na faixa de tensão prolongada.

O ensaio de Linearidade foi realizado em 5 níveis de tensão e no valor de 20 % da tensão de operação até 100 % da tensão de operação, com 3 níveis de *ripple* diferentes, com divisores de diferentes formas construtivas e de igual forma construtiva, conforme apresentado nas Figuras 23 a 30. Apenas no nível de 1 % em cada um dos casos foi utilizada a fonte CC padrão do laboratório, e nos outros dois níveis foi utilizada uma fonte CA com retificação, para que pudessem ser alcançados os níveis desejados de *ripple*.

A Figura 23 é o arranjo de calibração utilizando dois divisores resistivos.



Figura 23 - Arranjo de calibração para ATCC com dois divisores resistivos.

Este arranjo foi submetido a diferentes níveis de *ripple*, sendo aplicados os mesmos níveis de tensão, e a linearidade apresentou um desvio padrão em relação à média inferior a 1 %, conforme as Figuras 24, 25 e 26.

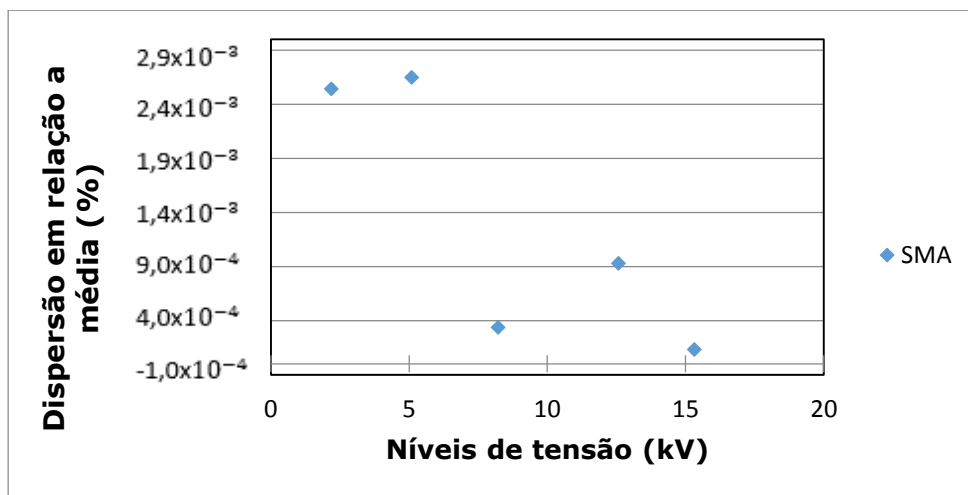


Figura 24 - Linearidade com *ripple* em 1 %, usando divisor (SMR) resistivo e objeto sob calibração resistivo.

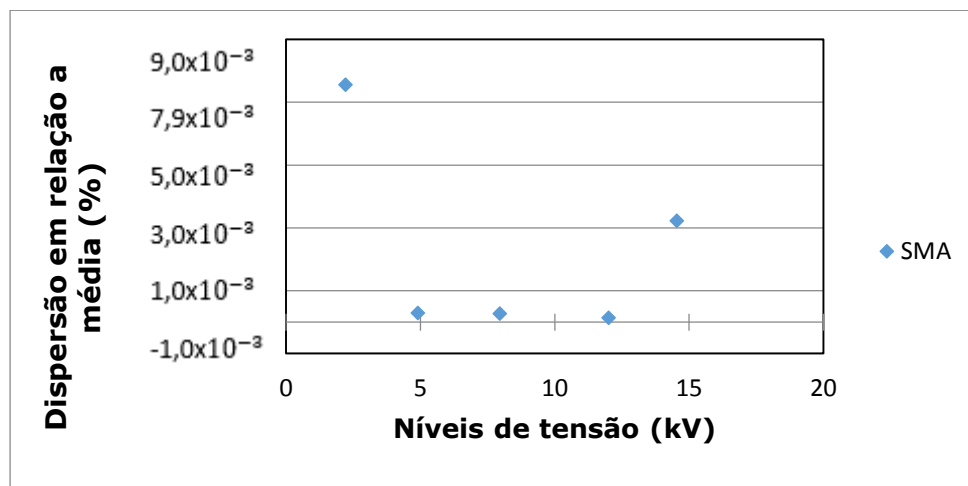


Figura 25 - Linearidade com *ripple* em 3 %, usando divisor (SMR) resistivo e objeto sob calibração resistivo.

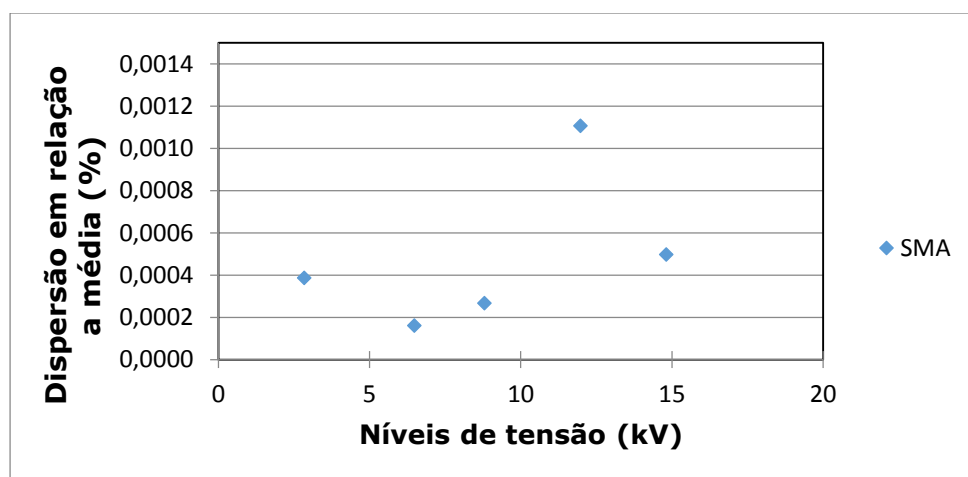


Figura 26 - Linearidade com *ripple* em 6 %, usando divisor (SMR) resistivo e objeto sob calibração resistivo.

Pode-se concluir que o nível de *ripple* não influenciou na linearidade do sistema, sendo os três níveis: um abaixo do valor pré-estabelecido pela norma ($< 3\%$), um igual ao nível; e outro superior. Não se observou uma variação linear do desvio padrão com o nível de *ripple*.

Nas Figuras 27 a 29 foram utilizados um divisor universal e um resistivo, para os diferentes níveis de *ripple*, sendo aplicados os mesmos níveis de tensão. Novamente, a linearidade apresentou um desvio padrão em relação à média inferior a 1 %.

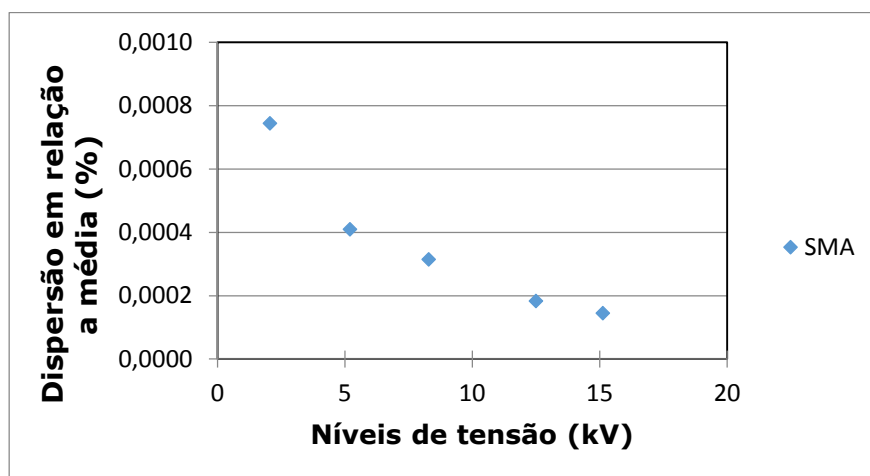


Figura 27 - Linearidade com *ripple* em 1 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração resistivo.

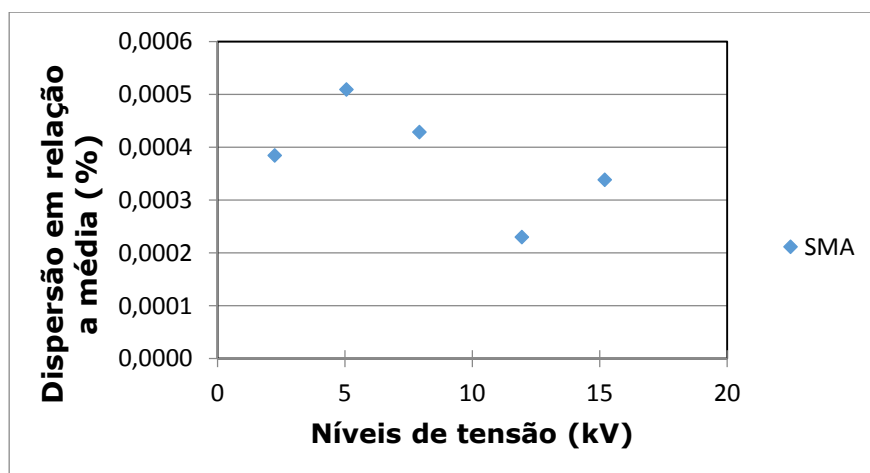


Figura 28 - Linearidade com *ripple* em 3 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração resistivo.

