



Lilian Santos Ferreira

**Novo Método para Estimativa de Parâmetros de Impulsos
Atmosféricos Cortados na Cauda**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2016



Lilian Santos Ferreira

Novo Método para Estimativa de Parâmetros de Impulsos Atmosféricos Cortados na Cauda

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 assinada.

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia - PUC-Rio

Prof. Eduardo Costa da Silva

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Dr. Helvio Jailson Azevedo Martins

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Dr. Marcelo Guimarães Rodrigues

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de fevereiro de 2016

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

Lilian Santos Ferreira

Engenheira Eletricista em 2013.

Ficha Catalográfica

Ferreira, Lilian Santos

Novo método para estimativa de parâmetros de impulsos atmosféricos cortados na cauda / Lilian Santos Ferreira; orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa. - 2016.

102 f.: il. (color); 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), 2016.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Dissertação. 2. Metrologia. 3. Alta tensão. 4. Impulso atmosférico cortado na cauda. Carlos Roberto Hall. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação). III. Título.

CDD:389.1

A meus pais Sebastião e Lígia, por terem me proporcionado todos os meios para que, com muito orgulho, eu pudesse chegar até aqui. De fato não alcançaria tal objetivo sem as bases sólidas de educação e valores morais por eles recebidas. A minha irmã Lívia, todos os meus familiares e amigos pelas palavras de incentivo, apoio e, por compreenderem minha ausência ao longo de todo esse período. A todos, meu sincero obrigada.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar nos caminhos dele, por toda força e fé que me proporcionou durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais, minha irmã, a todos os meus familiares e amigos que foram parte de cada vitória, por suas orações, apoio, carinho, cuidado e compreensão durante todo tempo e por sempre acreditarem em mim, sou eternamente grata por tê-los em minha vida.

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

Ao meu orientador Professor Doutor Carlos Roberto Hall Barbosa, pela paciência, excelente orientação, contribuição e todo conhecimento transmitido.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho Márcio Thelio Fernandes da Silva, Luiz Carlos de Azevedo, Mayara Cunha Cagido, Francisco Eduardo Rodrigues de Araújo e Flávio Bittencourt Barbosa que foram meus motivadores e incentivadores dessa dissertação, por todo apoio incondicional durante toda a fase de estudos e também a toda equipe dos laboratórios AT1 e CA2.

Ao gerente de Departamento de Laboratório de Adrianópolis (DLA) Alexandre Neves por todo apoio institucional e pelo incentivo a pesquisa proporcionando o aumento do nosso conhecimento. Agradeço também ao diretor de Departamento de Laboratórios (DL) Alcêo Mendes de Souza Junior pela oportunidade e confiança depositada.

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

Meu muito obrigada a todos que de forma direta ou indireta foram importantes para que este trabalho fosse realizado.

Resumo

Santos, Lilian Ferreira. Barbosa, Carlos Roberto Hall (Orientador). **Novo Método para Estimativa de Parâmetros de Impulsos Atmosféricos Cortados na Cauda**. Rio de Janeiro, 2016. 102p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Para a avaliação de sobretensões existentes em um sistema elétrico, é importante que as características de cada tipo de impulso sejam conhecidas. Cada tipo de forma de onda representa um fenômeno que pode ocorrer em equipamentos elétricos de alta tensão, os quais precisam ser testados e certificados em laboratórios de alta tensão por meio de procedimentos normalizados antes de seu comissionamento. A norma IEC 60060-1:2010, no que se refere a ensaios de impulso atmosférico, introduziu como principal requisito a função tensão de ensaio, que envolve filtrar digitalmente a forma de onda original do impulso e calcular os parâmetros de tempo e amplitude da forma de onda a partir deste sinal filtrado, devendo ser aplicado aos Impulsos Atmosféricos Plenos (IAP) e Impulsos Atmosféricos Cortados na Cauda (IACC). Atualmente, a análise para as formas de onda de IACC só é possível mediante aplicação de um IAP de referência, criando assim dificuldades para a análise e processamento das formas de onda. Neste sentido, o objetivo desta dissertação foi o desenvolvimento e validação de um método alternativo para o tratamento das formas de onda de IACC que exclui a necessidade de um impulso atmosférico de referência, de forma a simplificar esse tipo de ensaio de alta tensão. Os testes foram realizados por meio de ensaios experimentais em baixa e alta tensão, fazendo uma comparação entre os dois métodos (definido pela norma e alternativo) com a obtenção de resultados satisfatórios e dentro dos limites normalizados.