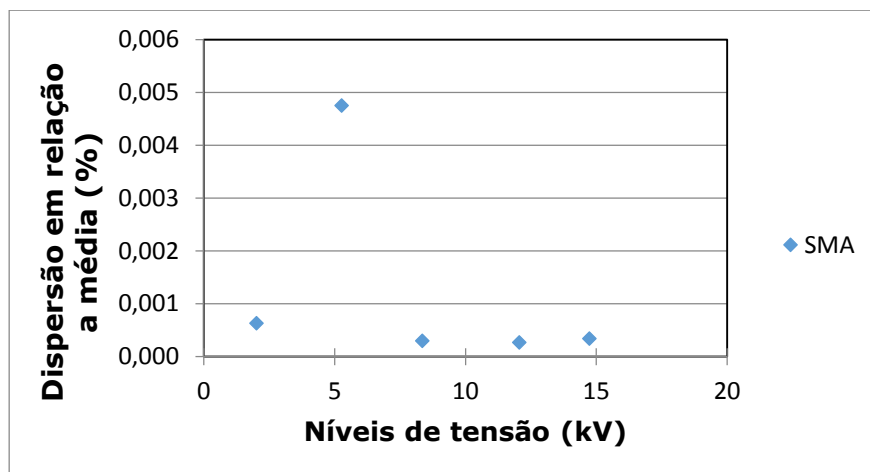


Figura 29 - Linearidade com *ripple* em 6 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração resistivo.

Novamente, o nível de *ripple* não influenciou na linearidade do sistema, sendo os três níveis: um abaixo do valor pré-estabelecido pela norma ($< 3\%$), um igual ao nível normalizado, e outro superior. Novamente, não se observou uma variação linear do desvio padrão linear com o nível de *ripple*.

Nas Figuras 30 a 32 foram utilizados dois divisores universais, para os diferentes níveis de *ripple*, sendo aplicados os mesmos níveis de tensão, e novamente a linearidade apresentou um desvio padrão em relação à média inferior a 1 %.

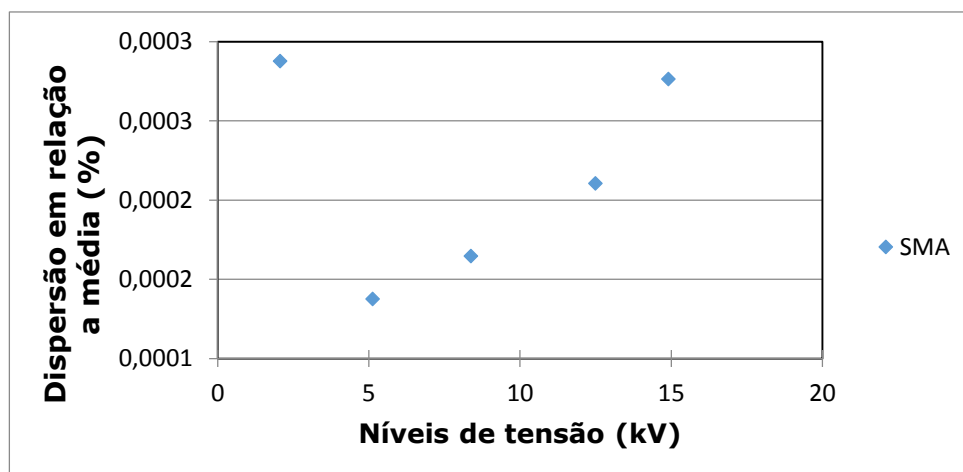


Figura 30 - Linearidade com *ripple* em 1 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração universal.

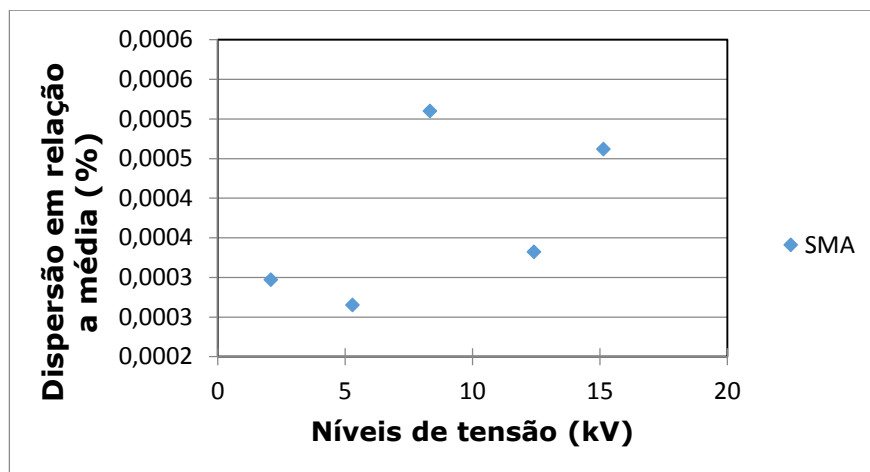


Figura 31 - Linearidade com *ripple* em 3 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração universal.

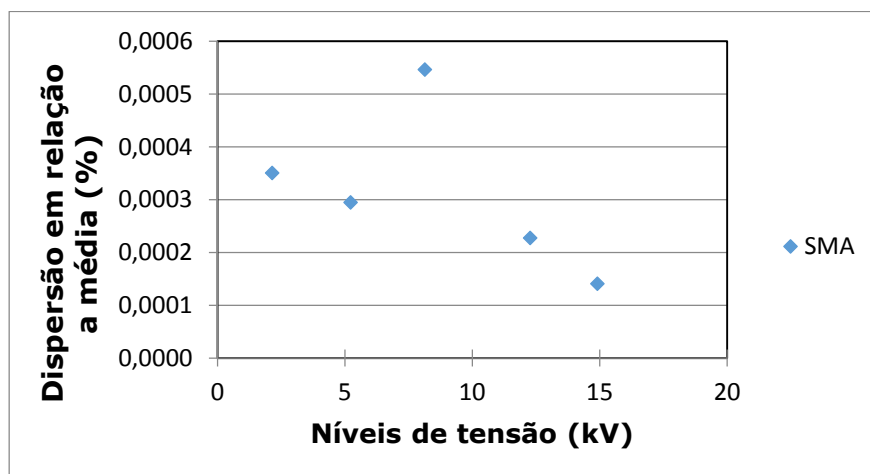


Figura 32 - Linearidade com *ripple* em 6 %, usando divisor (SMR) universal e objeto sob calibração universal.

Mais uma vez, o nível de *ripple* não influenciou na linearidade do sistema, sendo os três níveis: um abaixo do valor pré-estabelecido pela norma ($< 3\%$); um igual ao nível normalizado; e outro superior, novamente não seguindo uma variação linear do desvio padrão com o nível de *ripple*.

5.3.

Calibração

A calibração foi realizada por comparação em toda a faixa de medição atribuída ao SMR7, ou seja, na faixa de 2 kV a 15 kV, e para uma melhor comparação se haveria uma influência, mantiveram-se os mesmos níveis de tensão na comparação com outros arranjos. Por meio dessa comparação, obtiveram-se as médias de 10 aplicações em cada nível de medição.

A Tabela 9 apresenta a média de 10 ensaios com arranjo com fonte CA e retificação e SMR Universal e objeto resistivo, com 3 % de *ripple*.

Tabela 9 - Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de construção diferente (Universal com Resistivo) e fonte CA com retificação (fator de *ripple* em 3 %).

V_{SMR} (kV)	Fator de <i>ripple</i> SMR (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMR (V)	V_{SMA} (V)	Fator de <i>ripple</i> SMA (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMA (mV)	FE
2	2,74	0,06	0,76	3,4	25,7	2963
5	2,73	0,14	1,70	3,4	57,6	2980
8	2,72	0,21	2,65	3,4	90,6	2985
12	2,72	0,32	4,02	3,4	136,6	2977
15	2,72	0,41	5,10	3,4	174,2	2988

A Tabela 10 apresenta a média de 10 ensaios com arranjo com fonte CA e retificação e SMR Universal e objeto resistivo com 5 % de *ripple*.

Tabela 10 - Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de construção diferente (Universal com Resistivo) e fonte CA com retificação (fator de *ripple* em 5 %).

V_{SMR} (kV)	Fator de <i>ripple</i> SMR (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMR (V)	V_{SMA} (V)	Fator de <i>ripple</i> SMA (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMA (mV)	FE
2	4,97	0,10	0,68	6,24	41,96	2996
5	4,94	0,26	1,77	6,16	108,9	2986
8	4,94	0,41	2,80	6,10	171,3	2980
12	4,91	0,59	4,02	6,14	247,4	2998
15	4,89	0,72	4,92	6,09	300,2	2992

A Tabela 11 apresenta a média de 10 ensaios com arranjo com fonte CA e retificação e SMR resistivo e objeto resistivo, com 3 % de *ripple*.

Tabela 11 - Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesma construção (Resistivo com Resistivo) e fonte CA com retificação (fator de *ripple* em 3 %).

V_{SMR} (kV)	Fator de <i>ripple</i> SMR (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMR (V)	V_{SMA} (V)	Fator de <i>ripple</i> SMA (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMA (mV)	FE
2	3,3	0,025	0,76	3,4	25,92	2918
5	3,3	0,05	1,7	3,3	56,8	2925
8	3,3	0,091	2,7	3,4	93,2	2919
12	3,3	0,13	4,1	3,4	138,6	2924
15	3,3	0,16	5	3,4	167,5	2913

A Tabela 12 apresenta a média de 10 ensaios com arranjo com fonte CA e retificação e SMR resistivo e objeto resistivo, com 6 % de *ripple*.

Tabela 12 - Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesma construção (Resistivo com Resistivo) e fonte CA com retificação (fator de *ripple* em 6 %).

V_{SMR} (kV)	Fator de <i>ripple</i> SMR (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMR (V)	V_{SMA} (V)	Fator de <i>ripple</i> SMA (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMA (mV)	FE
2	5,99	0,06	0,985	5,99	59,04	2886
5	6,03	0,13	2,23	6,04	135,1	2901
8	6,03	0,18	3,02	6,08	184,2	2907
12	6,02	0,24	4,11	6,07	249,2	2918
15	6,02	0,30	5,07	6,04	306,4	2921

A Tabela 13 apresenta a média de 10 ensaios com arranjo com fonte CA e retificação e SMR universal e objeto universal, com 3 % de *ripple*.

Tabela 13 - Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesmo tipo construtivo (Universal com universal) e fonte CA com retificação (fator de *ripple* em 3 %).

V_{SMR} (kV)	Fator de <i>ripple</i> SMR (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMR (V)	V_{SMA} (V)	Fator de <i>ripple</i> SMA (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMA (mV)	FE
2	2,56	0,053	1,33	0,09	131,8	1567
5	2,56	0,13	3,38	0,10	337,8	1564
8	2,56	0,21	5,33	0,10	538,4	1565
12	2,55	0,31	7,89	0,10	803	1574
15	2,56	0,38	9,63	0,10	969,1	1570

A Tabela 14 apresenta a média de 10 ensaios com arranjo com fonte CA e retificação e SMR universal e objeto universal, com 5 % de *ripple*.

Tabela 14 – Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesmo tipo construtivo (Universal com universal) e fonte CA com retificação (fator de *ripple* em 5 %).

V_{SMR} (kV)	Fator de <i>ripple</i> SMR (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMR (V)	V_{SMA} (V)	Fator de <i>ripple</i> SMA (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMA (mV)	FE
2	4,93	0,11	1,38	0,19	262,4	1560
5	4,94	0,26	3,35	0,19	643,6	1560
8	4,95	0,40	5,23	0,19	1011,1	1560
12	4,92	0,60	7,78	0,19	1513	1560
15	4,92	0,73	9,56	0,19	1848	1560

5.3.1.

Ensaio com a fonte CC

Passando agora aos ensaios com fonte CC, a Tabela 15 apresenta a média de 10 ensaios com arranjo com fonte CC e SMR universal e objeto resistivo, com 1 % de *ripple*.

Tabela 15 – Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de construção diferente (Universal com Resistivo) e fonte CC (fator de *ripple* em 1 %).

V_{SMR} (kV)	Fator de <i>ripple</i> SMR (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMR (V)	V_{SMA} (V)	Fator de <i>ripple</i> SMA (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMA (mV)	FE
2	0,01	0,73	0,70	0,95	6,644	2895
5	0,04	0,71	1,73	0,91	15,84	2939
8	0,06	0,71	2,74	0,91	25,16	2959
12	0,09	0,71	4,12	0,89	36,92	2962
15	0,11	0,72	5,07	0,90	45,92	2977

A Tabela 16 apresenta a média de 10 ensaios com arranjo com fonte CC e SMR resistivo e objeto resistivo, com 1 % de *ripple*.

Tabela 16 – Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesmo tipo construtivo (resistivo com resistivo) e fonte CC (fator de *ripple* em 1 %).

V_{SMR} (kV)	Fator de <i>ripple</i> SMR (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMR (V)	V_{SMA} (V)	Fator de <i>ripple</i> SMA (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMA (mV)	FE
2	0,90	0,01	0,75	0,97	7,26	2938
5	0,88	0,015	1,72	0,91	15,79	2949
8	0,89	0,02	2,77	0,92	25,44	2970
12	0,89	0,038	4,21	0,92	38,6	2988
15	0,88	0,046	5,12	0,91	46,76	2984

A Tabela 17 apresenta a média de 10 ensaios com arranjo com fonte CC e SMR universal e objeto universal, com 1 % de *ripple*.

Tabela 17 – Valores adquiridos nos ensaios em Alta Tensão com divisores de mesmo tipo construtivo (universal com universal) e fonte CC (fator de *ripple* em 1 %).

V_{SMR} (kV)	Fator de <i>ripple</i> SMR (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMR (V)	V_{SMA} (V)	Fator de <i>ripple</i> SMA (%)	Amplitude de <i>ripple</i> do SMA (mV)	FE
2	0,78	0,016	1,33	0,03	38,8	1557
5	0,73	0,037	3,28	0,03	93,7	1560
8	0,72	0,060	5,36	0,03	150	1560
12	0,72	0,089	8,01	0,03	224,2	1560
15	0,71	0,106	9,55	0,03	265,8	1559

5.4.

Incerteza do Fator de Escala

Os cálculos realizados neste item são fundamentais para a determinação da incerteza referente ao FE atribuído, e as Tabelas de 18 a 26 apresentam o valor da incerteza de calibração calculada a partir de resultados obtidos nos ensaios demonstrados anteriormente. As fontes de incertezas que compõem essa calibração estão mencionadas abaixo e, através dessa junção, obtém-se a incerteza padrão do sistema sob calibração. As Tabelas foram separadas em 2 grupos: Arranjo com fonte CA e retificador; e com arranjo com fonte padrão CC:

5.4.1.

Ensaio com fonte CA + retificador

Na Tabela 18 apresentam-se os resultados dos cálculos utilizando SMR universal e objeto resistivo com nível de *ripple* em 3 %.

Tabela 18 – Incerteza de calibração com 3 % de *ripple* entre divisores universal e resistivo.

Incerteza da amplitude						
Fontes de Incerteza	Estimativa de Entrada (%)	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão (%)
Desv. Pad. Experimental	$1,61 \times 10^{-3}$	Normal	9	$\sqrt{10}$	1	$5,09 \times 10^{-4}$
Resol. do SMR	$4,45 \times 10^{-3}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$1,29 \times 10^{-3}$
Resol. do SMA	$1,32 \times 10^{-1}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$3,81 \times 10^{-2}$
Linearidade do SMA	$5,22 \times 10^{-3}$	Retangular	∞	$\sqrt{3}$	1	$3,02 \times 10^{-3}$
FE definido	Incerteza combinada (%)					0,03821
2979,1305	Incerteza expandida (%)					0,076
$V_{eff} =$			$2,86 \times 10^8$		k=	2,00

Na Tabela 19 apresentam-se os resultados dos cálculos utilizando SMR universal e objeto resistivo com nível de *ripple* em 6 %.

Tabela 19 - Incerteza de calibração com 6 % de *ripple* entre divisores universal e resistivo.

Incerteza da amplitude						
Fontes de Incerteza	Estimativa de Entrada (%)	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão (%)
Desv. Pad. Experimental	$1,50 \times 10^{-2}$	Normal	9	$\sqrt{10}$	1	$4,76 \times 10^{-3}$
Resol. do SMR	$4,99 \times 10^{-3}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$1,44 \times 10^{-3}$
Resol. do SMA	$1,50 \times 10^{-1}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$4,32 \times 10^{-2}$
Linearidade do SMA	$3,29 \times 10^{-3}$	Retangular		$\sqrt{3}$	1	$1,90 \times 10^{-3}$
FE definido	Incerteza combinada (%)					0,0435
2990,7626	Incerteza expandida (%)					0,087
$v_{eff} =$			$6,30 \times 10^4$		k =	2,00

Na Tabela 20 apresentam-se os resultados dos cálculos utilizando SMR resistivo e objeto resistivo com nível de *ripple* em 3 %.

Tabela 20 – Incerteza de calibração com 3 % de *ripple* entre divisores resistivo e resistivo

Incerteza da amplitude						
Fontes de Incerteza	Estimativa de Entrada (%)	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão (%)
Incerteza do SMR	0,034	Normal	∞	2	1	$1,70 \times 10^{-2}$
Desv. Pad. Experimental	$2,39 \times 10^{-2}$	Normal	9	$\sqrt{10}$	1	$7,56 \times 10^{-3}$
Resol. do SMR	$1,32 \times 10^{-2}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$3,81 \times 10^{-4}$
Resol. do SMA	$1,31 \times 10^{-1}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$3,79 \times 10^{-2}$
Linearidade do SMA	$2,38 \times 10^{-3}$	Retangular	∞	$\sqrt{3}$	1	$1,38 \times 10^{-3}$
FE definido	Incerteza combinada (%)					0,04223
2920,253	Incerteza expandida (%)					0,084
$v_{eff} =$			$8,76 \times 10^3$		k =	2,00

Na Tabela 21 apresentam-se os resultados dos cálculos utilizando SMR resistivo e objeto resistivo com nível de *ripple* em 6 %.

Tabela 21 – Incerteza de calibração com 6 % de *ripple* entre divisores resistivo e resistivo

Incerteza da amplitude						
Fontes de Incerteza	Estimativa de Entrada (%)	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão (%)
Desv. Pad. Experimental	$1,72 \times 10^{-3}$	Normal	9	$\sqrt{10}$	1	$5,44 \times 10^{-4}$
Resol. do SMR	$1,03 \times 10^{-3}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$2,97 \times 10^{-4}$
Resol. do SMA	$1,01 \times 10^{-1}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$2,93 \times 10^{-2}$
Linearidade do SMA	$7,35 \times 10^{-3}$	Retangular	∞	$\sqrt{3}$	1	$4,24 \times 10^{-3}$
FE definido	Incerteza combinada (%)					0,0296
2907,3	Incerteza expandida (%)					0,059
$v_{eff} =$			$7,91 \times 10^7$		$k =$	2,00

Na Tabela 22 apresentam-se os resultados dos cálculos utilizando SMR universal e objeto universal com nível de *ripple* em 3 %.