Palavras-chave

Metrologia; Alta Tensão; Impulso Atmosférico Cortado na Cauda.

Abstract

Santos, Lilian Ferreira; Barbosa, Carlos Roberto Hall (Advisor). **New Method for Estimating Tail Chopped Lightning Impulses Parameters.** Rio de Janeiro, 2016. 102p. MSc. Dissertation - Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

To evaluate existing over-voltage in an electrical system, it is important that the characteristics of each type of impulse are known. Each type of waveform represents a phenomenon that can occur in high voltage power equipment, which must be tested and certified in high voltage laboratories by standard procedures prior to its commissioning. The IEC 60060-1:2010 with regard to lightning impulse test, introduced as the main requirement the test voltage function, which involves digitally filtering the original impulse waveform and calculating the amplitude and time parameters from this filtered waveform, and it should be applied to Full Lightning Impulses (LI) and Tail Chopped Lightning Impulses (LIC). Currently, the analysis of LIC waveforms is possible only by prior application of a reference LI, thereby creating difficulties for the processing and analysis of waveforms. In this sense the main purpose of dissertation was to develop and validate an alternative method for treating the LIC waveforms which precludes the need for a full reference lightning impulse, in order to simplify this type of high voltage test. The tests were performed by means of experimental tests on low and high voltage, making a comparison between the two methods (defined by the standard and alternate) to obtain satisfactory results within the standard limits.

Keywords

Metrology; High Voltage; Tail Chopped Lightning Impulse.

Sumário

1 Introdução	16
1.1. Motivação	18
1.2. Objetivo	18
1.3. Estrutura da Dissertação	18
2 Ensaaios de Alta Tensão	20
2.1. O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel)	21
2.2. Impulsos de Alta Tensão	21
2.2.1. Formação do impulso e suas características	24
2.2.2. Tipos de Impulso de Tensão	27
2.2.2.1. Impulso atmosférico pleno (IAP)	27
2.2.2.2. Impulso atmosférico cortado na frente (IACF)	29
2.2.2.3. Impulso atmosférico cortado na cauda (IACC)	30
2.2.2.4. Impulso de Manobra (IM)	31
2.3. Normalização em alta tensão	33
2.3.1. Organismos	35
2.3.2. Normas Aplicáveis a Ensaaios de Alta Tensão	36
2.3.2.1. IEC 60060-1:2010 principais alterações	36
2.3.2.2. IEC 60060-2:2010 principais alterações	39
2.3.2.3. IEC 61083-1:2001	40
2.3.2.4. IEC 61083-2:2013	41
2.4. Sistema de medição	42
2.4.1. Sistema de medição de impulso de alta tensão	46
2.4.1.1. Divisores de alta tensão	49
2.4.1.2. Registradores digitais para medições de impulsos	51
2.4.2. IMPREAL	52
3 Impulso Atmosférico Cortado na Cauda	55
3.1. Procedimento de ensaio	56
3.2. Metodologia atual de estimativa de parâmetros	58

3.3. Nova Metodologia para análise de IACC	59
3.3.1. Descrição	59
4 Ensaios experimentais	61
4.1. Ensaios em baixa tensão (BT)	61
4.1.1. Variação no overshoot β	62
4.1.2. Variação no tempo de corte T_c	65
4.2. Ensaios em alta tensão (AT)	73
4.3. Resultados comparativos	79
4.3.1. Resultados em baixa tensão (BT)	79
4.3.1.1. Variação no overshoot β	79
4.3.1.1.1. Análise dos resultados para IACC com variação no overshoot β	82
4.3.1.2. Variação no tempo de corte T_c	82
4.3.1.2.1. Análise dos resultados para IACC com variação no T_c	87
4.3.2. Resultados em alta tensão (AT)	87
4.3.2.1. Transformador de distribuição	87
4.3.2.1.1. Análise dos resultados para ensaio de tensão suportável sob impulso	89
5 Discussão e conclusões	90
Referências Bibliográficas	92
Anexo 1 – Artigo XXI World Congress “Measurement in Research and Industry” (IMEKO)	94
Anexo 2 – Artigo 8º Congresso Brasileiro de Metrologia (CBM) - XI Congresso Internacional de Metrologia Elétrica (Semetro)	99

Lista de figuras

Figura 1 - Impulso atmosférico em cadeia de isoladores poliméricos.	23
Figura 2 - Gerador de Impulso (Laboratórios AT1 e CA2 – Cepel)	25
Figura 3 – Diagrama elétrico típico de um gerador de impulso representando 01 estágio do gerador, onde, C_S = capacitância do impulso, R_P = resistência paralela ou resistor de cauda, R_S = resistência série ou resistor de frente, L_S = Indutância série total e R_L , C_L , L_L = Carga (corpo de prova, divisor, etc.).	25
Figura 4 - Variação da amplitude do impulso em relação ao valor do resistor de frente para os impulsos atmosféricos plenos e manobra ($R_{s3} < R_{s2} < R_{s1}$), onde: (a) representa as tolerâncias no tempo de frente de $\pm 30\%$ para um impulso atmosférico pleno ($T_{Rs1} = 0,84 \mu s$, $T_{Rs2} = 1,2 \mu s$ e $T_{Rs3} = 1,56 \mu s$) e (b) representa as tolerâncias no tempo de frente de $\pm 20\%$ para um impulso de manobra ($T_{Rs1} = 200 \mu s$, $T_{Rs2} = 250 \mu s$ e $T_{Rs3} = 300 \mu s$).	26
Figura 5 - Variação do resistor de cauda de impulso para os impulsos atmosféricos plenos e manobra ($R_{p3} < R_{p2} < R_{p1}$), onde: (a) representa as tolerâncias no tempo de cauda de $\pm 20\%$ para um impulso atmosférico pleno ($T_{Rs1} = 40 \mu s$, $T_{Rs2} = 50 \mu s$ e $T_{Rs3} = 60 \mu s$) e (b) representa as tolerâncias no tempo de cauda de $\pm 60\%$ para um impulso de manobra ($T_{Rs1} = 1000 \mu s$, $T_{Rs2} = 2500 \mu s$ e $T_{Rs} = 4000 \mu s$).	27
Figura 6 – Impulso atmosférico pleno normalizado	28
Figura 7 – Impulso atmosférico cortado na frente	29
Figura 8 – Impulso atmosférico cortado na cauda	31
Figura 9 – Impulso de manobra	32
Figura 10 – Semelhança de triângulos.	34
Figura 11 – Função tensão de ensaio.	37
Figura 12 – Curva registrada e base mostrando sobrelevação e curva residual.	38

Figura 13 – Curva de tensão de ensaio (adição da curva base e curva residual filtrada).	38
Figura 14 – Curvas da tensão registrada e da tensão de ensaio.	39
Figura 15 – Níveis de referência para caracterização da faixa de utilização de um SMA	40
Figura 16 – Componentes básicos de um sistema de medição utilizado em alta tensão.	43
Figura 17 – Estrutura para rastreabilidade dos Sistemas de Medição de Alta tensão, onde, P.N. = padrão nacional - baixa tensão, SMRA = Sistema de Medição de Referência Acreditado, SMR = Sistema de Medição de Referência, SMA = Sistema de Medição Aprovado e D.P. IEC = Dispositivo Padronizado pela IEC.	44
Figura 18 – Hierarquia de um equipamento de medição utilizado para ensaios de alta tensão, que são rastreados aos padrões de medição mantidos no Instituto Nacional de Metrologia (INM).	45
Figura 19 – Diagrama elétrico do sistema de medição completo.	47
Figura 20 – Método de referência para aprovação de um SM de impulso de tensão.	48
Figura 21 – Circuitos simplificados dos diferentes tipos de arranjo de divisores de alta tensão (DVAT).	49
Figura 22 – Detalhes da estrutura de um divisor resistivo para medição de impulso atmosférico e seus componentes.	50
Figura 23 – Divisor resistivo para medição de impulso atmosférico.	50
Figura 24 – Tipos de gravadores digitais para medição de impulso de alta tensão, sendo (a) osciloscópio digital, (b) digitalizador Hias 743 e (c) digitalizador HBM ISOBE 5600.	51
Figura 25 – Interface inicial do software IMPREAL 2.0.	53
Figura 26 – Interface de aquisição do software IMPREAL 2.0.	54
Figura 27 – Interface de análise LIC (IACC) do software IMPREAL 2.0.	54
Figura 28 – Esferas de corte ou chopping gap.	55
Figura 29 – Forma de onda LIC M4.	57
Figura 30 – Forma de onda LIC M5.	57
Figura 31 – Forma de onda positiva do IACC apresentando o	