Tabela 22 – Incerteza de calibração com 3 % de *ripple* entre divisores universal e universal

Incerteza da amplitude						
Fontes de Incerteza	Estimativa de Entrada (%)	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão (%)
Desv. Pad. Experimental	$1,61 \times 10^{-3}$	Normal	9	$\sqrt{10}$	1	$5,10 \times 10^{-4}$
Resol. do SMR	$4,80 \times 10^{-4}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$1,39 \times 10^{-4}$
Resol. do SMA	$7,52 \times 10^{-1}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$2,17 \times 10^{-1}$
Linearidade do SMA	$3,86 \times 10^{-3}$	Retangular	∞	$\sqrt{3}$	1	$2,23 \times 10^{-3}$
FE definido	Incerteza combinada (%)					0,2171
1568,18	Incerteza expandida (%)					0,43
$v_{eff} =$			$2,95 \times 10^{11}$		$k =$	2,00

Na Tabela 23 apresentam-se os resultados dos cálculos utilizando SMR universal e objeto universal com nível de *ripple* em 5 %. Obs: Procurou-se montar o arranjo o mais próximo possível para obter os mesmos níveis de *ripple* para cada tipo de arranjo, mas nesse caso só foi possível obter 5 %, e deveria ser 6 %.

Tabela 23– Incerteza de calibração com 5 % de *ripple* entre divisores universal e universal

Incerteza da amplitude						
Fontes de Incerteza	Estimativa de Entrada (%)	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão (%)
Desv. Pad. Experimental	$1,73 \times 10^{-3}$	Normal	9	$\sqrt{10}$	1	$5,47 \times 10^{-4}$
Resol. do SMR	$4,66 \times 10^{-2}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$1,35 \times 10^{-2}$
Resol. do SMA	$7,29 \times 10^{-1}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$2,10 \times 10^{-1}$
Linearidade do SMA	$3,04 \times 10^{-4}$	Retangular	∞	$\sqrt{3}$	1	$1,75 \times 10^{-4}$
FE definido	Incerteza combinada (%)					0,2108
1560,081	Incerteza expandida (%)					0,42
$v_{\text{eff}} =$			$1,99 \times 10^{11}$		k=	2,00

5.4.2.

Ensaio com a fonte CC

Na Tabela 24 apresentam-se os resultados dos cálculos utilizando SMR universal e objeto resistivo com nível de *ripple* em 1 %.

Tabela 24 – Incerteza de calibração com 1 % de *ripple* entre divisores universal e resistivo.

Incerteza da amplitude						
Fontes de Incerteza	Estimativa de Entrada (%)	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão (%)
Desv. Pad. Experimental	$2,35 \times 10^{-3}$	Normal	9	$\sqrt{10}$	1	$7,44 \times 10^{-4}$
Resol. do SMR	$4,87 \times 10^{-4}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$1,40 \times 10^{-4}$
Resol. do SMA	$1,44 \times 10^{-1}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$4,16 \times 10^{-2}$
Linearidade do SMA	$1,74 \times 10^{-2}$	Retangular	∞	$\sqrt{3}$	1	$1,00 \times 10^{-2}$
FE definido	Incerteza combinada (%)					0,04278
2946,3074	Incerteza expandida (%)					0,086
$v_{\text{eff}} =$			$9,85 \times 10^7$		k=	2,00

Na Tabela 25 apresentam-se os resultados dos cálculos utilizando SMR resistivo e objeto resistivo com nível de *ripple* em 1 %.

Tabela 25– Incerteza de calibração com 1 % de *ripple* entre divisores resistivo e resistivo.

Incerteza da amplitude						
Fontes de Incerteza	Estimativa de Entrada (%)	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão (%)
Desv. Pad. Experimental	$8,64 \times 10^{-3}$	Normal	9	$\sqrt{10}$	1	$2,73 \times 10^{-3}$
Resol. do SMR	$1,29 \times 10^{-1}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$3,73 \times 10^{-2}$
Resol. do SMA	$1,33 \times 10^{-1}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$3,83 \times 10^{-2}$
Linearidade do SMA	$9,55 \times 10^{-3}$	Retangular	∞	$\sqrt{3}$	1	$5,51 \times 10^{-3}$
FE definido	Incerteza combinada (%)					0,05376
2965,8089	Incerteza expandida (%)					0,11
$v_{eff} =$			$1,35 \times 10^6$		k=	2,00

Na Tabela 26 apresentam-se os resultados dos cálculos utilizando SMR universal e objeto universal com nível de *ripple* em 1 %.

Tabela 26 – Incerteza de calibração com 1 % de *ripple* entre divisores universal e universal.

Incerteza da amplitude						
Fontes de Incerteza	Estimativa de Entrada (%)	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade	Fator Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão (%)
Desv. Pad. Experimental	$9,10 \times 10^{-4}$	Normal	9	$\sqrt{10}$	1	$2,88 \times 10^{-4}$
Resol. do SMR	$4,86 \times 10^{-4}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$1,40 \times 10^{-4}$
Resol. do SMA	$7,56 \times 10^{-2}$	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1	$2,18 \times 10^{-2}$
Linearidade do SMA	$1,23 \times 10^{-1}$	Retangular	∞	$\sqrt{3}$	1	$7,10 \times 10^{-2}$
FE definido	Incerteza combinada (%)					0,02185
1559,359	Incerteza expandida (%)					0,044
$v_{eff} =$			$2,99 \times 10^8$		k=	2,00

5.4.3.

Resumo da Influência do *Ripple*

Para sintetizar os resultados apresentados nas Tabelas da seção anterior, produziram-se as Figuras 33 (dados provenientes das Tabelas 19, 20 e 25), 34 (dados provenientes das Tabelas 21, 22 e 26) e 35 (dados provenientes das Tabelas 23, 24 e 27), de tal forma que fosse possível uma melhor visualização de que não há quaisquer interferências do *ripple* na calibração. Este fato pôde ser comprovado

pela análise dos ensaios individuais com a obtenção de incertezas padrão, e também com a incerteza expandida do FE, obtida a partir destas fontes de incerteza.

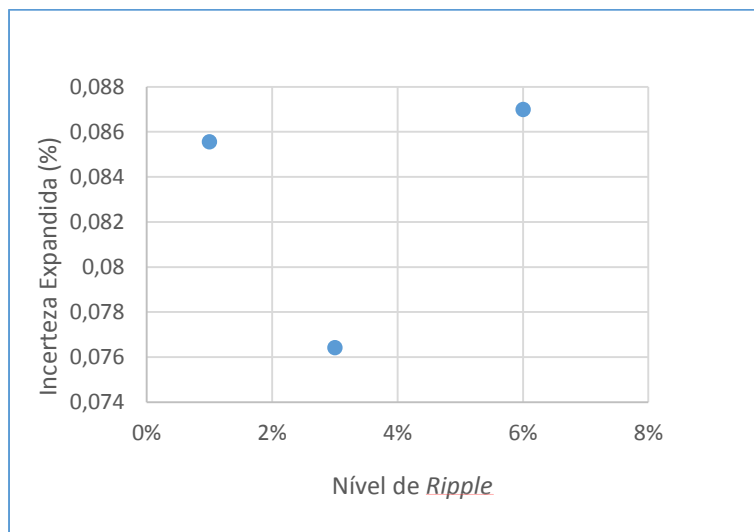


Figura 33 – Incerteza expandida do arranjo com divisor de referência universal e divisor sob calibração resistivo

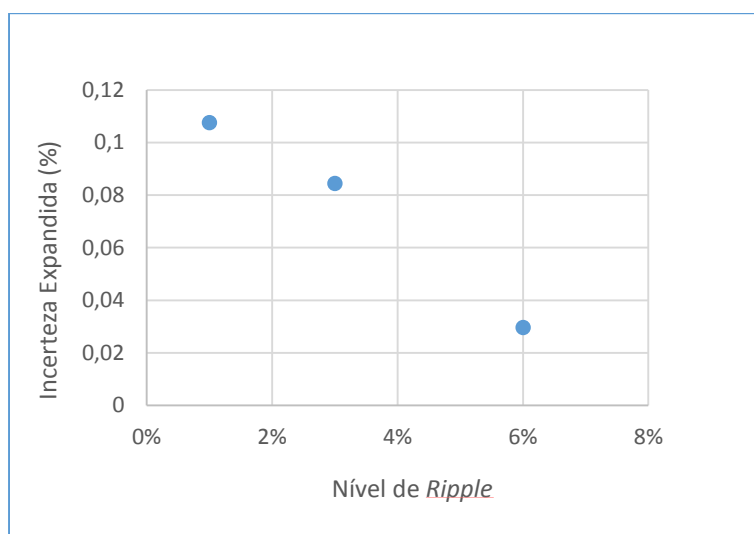


Figura 34 - Incerteza combinada do arranjo com divisor de referência resistivo e divisor sob calibração resistivo