ajuste da exponencial dupla e a aplicação do filtro digital.	60
Figura 32 – Resultado final da forma de onda do IACC apresentando as formas de onda original e de ensaio.	60
Figura 33 – Recurrent Surge Generator RSG 482, da Haefely.	62
Figura 34 – Medição das formas de onda padrão LIC-M4, para três níveis de <i>overshoot</i> (a) 0%, (b) 4% e (c) 20%.	63
Figura 35 – Medição das formas de onda padrão LIC-M5, para três níveis de <i>overshoot</i> (a) 0%, (b) 15% e (c) 20%.	64
Figura 36 – Medição das formas de onda padrão LIC-M4 com 0% de <i>overshoot</i> , para: (a) $T_c = 2,862 \mu s$, (b) $T_c = 3,521 \mu s$, (c) $T_c = 4,502 \mu s$, (d) $T_c = 5,333 \mu s$ e (e) 5º $T_c = 6,116 \mu s$.	65
Figura 37 – Medição das formas de onda padrão LIC-M4 com 16% de <i>overshoot</i> , para: (a) $T_c = 2,648 \mu s$, (b) $T_c = 3,503 \mu s$, (c) $T_c = 4,508 \mu s$, (d) $T_c = 5,428 \mu s$ e (e) 5º $T_c = 6,112 \mu s$.	67
.	67
Figura 38 – Medição das formas de onda padrão LIC-M5 com 0% de <i>overshoot</i> , para: (a) $T_c = 2,272 \mu s$, (b) $T_c = 3,915 \mu s$, (c) $T_c = 5,030 \mu s$, (d) $T_c = 7,274 \mu s$ e (e) 5º $T_c = 9,222 \mu s$.	69
Figura 39 – Medição das formas de onda padrão LIC-M5 com 16% de <i>overshoot</i> , para: (a) $T_c = 2,347 \mu s$, (b) $T_c = 3,828 \mu s$, (c) $T_c = 5,065 \mu s$, (d) $T_c = 7,044 \mu s$ e (e) 5º $T_c = 9,017 \mu s$.	71
Figura 40 – Transformador de distribuição.	74
Figura 41 – Circuito de ensaio.	75
Figura 42 – Formas de onda obtidas durante o ensaio do transformador 1.	77
Figura 43 – Formas de onda obtidas durante o ensaio do transformador 2.	78
Figura 44 – Formas de onda obtidas para ensaios de IACC baseados na LIC-M4, utilizando-se três diferentes níveis de <i>overshoot</i> .	80
Figura 45 – Formas de onda obtidas para ensaios de IACC baseados na LIC-M5, utilizando-se três diferentes níveis de <i>overshoot</i> .	81
Figura 46 – Formas de onda obtidas por meio de ensaios de IACC baseados na forma de onda padrão LIC-M4, sem <i>overshoot</i> e com	

variação no tempo de corte.	82
Figura 47 – Formas de onda obtidas por meio de ensaios de IACC baseados na forma de onda padrão LIC-M4, com <i>overshoot</i> e com variação no tempo de corte.	84
Figura 48 – Formas de onda obtidas por meio de ensaios de IACC baseados na forma de onda padrão LIC-M5, sem <i>overshoot</i> e com variação no tempo de corte.	85
Figura 49 – Formas de onda obtidas por meio de ensaios de IACC baseados na forma de onda padrão LIC-M5, com <i>overshoot</i> e com variação no tempo de corte.	86
Figura 50 – Formas de onda referente aos ensaios de IACC realizados com o Trafo 1, apresentando a curva original e a tensão de ensaio cortadas no instante do colapso de tensão.	87
Figura 51 – Formas de onda referente aos ensaios de IACC realizados com o Trafo 2, apresentando a curva original e a tensão de ensaio cortadas no instante do colapso de tensão.	88