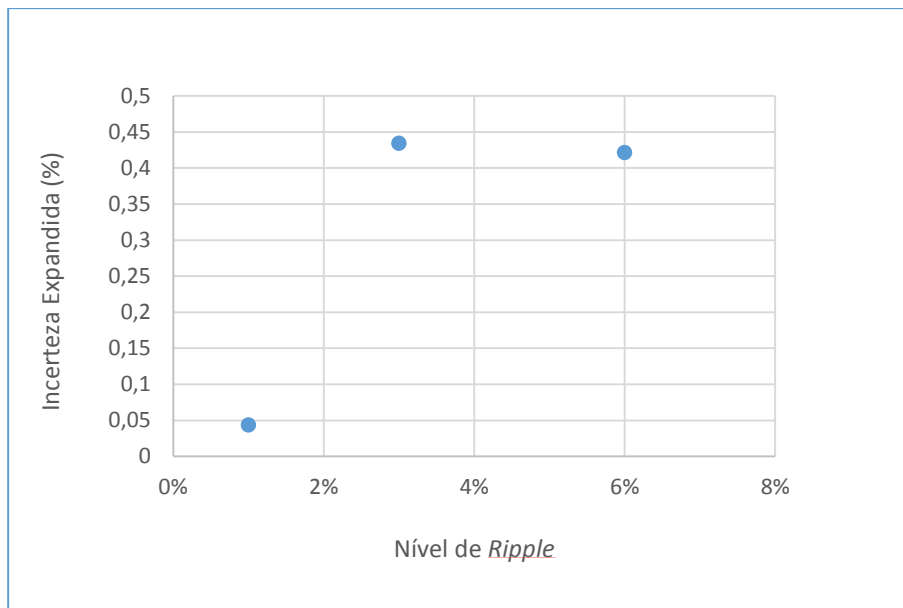


Figura 35 - Incerteza combinada do arranjo com divisor de referência universal e divisor sob calibração universal.

6.

Considerações finais e motivação para trabalhos futuros

O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), mantido pela Eletrobrás, possui grande preocupação quanto à qualidade e confiabilidade das pesquisas desenvolvidas e serviços prestados por seus diversos laboratórios de ensaios.

O Laboratório de referência em calibração de alta tensão (CA2) faz parte da Rede Brasileira de Calibração (RBC), possuindo acreditação em várias áreas de calibração, e foi o foco nesta dissertação para Alta Tensão em Corrente Contínua (ATCC). O escopo de acreditação, baseado na ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 [29] é de 2 kV até < 10 kV com Capacidade de Medição e Calibração (CMC) de 0,10 % de incerteza e de 10 kV até 180 kV com CMC de 0,55 % de incerteza, e pretende-se atingir o nível de 250 kV acreditado. É então importante ressaltar a intenção do laboratório em qualificar, capacitar e adequar o mesmo para o crescente avanço em pesquisas. Dessa forma, foi proposto como objetivo principal desta dissertação o estudo da influência do *ripple* na calibração em ATCC, baseado na norma IEC 60060-1 e 2, e tendo em vista se adequar à norma IEC 61083-4, apesar desta ainda não ter sido publicada.

Inicialmente, foram analisados os ensaios em Alta Tensão em Corrente Contínua, os sistemas de medição utilizados nesse tipo de calibração no CA2 no Cepel, e os requisitos e parâmetros de medição.

Em seguida, a análise foi feita nos equipamentos de retificação CA/CC, também dando ênfase somente aos encontrados em Adrianópolis, no Cepel. Estudou-se, ainda, o software que gera formas de onda, TDG, para a minuta da norma IEC 61083-4. Das formas de onda geradas pelo software, uma delas (a forma de onda ideal) foi reproduzida com êxito; já a que deveria ter 3 % de *ripple* ainda não está em sua fase final, sendo possível contudo reproduzir a forma de onda disponível, mesmo esta estando com valores discrepantes aos indicados na minuta da norma.

O Instrumento Virtual HVAT AC&DC foi aperfeiçoado com êxito e validado utilizando instrumentos de referência disponíveis no laboratório. O mesmo facilitou o processo de aquisição de dados e a análise da qualidade da tensão (*ripple*) fornecida pela fonte. O instrumento virtual agora é capaz de se comunicar com um multímetro da Agilent e/ou da HP, modelo 3458A, o qual, comparado aos osciloscópios disponíveis no laboratório, tem a vantagem de ter uma grande resolução vertical (8 bits) e alta taxa de aquisição. Apesar do software ter a capacidade de apresentar vários dígitos, deverá ser avaliado em qual dígito significativo a incerteza se encontra. Um parâmetro adicional, para efeitos de pesquisa, foi implementado no software, a medição de corrente, porém esta não pôde ser validada pois a corrente que passou pelo circuito foi muito baixa e, com o *shunt* disponível no laboratório, ao ser feita a medição foi verificado um ruído muito alto, tirando a confiabilidade da medição. Um osciloscópio foi adicionado para verificar um possível problema no software, porém o mesmo mediu os mesmos valores e formas de onda (Figura 36).

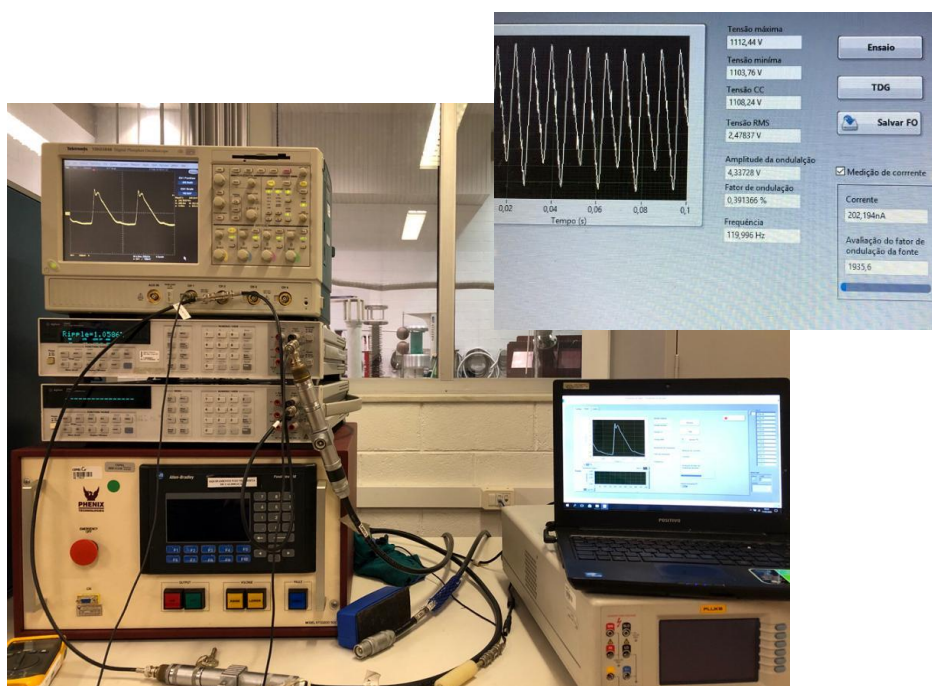


Figura 36 - Medição de corrente com o software e comparação das medições com o osciloscópio

Na etapa de validação do instrumento, foram feitos ensaios em baixa tensão, utilizando o gerador de funções para obter baixa tensão em corrente contínua com

diferentes níveis de *ripple*, e também não ocorreu influência do *ripple* na incerteza do fator de escala.

A variação de *ripple* é diretamente relacionada com a capacitância e a carga do circuito. Assim, para atingir os níveis de *ripple* desejados para essa dissertação, foram adicionadas/retiradas capacitância (carga) ao circuito. Esse procedimento não influencia no sistema de medição, pois respeita o requisito da norma sobre não adicionar nenhum elemento em paralelo com o dispositivo de conversão (referência) e objeto sob calibração. Assim, foram calibrados divisores resistivo e universal, avaliados conforme os requisitos da norma [7], necessários para a validação de um SMA, alcançando os resultados desejados. Esta calibração já foi feita utilizando o Instrumento Virtual.

Por meio do ensaio de linearidade foi possível verificar que níveis de *ripple* $\leq 3\%$ e $\geq 3\%$ não influenciaram na linearidade do sistema. Em alguns casos os sinais com nível de *ripple* maior que 3% apresentaram dispersão em relação à média menor e houve casos em que a dispersão em relação à média com nível de *ripple* acima de 3% , comparados aos valores obtidos com níveis de *ripple* $\leq 3\%$, foram maiores. Dessa forma, confirmou-se a linearidade do sistema em toda a faixa de medição com diferentes níveis de *ripple*, pois a dispersão em relação à média ficou menor que 1% , conforme apresentado nas Figuras 37, 38 e 39.

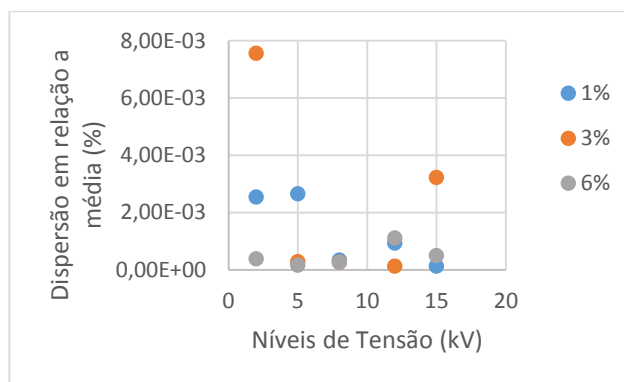


Figura 37 - SMR resistivo com SMA resistivo.

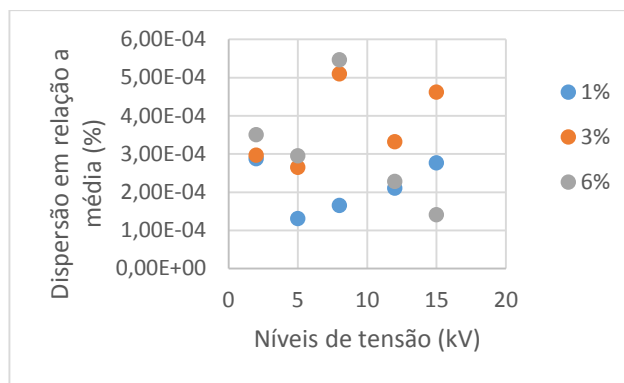


Figura 38 - SMR universal com SMA universal.

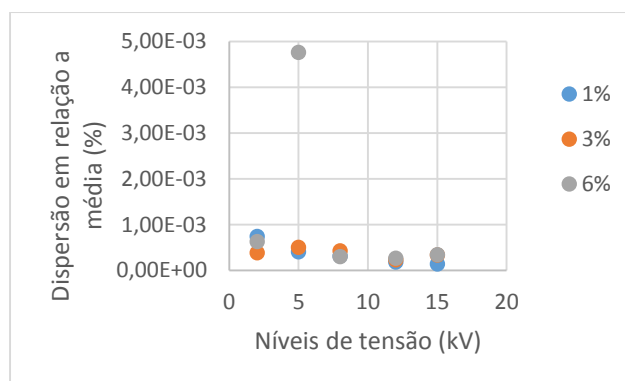


Figura 39 - SMR universal com SMA resistivo.

Após a realização de todos os ensaios necessários, foram calculadas as incertezas no FE para cada nível de *ripple* utilizado na calibração. Os resultados finais obtidos foram semelhantes ao ensaio de linearidade, sendo que em alguns casos a incerteza para níveis de *ripple* maiores que 3 % ficou menor e, em outros casos, maior (Figura 40).

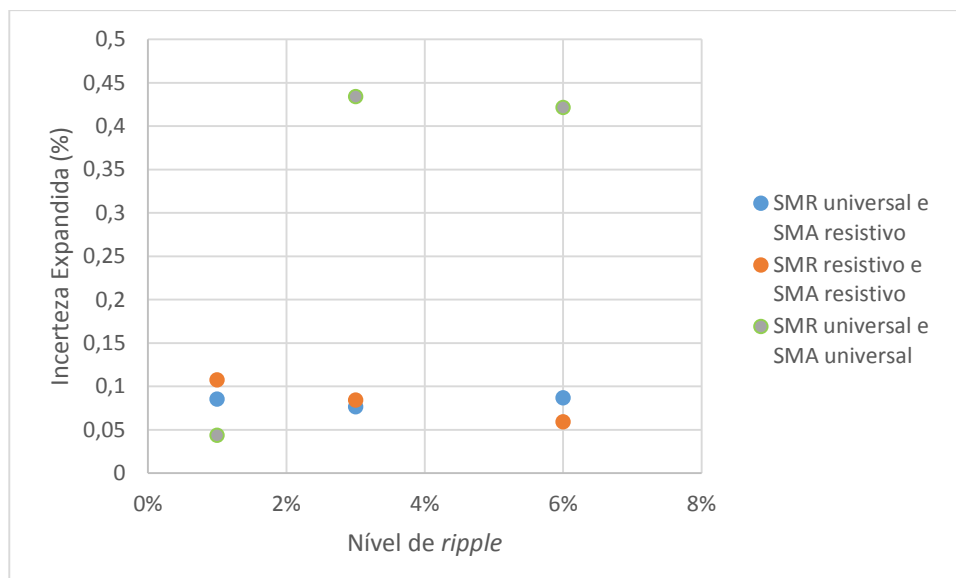


Figura 40 - Incerteza Expandida em diferentes arranjos e níveis de *ripple* variados.

Uma possível explicação se deve ao fato da calibração ser o resultado da comparação entre dois sistemas, e é esperado que esses sistemas sofram as mesmas influências, uma vez que o arranjo de calibração é disposto de forma que a referência fique em paralelo com o objeto sob calibração. Logo, a comparação entre ambos não alteraria o resultado final das fontes de incerteza.

Consequentemente, a análise do *ripple* deve ser feita somente para não danificar o dielétrico dos equipamentos de alta tensão sob ensaio, evitando que seja aplicada uma tensão máxima maior que a suportabilidade dielétrica do equipamento. Porém, em relação à incerteza de medição relacionada à calibração do FE, não há influência.

Como propostas para trabalhos futuros recomenda-se:

- Avaliar qual a influência da variação do fator de *ripple* no comportamento dinâmico e em ensaios de descargas parciais;
- Realizar o processamento das formas de onda (validadas) da norma IEC 61083-4, após esta ser publicada.
- Validar a medição de corrente contínua no software, comprovando que a fonte realmente tem um *ripple* $< 0,2 \%$ por mA, e calcular a incerteza dessa medição, para o caso da fonte ser utilizado em ensaios ATCC.

Referências bibliográficas

- [1] SATO, A, K, C. Transmissão de Potência em Corrente Contínua e Corrente Alternada: Estudo Comparativo. Monografia (Graduação). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
- [2] CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA. O Cepel. Quem somos. Disponível em: <http://www.cepel.br/pt_br/o-cepel/quem-somos/>. Acesso em 9 set. 2020.
- [3] FILHO, O. B. O. e SILVA, M. T. F. Técnicas de medição em ensaios de alta tensão. Rio de Janeiro, Eletrobrás CEPEL, 1996. Relatório Técnico.
- [4] VITORIO, P.C.O et al. Implantação e Implementação do Sistema de Referência em Alta Tensão em Corrente Contínua (SIRAT CC) na Faixa de 100 V a 150 kV, VIII Semetro, 2009.
- [5] 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.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR IEC 60060:** Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão, Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR IEC 60060:** Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão, Parte 2: Sistemas de medição, Rio de Janeiro, 2016.
- [8] 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.
- [9] OLIVEIRA, Y. R. 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 (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

[10] GUERRA DAS CORRENTES. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/Tesla-Edison-Guerra-das-Correntes-ebook/dp/B082XN7R3B>>. Acesso em 7 de dez. 2020.

[11] KIM, C. et al. HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems. Korea, 2009,

[12] KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S. e KUFFEL, J. **High Voltage Engineering - FUNDAMENTALS**. 2 ed. OXFORD - NEWNES, 2000.

[13] MONOGRAFIAS BRASIL ESCOLA. ENGENHARIA. Sistema De Transmissão HVDC. Corrente Contínua em Alta Tensão (Conversores Multiníveis Modulares) – MMC. Disponível em: <<https://monografias.brasilecola.uol.com.br/engenharia/sistema-de-transmissao-hvdc-corrente-continua-em-alta-tensao-conversores-multiniveis-modulares-mmc.htm>>. Acesso em 21 de set. 2020.

[14] Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/1396/Marchioro_Alison_Fernando.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 30 de nov.2020

[15] HIPOTRONICS. 8000 Series Product Data Sheet. Disponível em: <<https://www.hubbell.com/hipotronics/en/Products/Electrical-Electronic/Test-Equipment/Instruments/Hipot-Test-Equipment/Hipot-Testers-DC/8000-Series/p/2133779>>. Acesso em 31 de jul.2020.

[16] VIM. Vocabulário internacional de metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. INMETRO 1ª edição Luso-Brasileira, 2012.

[17] FILHO, O. B. O. e SILVA, M. T. F. Técnicas de medição em ensaios de alta tensão. Rio de Janeiro, Eletrobrás CEPEL, 1996. Relatório Técnico.

- [18] 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.
- [19] AGILENT SCIENTIFIC INSTRUMENTS. Manual de uso do 3458A Multimeter Agilent. 8ª edição. Malaysia; 2020.
- [20] EMBARCADOS. Aprenda a analisar o *ripple* da sua fonte. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/aprenda-a-analisar-o-ripple-da-sua-fonte/>>. Acesso em 17 set.2020.
- [21] FERREIRA, L, S. et al. Procedimento de Calibração CA2. Rio de Janeiro, Eletrobrás CEPEL, 2020. Relatório Técnico.
- [22] HART, D. W. Power Electronic. 1 ed. Valparaiso - Indiana. 2010
- [23] HAUSCHILD, W.; LEMKE, E. High Voltage Test and Measuring Techniques. 1 ed. Germany- Springer. 2014.
- [24] FILHO, O. B. O. Treinamento para técnico: Divisores de Tensão. Rio de janeiro, Eletrobrás CEPEL, 1986. 25p. Relatório Técnico.
- [25] ISO GUM. Avaliação de dados de medição - Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. Primeira Edição Brasileira do Évaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure INMETRO. JCGM, set 2008.
- [26] SALLES, C.; CORIOLANO, D. L.; NETO, E. T. W. Técnica em alta tensão, LAT-EFEI, Fupai.
- [27] WADHWA, C. L. HIGH VOLTAGE ENGINEERING. 2 .ed. New Delhi - New Age International. 2007.
- [28] CADERNO DE LABORATÓRIO. Diário de um laboratório de desenvolvimento. Conhecendo os diodos: Retificador de onda complete. Disponível em: <<https://cadernodelaboratorio.com.br/conhecendo-os-diodos-retificador-de-onda-completa/>>. Acesso em 5 ago.2020.

[29] MELLO, D, R. Técnicas de Medição em Alta Tensão. Rio de Janeiro, Eletrobrás CEPEL, 2013. Relatório Técnico.