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tipos de impulsos de tensão aplicados aos ensaios de acordo com o nível de tensão do equipamento	24
Tabela 2 – Exemplo de formas de onda, valores de referência e limites de aceitação para os parâmetros de impulsos IAC definidos pela norma IEC 61083-2:2013	42
Tabela 3 – Características de um SMR (Padrão utilizado na calibração de SMA ou outros SMRs).....	48
Tabela 4 – Características de um SMA	48
Tabela 5 – Intervalos de aceitação para IACC de acordo com a norma 61083-2:2013	57
Tabela 6 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M4.....	63
Tabela 7 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M5.....	64
Tabela 8 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M4, com 0% de <i>overshoot</i>	66
Tabela 9 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M4, com 16% de <i>overshoot</i>	68
Tabela 10 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M5, com 0% de <i>overshoot</i>	70
Tabela 11 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M5, com 16% de <i>overshoot</i>	72
Tabela 12 - Informações nominais contidas na placa do transformador 1 testado em laboratório.....	73
Tabela 13 – Informações nominais contidas na placa do transformador 2 testado em laboratório.....	73

Tabela 14 – Resultados obtidos no ensaio de tensão suportável para o transformador 1.	77
Tabela 15 – Resultados obtidos no ensaio de tensão suportável para o transformador 2.	78
Tabela 16 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para os ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M4, positivas com variação no nível do <i>overshoot</i>	80
Tabela 17 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para os ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M5, positivas com variação no nível do <i>overshoot</i>	81
Tabela 18 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M4 sem <i>overshoot</i> e com variação no tempo de corte.	83
Tabela 19 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M4 com <i>overshoot</i> e com variação no tempo de corte.	84
Tabela 20 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M5 sem <i>overshoot</i> e com variação no tempo de corte.	85
Tabela 21 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M5 com <i>overshoot</i> e com variação no tempo de corte.	86
Tabela 22 – Resultado da comparação entre os parâmetros estimados pelos dois métodos, a partir das formas de onda apresentadas na figura 48.	88
Tabela 23 – Resultado da comparação entre os parâmetros estimados pelos dois métodos, a partir das formas de onda apresentadas na figura 49.	89

1

Introdução

Algumas características elétricas dos equipamentos de alta tensão são determinadas pelas sobretensões as quais os mesmos estarão submetidos. Os estudos relacionados aos possíveis impactos de sobretensões em um sistema elétrico é um dos objetivos mais importantes no que se refere a análise transitória, tais fenômenos são geralmente causados por distúrbios de grande relevância, originando a propagação e geração de surtos no sistema. Devido à operação de inúmeros tipos de equipamentos de proteção e perdas ocasionadas pelas variadas configurações da rede elétrica estes surtos de tensão podem induzir diversas formas de onda nos sistemas de alta tensão. Esses surtos são caracterizados por ondas eletromagnéticas de curta duração, com frentes íngremes sendo originadas por descargas atmosféricas ou manobras. O surto de tensão gerado por descargas atmosféricas é de origem externa, com frentes de onda da ordem de frações de microssegundos e podendo durar poucas centenas de microssegundos. Por outro lado, os surtos de manobra são de origem interna, possuindo frentes de onda da ordem de dezenas de microssegundos e podendo durar alguns ciclos de frequência fundamental.

Os equipamentos de alta tensão precisam ser testados e certificados em laboratórios de alta tensão por meio de procedimentos normalizados, antes de seu comissionamento. O laboratório de Referência de Medição em Alta Tensão (CA2), pertencente ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), é o primeiro e único laboratório acreditado na Rede Brasileira de Calibração (RBC) de acordo com a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 [1], de modo a poder realizar calibrações de sistemas de medição de impulsos de alta tensão, até 500 kV. O reconhecimento da competência técnica do laboratório contribui para o aumento do número de laboratórios de alta tensão (AT) acreditados na RBC e, desta forma, garante a confiabilidade dos resultados de ensaios realizados para o sistema elétrico brasileiro.

As perspectivas de transmissão de energia em Ultra Alta Tensão (UAT), com 1200 kV CA e aproximadamente 1000 kV CC, requer uma nova infra-estrutura laboratorial para ensaios em equipamentos utilizados em UAT no país. As instalações

atuais tanto para fornecedores como para laboratórios de pesquisas, em sua grande maioria, estão limitadas a tensão de 765 kV para CA e 600 kV para CC [15]. A construção de novos laboratórios para atender aos sistemas de Ultra Alta Tensão (UAT) requer cada vez mais estudos relacionados a padrões para equipamentos além de técnicas de ensaio e medição. Consequentemente, com o aumento dos níveis de tensão para sistemas de transmissão CA e CC algumas adaptações e alterações das normas existentes tornam-se necessárias.