[30] Lopes, V, J, S. Instrumentação virtual aplicada ao ensino experimental de engenharia elétrica

[31] Torrinha, I, M,D. Desenvolvimento de Software em LabVIEW para Banco de Ensaio de motores de UAV'S SBE-VIEW v.1

[32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO/IEC 17025: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2017.

[33] COSTA, H, S; SOUZA, A, A, N; FERREIRA, W, A, C. Projeto e Confecção de um Divisor Resistivo para Medição de Impulso Atmosférico em Alta Tensão com Classe de 600 kV. Monografia (Graduação). Centro Universitário de Volta Redonda, Fundação Oswaldo Aranha, 2016.



Desenvolvimento e validação de um instrumento virtual para análise de ondulação em medição de alta tensão em corrente contínua

F D Alves^{1,2}, C R Hall Barbosa¹, M T F Silva², L C Azevedo², L S Ferreira²,
M V B Lopes²

¹Programa de Pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro PUC-Rio; ²Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: feernandaalves@hotmail.com

Resumo. Em ensaios de alta tensão em equipamentos elétricos, a tensão contínua é obtida a partir da retificação da tensão senoidal da rede, sempre havendo alguma ondulação residual no sinal retificado. Assim, para garantir a qualidade da alta tensão em corrente contínua (ATCC) fornecida pelas fontes em tais ensaios, existe a necessidade do monitoramento, análise e medição da ondulação. Este artigo apresenta o desenvolvimento e a validação de um instrumento virtual em ambiente LabVIEW capaz de adquirir o sinal de tensão através de um multímetro digital e de quantificar a ondulação (*“ripple”*) em fontes ATCC, além dos demais parâmetros estabelecidos pela norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013. A validação em baixa e alta tensão do instrumento virtual para calibrações de ATCC foi feita por meio da combinação de fonte de tensão em bancada, fonte de alta tensão em corrente contínua e instrumentos de medição de referência, com resultados satisfatórios.

1. Introdução

A análise da ondulação (*“ripple”*) em sinais de alta tensão em corrente contínua (ATCC) tem grande relevância na avaliação da qualidade e adequação de fontes de alta tensão baseadas na retificação de sinais senoidais, que são utilizadas nos ensaios com este tipo de solicitação.

Esta avaliação do nível de ondulação é crítica porque, nos ensaios e calibrações em que a alta tensão CC possui um fator de ondulação acima do estabelecido pela norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013, “Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão, Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio” [1], podem ocorrer, por exemplo, descargas parciais em níveis de tensão abaixo do que ocorreriam se a ondulação fosse menor.

Contudo, a avaliação do nível de ondulação não é trivial, não havendo equipamentos convencionais de alta resolução que façam essa estimativa de forma automática. Assim, foi necessário desenvolver um instrumento virtual (IV) baseado na plataforma LabVIEW, que utiliza como digitalizador de sinais, previamente condicionados para baixa tensão por meio de divisores de alta tensão, o multímetro digital de alta resolução Agilent 3458A.

Para validar o sistema de medição baseado neste IV, foram realizadas comparações, em baixa tensão e alta tensão, dos resultados do IV com os resultados de um voltímetro de crista DMI 551, empregado como referência na validação.

A seção a seguir apresenta o sistema de medição em alta tensão em corrente contínua utilizado nas calibrações. Em seguida, a seção 3 trata das definições pela norma [1] dos parâmetros relevantes nos ensaios. A seção 4 mostra o instrumento virtual desenvolvido e sua validação. E finalmente, a seção 5 apresenta os resultados experimentais em ATCC.

2. Sistema de medição em alta tensão em corrente contínua (ATCC)

Em laboratórios de ensaios em alta tensão (AT), utiliza-se a tensão em corrente contínua, entre outras aplicações, para verificar a suportabilidade dielétrica dos equipamentos que fazem parte de sistemas de transmissão em ATCC. Nestes ensaios, a tensão aplicada ao equipamento deve ser medida por um sistema de medição que tenha sido calibrado de acordo com as normas aplicáveis [1-2], composto por um divisor de tensão, cabo de transmissão e instrumento de medição.

Para calibração destes sistemas de medição de ATCC, o laboratório de calibração deve possuir uma fonte de ATCC capaz de gerar o nível de tensão necessário, de forma estável e com ondulação dentro de limites estabelecidos em norma, e um sistema de medição de referência (SMR) com características conforme a norma aplicável [1]. Descrevem-se a seguir os dispositivos e instrumentos utilizados no presente trabalho.

2.1. Fonte de Tensão em Corrente Contínua de até 240 kV

O laboratório de calibração em alta tensão do CEPEL (CA2) está equipado com uma fonte de ATCC composta por quatro módulos de até 60 kV, 16 mA, cada um, gerando então uma tensão de até 240 kV, com um fator de ondulação de 0,2 % por mA, segundo informação do fabricante [4].

2.2. Divisor resistivo SMR7

Divisores de tensão utilizados em sistemas de medição ATCC são de alta impedância resistiva, na faixa de centenas de $M\Omega$, podendo chegar até a $G\Omega$. Um divisor de alta tensão é dividido em duas unidades: unidade de alta e unidade de baixa tensão. O divisor resistivo de referência, intitulado SMR7, que faz parte de um dos sistemas de medição em ATCC do CA2, foi desenvolvido no CEPEL utilizando unidades de resistores comerciais de baixa tensão, com características especiais de estabilidade e com tolerância de 1 %. A resistência total da unidade de alta tensão do SMR7 é de 14,92 $M\Omega$, e da baixa tensão de 5,11 $k\Omega$. A tensão máxima CC para este divisor é de 15 kV.

2.3. Divisor Universal SMR2

O laboratório CA2 também conta com um divisor de referência, Haefely, modelo RCZ500REF, com tensão de operação de até 180 kV em CC, incerteza de ± 1 %, resistência do resistor externo de 400 Ω , resistência da unidade resistiva de AT de 225 $M\Omega$ e capacitância da unidade capacitiva de AT de 500 pF. Neste tipo de divisor, chamado de divisor universal, a unidade de alta tensão é composta por uma unidade resistiva em paralelo com uma unidade capacitiva [5].

2.4. Multímetro Agilent 3458A

O multímetro Agilent 3458A, utilizado como digitalizador para o IV desenvolvido, e que compõe originalmente os SMR do CA2, possui cinco faixas de medição, de 0,1 a 1000 V, resolução de 8½ dígitos, e capacidade de realizar e transferir, via cabo GPIB, até 100000 leituras por segundo [6].

2.5. Gerador de Funções em Baixa Tensão AFG 3022B

O gerador de funções Tektronix AFG 3022B, utilizado como fonte de tensão para validação do IV, é capaz de gerar várias formas de onda com amplitudes (até 10 V pico a pico) e frequências (até 20 MHz) conhecidas.

2.6. Voltímetro de Crista DMI 551

O voltímetro de crista da Haefely, DMI 551, na função CC, é capaz de indicar valor médio, amplitude da ondulação e fator de ondulação para uma tensão de entrada de até 7,5 V em CC, exatidão de $\pm 0,5\%$ e resolução de 1.10^{-3} V.

3. Parâmetros Relevantes

A norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 define a ondulação (“ripple”) como o desvio periódico do valor médio aritmético da tensão de ensaio CC e estabelece limites para esse parâmetro em ensaios ATCC, visando à análise da qualidade e adequação da tensão da fonte.

3.1. Amplitude de Ondulação (“ripple”)

O aumento da amplitude de ondulação está relacionado ao aumento de correntes de descarga resistiva, sendo definido como a metade da diferença entre os valores máximo (V_{max}) e mínimo (V_{min}) de tensão, conforme:

$$\Delta\delta = \frac{V_{max} - V_{min}}{2} \quad (1)$$

3.2. Fator de Ondulação (“ripple”)

O fator de ondulação é a relação entre a amplitude da ondulação e o valor da tensão de ensaio CC (V_m), conforme a equação 2. A norma estabelece que esse fator não deve ser superior a 3 % da tensão de ensaio e que, dentro deste limite, não pode influenciar na incerteza expandida de medição da tensão contínua.

$$\delta = \frac{\Delta\delta.100}{V_m} \quad (2)$$

4. Instrumento Virtual para Análise de Ondulação (“Ripple”)

O instrumento virtual para análise da ondulação, denominado Multiripple, foi desenvolvido com o objetivo de adquirir sinais relacionados com ATCC e avaliar os parâmetros estabelecidos pela norma para ensaios que envolvem este tipo de alta tensão. O sistema desenvolvido estabelece a comunicação, controla o multímetro Agilent 3458A, de 8½ dígitos e processa o sinal adquirido, além de possibilitar a visualização da forma de onda digitalizada do sinal. A Figura 1 mostra o painel frontal do programa desenvolvido em LabVIEW 2017.

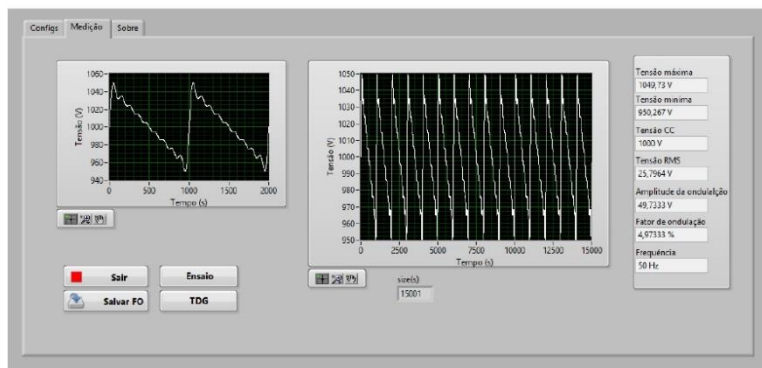


Figura 1 - Programa para análise do parâmetro de ondulação

4.1. Validação do instrumento virtual

Para a validação do instrumento virtual, foram realizados ensaios utilizando um gerador de funções em baixa tensão, fonte de alta tensão e divisor de tensão no caso de alta tensão, a fim de verificar se os parâmetros estimados pelo instrumento virtual estão próximos aos estimados pelo instrumento de referência (voltímetro de crista DMI551).

Inicialmente, o gerador de funções foi empregado para gerar sinais de 5 V de valor médio, com quatro diferentes fatores de ondulação (1 %, 2 %, 3 % e 5 %). A tabela 1 mostra as médias das amplitudes de ondulação e fatores de ondulação estimados pelo instrumento de referência DMI 551 e pelo instrumento virtual, além das diferenças observadas, considerando 10 ensaios em cada nível de ondulação.

Tabela 1. Diferenças encontradas em baixa tensão entre o instrumento de referência e o instrumento virtual.

Nível de ondulação		1 %	2 %	3 %	5 %
Instrumento de Referência	Amplitude de ondulação (V)	0,048	0,097	0,147	0,244
	Fator de ondulação (%)	0,977	1,982	3,024	5,115
Instrumento virtual	Amplitude de ondulação (V)	0,049	0,099	0,148	0,247
	Fator de ondulação (%)	1,000	2,018	3,055	5,200
Diferença	Amplitude de ondulação (%)	2,083	2,062	0,680	1,230
	Fator de ondulação (%)	0,022	0,035	0,031	0,085

Em seguida, a fonte de alta tensão foi empregada em combinação com o divisor resistivo do SMR7, em cinco diferentes níveis de tensão (2 kV, 3 kV, 4 kV, -2 kV e -3 kV). O fator de ondulação neste caso é aproximadamente constante em 3%. A tabela 2 mostra as médias das amplitudes de ondulação e fatores de ondulação estimados pelo instrumento de referência DMI 551 e pelo instrumento virtual, além das diferenças observadas, considerando 10 ensaios em cada nível de tensão.

Tabela 2. Diferenças encontradas em alta tensão entre o instrumento de referência e o instrumento virtual.

Nível de tensão		2 kV	3 kV	4 kV	- 2 kV	- 3 kV
Fator de Escala do divisor de tensão		2927	2925	2925	2925	2924
Instrumento de Referência	Tensão média (V)	0,676	1,024	1,367	-0,672	-1,025
	Amplitude de ondulação (V)	0,020	0,031	0,043	0,020	0,031
	Fator de ondulação (%)	3,000	3,027	3,133	3,012	3,017
Instrumento virtual	Tensão média (V)	0,676	1,025	1,368	-0,672	-1,025
	Amplitude de ondulação (V)	0,020	0,031	0,042	0,020	0,031
	Fator de ondulação (%)	3,086	3,095	3,117	3,085	3,095
Diferença	Amplitude de ondulação (%)	0,000	0,000	-2,325	0,000	0,000
	Fator de ondulação (%)	0,087	0,068	-0,016	0,073	0,078

Analisando-se as Tabelas 1 e 2, pode-se concluir que as diferenças observadas entre o instrumento de referência e o Instrumento Virtual desenvolvido em LabVIEW foram baixas, sendo aceitáveis para garantir a confiabilidade das medições. Em seguida, foi realizado o cálculo da incerteza de medição

considerando as fontes de incerteza indicadas na tabela 3 e as estimativas associadas aos instrumentos utilizados em cada nível de tensão de ensaio.

Tabela 3. Fontes utilizadas no cálculo de incerteza para validação do instrumento virtual

Fonte de incerteza	Estimativa (%)	Distribuição de Probabilidade	v_i	Fator divisor	Coefficiente de sensibilidade
Resolução do multímetro 3458A (10 V)	X_1	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1
Incerteza do multímetro 3458A	X_2	Retangular	∞	2	1
Desvio padrão software	X_3	Normal	9	$\sqrt{10}$	1
Desvio padrão DMI	X_4	Normal	9	$\sqrt{10}$	1
Resolução do DMI	X_5	Retangular	∞	$\sqrt{12}$	1
Exatidão do DMI	X_6	Retangular	∞	$\sqrt{3}$	1
Incerteza do SMR7	X_7	Retangular	∞	2	1

O fator de abrangência k foi obtido por meio de um grau de liberdade efetivo maior que 100, de acordo com a tabela t-student, para o nível de confiança de 95,45 %. A tabela 4 apresenta as incertezas associadas ao instrumento virtual, para cada nível de tensão, para as amplitudes da ondulação e fatores de ondulação.

Tabela 4. Incerteza expandida da amplitude e fator de ondulação para cada nível de tensão

Tensão aplicada (kV)	Amplitude da ondulação (V)	Incerteza de Medição (%)	k	Fator de ondulação (%)	Incerteza de Medição (%)	k
2	0,020	1,7	2,00	3,086	1,5	2,00
3	0,031	1,9		2,301	1,6	
4	0,042	2,2		3,117	2,5	
-2	0,020	1,5		3,085	1,1	
-3	0,031	1,5		3,095	1,2	

5. Resultados experimentais

Após a validação do instrumento virtual, a qualidade da tensão CC gerada pela fonte ATCC do laboratório CA2 foi avaliada utilizando-se dois sistemas de medição diferentes, ambos tendo o IV desenvolvido, incluindo o multímetro, como instrumento. Um sistema de medição utilizou como dispositivo de conversão de tensão o divisor SMR7, originalmente concebido somente para aplicação em medição de valor médio de ATCC, e o outro sistema utilizou o divisor SMR2, este já concebido para medição de valor médio e fator de ondulação de ATCC. De acordo com informações do seu fabricante, a fonte de ATCC avaliada é estável e apresenta o fator de ondulação de 0,2 % por mA.

Os resultados obtidos nesta avaliação, utilizando-se os dois sistemas de medição para diferentes níveis de tensão e ambas as polaridades da fonte, estão apresentados nas Tabelas 5 e 6. Observa-se que, pelos resultados obtidos com o SMR7 (Tabela 5), a conclusão seria que o fator de ondulação ultrapassa os 3 % estabelecidos pela norma. Já os resultados obtidos utilizando o SMR2 (Tabela 6) indicam que a qualidade da tensão CC gerada pela fonte, em termos de fator de ondulação, é compatível com as informações do fabricante. Estes resultados confirmam também que o SMR7 não é adequado para aplicações de Sistemas de Medição de ATCC de acordo com as normas atuais.

Tabela 5. Medições feitas no ensaio de alta tensão em corrente contínua utilizando SMR7

Nível de tensão (positivo)		2 kV	3 kV	4 kV
Fator de Escala do divisor de tensão		2927	2925	2925
SMR7	Tensão média (V)	0,679	1,032	1,378
	Amplitude da ondulação (V)	0,021	0,032	0,043
	Fator de ondulação (%)	3,09	3,10	3,12
Nível de tensão (negativo)		2 kV	3 kV	4 kV
Fator de Escala do divisor de tensão		2925	2924	2924
SMR7	Tensão média (kV)	-0,679	-1,033	-1,374
	Amplitude da ondulação (V)	0,021	0,032	0,043
	Fator de ondulação (%)	3,09	3,10	3,13

Tabela 6. Medições feitas no ensaio de alta tensão em corrente contínua utilizando SMR2

Nível de tensão (positivo)		30 kV	60 kV	120 kV	180 kV
Fator de Escala do divisor de tensão		999,8	1000,4	1000,9	1001,6
SMR2	Tensão média (V)	31,453	63,659	114,494	170,457
	Amplitude da ondulação (V)	0,122	0,281	0,436	0,815
	Fator de ondulação (%)	0,38	0,44	0,38	0,48
Nível de tensão (negativo)		30 kV	60 kV	120 kV	180 kV
Fator de Escala do divisor de tensão		999,8	1000,3	1000,9	1001,6
SMR2	Tensão média (V)	-32,830	-72,870	-115,407	-179,203
	Amplitude da ondulação (V)	0,122	0,309	0,422	0,765
	Fator de ondulação (%)	0,37	0,42	0,37	0,43

6. Conclusões

Neste artigo foi apresentado um IV desenvolvido em LabVIEW para analisar a ondulação em calibrações de alta tensão em corrente contínua. Foi realizada a validação, com resultados satisfatórios, em comparação ao instrumento de referência, voltímetro de crista DMI551. Por utilizar um instrumento de referência com a resolução muito baixa e se comparar com outro de resolução muito alta, a incerteza de medição, apesar de baixa, deve ser representada no último algarismo das médias. Após a validação, o IV desenvolvido foi utilizado com sucesso em uma aplicação prática de medição em ATCC, e está em processo de desenvolvimento um filtro para mitigação de possíveis interferências oriundas da tensão da rede.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio financeiro fornecido por CEPEL, CNPq e CAPES.

Referências

- [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] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR IEC 60060 “Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão, Parte 2: Sistema de medição”, 2016.
- [3] OLIVEIRA, Y. R. 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 (Mestrado) – Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- [4] USER MANUAL. 8000 PL Series 60 kV Module Portable DC Hipot Testers. Hipotronics.Inc.
- [5] USER MANUAL. RCZ 500 REF Reference Universal and Impulse Dividers . Hipotronics.Inc.
- [6] AGILENT, 3458A Multimeter - User Guide, 4.ed, USA: Agilent Technologies, Inc., 2000.