No final de 2010, a IEC emitiu a terceira revisão técnica das normas 60060-1, cancelando e substituindo a segunda edição de 1989 [2], e 60060-2, cancelando e substituindo a segunda edição de 1994 [3]. Uma das principais alterações de ordem técnica relacionada à edição anterior da norma IEC 60060-1 foi a inclusão de um novo método para o cálculo dos parâmetros de tempo das formas de onda na presença de oscilações e *overshoot*, utilizando a função de tensão de ensaio $k(f)$. Este método envolve filtrar digitalmente a forma de onda original do impulso e calcular os parâmetros de tempo e amplitude a partir do sinal filtrado, devendo ser aplicado aos Impulsos Atmosféricos Plenos (IAP) e Impulsos Atmosféricos Cortados na Cauda (IACC).

Praticamente todos os ensaios envolvendo equipamentos de alta tensão com grandes dimensões tem a presença de *overshoot*, que é causado principalmente por um circuito LC formado pela indutância do condutor de alta tensão e pela capacitância do objeto sob ensaio, bem como por capacitâncias parasitas intrínsecas do arranjo de ensaio. Tal circuito produz o *overshoot* na crista da onda do impulso, sendo de difícil compensação [4].

Atualmente, a análise das formas de onda de IACC só é possível mediante aplicação prévia de um IAP de referência, criando dificuldades para os ensaios e processamento das formas de onda. Deste modo, esta dissertação foca no desenvolvimento de uma nova metodologia para estimativa de parâmetros de impulsos atmosféricos cortados na cauda, com base em ensaios experimentais com diferentes formas de onda, calculando os parâmetros relevantes (valor da tensão de ensaio U_t , tempo de frente T_1 e o tempo de corte T_c). Os trabalhos realizados visam contribuir para a capacitação e adequação dos laboratórios de alta tensão (AT) e ultra alta tensão (UAT) do Cepel, auxiliando nas técnicas de ensaios e medições realizados com impulsos.

1.1. Motivação

Simplificar os procedimentos para execução dos ensaios realizados a fim de se obter os parâmetros de interesse para Impulsos Atmosféricos Cortados na Cauda (IACC), de forma a reduzir o tempo demandado para realização dos ensaios, além de reduzir o estresse ao qual o objeto sob ensaio é submetido.

1.2. Objetivo

O objetivo desta dissertação é descrever um novo método desenvolvido para estimar os parâmetros de Impulsos Atmosféricos Cortados na Cauda (IACC), onde, ao contrário da metodologia atual, não será mais necessária uma aplicação prévia de um impulso atmosférico pleno padronizado.

Desta forma, este novo método tem como principal objetivo substituir a atual metodologia de medição para IACC.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação de mestrado estrutura-se nos seguintes seis capítulos:

O **capítulo 1** contém Introdução, motivação, contexto, problematização, objetivo, conceitos básicos e a estrutura da dissertação.

No **capítulo 2** são abordados os tipos de ensaios em alta tensão com foco nos ensaios de impulsos (formação, características e tipos de impulsos), normalização, organismos e normas, sistema de medição, divisores de alta tensão e registradores digitais para medições de impulso.

No **capítulo 3** é feita uma descrição mais detalhada dos Impulsos Atmosféricos Cortados na Cauda (IACC), abordando os procedimentos para esse tipo de ensaio de alta tensão, a metodologia atual de estimativa de parâmetros e o *software* IMPREAL, previamente desenvolvido para aquisição e análise de impulsos de tensão.

Por sua vez, no **capítulo 4** são descritos os conceitos teóricos vistos nos capítulos anteriores, sendo que aqui os mesmos são vistos de forma prática por meio de ensaios experimentais em baixa tensão (BT) e alta tensão (AT), variando principalmente os níveis de *overshoot* e tempo de corte T_c , com a finalidade de testar a robustez do novo método proposto.

O trabalho proposto é então detalhado no **capítulo 5** por meio da descrição clara da nova metodologia para análise de IACC, bem como dos resultados obtidos. É feita uma comparação entre os dois métodos (definido por norma e alternativo) por meio do cálculo da diferença percentual entre os parâmetros estimados pelos dois métodos.

Por fim, no **capítulo 6** são relatadas as principais discussões e conclusões obtidas por meio das análises dos resultados dos ensaios experimentais e da comparação entre os dois métodos para medição de IACC. Também são apresentadas propostas de trabalhos futuros.

Os equipamentos elétricos de alta tensão precisam ser ensaiados e aprovados antes de estarem aptos a serem instalados no sistema elétrico de potência, sendo estes ensaios realizados em laboratórios industriais dos próprios fabricantes, em laboratórios de pesquisa, diretamente no campo ou em laboratórios de ensaio construídos especificamente para a sua aprovação. Estes equipamentos de sistemas de potência devem suportar não somente a tensão nominal, mas também sobretensões, tornando-se, portanto, necessário ensaiar um equipamento de alta tensão durante o seu desenvolvimento e antes do seu comissionamento. O tipo da tensão de ensaio e a amplitude variam com a tensão nominal do equipamento específico e com suas condições de operação, sendo que as técnicas básicas de ensaio de alta tensão em corrente alternada (ATCA), alta tensão em corrente contínua (ATCC), impulsos de alta tensão (atmosférico e manobra), impulsos de corrente, bem como os métodos utilizados para a medição das grandezas envolvidas, estão prescritos nas normas nacionais e internacionais específicas de cada equipamento, sendo a norma internacional sobre técnicas de alta tensão em geral a IEC 60060-1.

Alguns ensaios mais comuns são: [12]

- Suportabilidade a alta tensão CC, CA, impulsos de manobra e atmosféricos, podendo estes ensaios serem realizados sob chuva artificial, a seco e sob poluição artificial.
- Perfuração de isoladores;
- Tensão de radio-interferência;
- Descargas parciais;
- Elevação de temperatura;
- Impulsos de corrente;
- Perdas em transformadores e reatores, etc.

Tais ensaios requerem medições de tensão e corrente, sendo os resultados destas medições a base para análise e avaliação do desempenho dinâmico dos equipamentos.

Assim, é de suma importância a utilização de sistemas de medição adequados, em termos de linearidade, exatidão, desempenho dinâmico e estabilidade, para as diferentes características e tipos de grandezas a serem medidas.

2.1.

O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel)

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

O Cepel possui um complexo de 34 laboratórios equipados com instalações para a realização de pesquisa experimental e ensaios normalizados, sendo vários desses laboratórios pioneiros no Brasil e alguns deles únicos na América do Sul. Algumas das principais especialidades envolvidas são: alta tensão, alta potência, alta corrente, medição e calibração, eficiência energética, materiais, análise química, supercondutividade, etc.

O Cepel possui infraestrutura laboratorial com grande variedade de serviços de ensaios, medição e calibração e vem formando, ao longo das últimas três décadas, equipes de técnicos e especialistas com amplo conhecimento em técnicas de alta tensão garantindo, num curto espaço de tempo, a operação satisfatória das novas instalações laboratoriais em Ultra Alta Tensão.

2.2.

Impulsos de Alta Tensão

Embora o sistema elétrico, em grande parte do tempo opere sem consideráveis oscilações na rede, o mesmo deve ser capaz de suportar qualquer demanda elevada de energia, geralmente originada durante uma situação transitória no sistema elétrico.

Os distúrbios de tensão em redes de energia elétrica são geralmente o reflexo de dois tipos de sobretensões transitórias, as quais são normalmente consideradas em ensaios de impulso de alta tensão, sendo estas: sobretensões de origem externa e sobretensões de origem interna. Os impulsos de tensão são aplicados com o principal objetivo de determinar o efeito dessas sobretensões em instalações elétricas ou em algum de seus componentes individuais. [9]

No primeiro tipo de sobretensão, de origem externa, a tensão é gerada por descargas atmosféricas que atingem os condutores das linhas de transmissão (LT) ou os barramentos das subestações não abrigadas, de forma direta (quando incidem nos condutores) ou indireta (quando ocorrem nas vizinhanças das linhas ou das SEs). As sobretensões relacionadas a tais descargas são caracterizadas por uma corrente relativamente alta fluindo durante um intervalo de tempo muito curto, sendo que a corrente de descarga atmosférica produz uma queda de tensão na linha de transmissão através da impedância efetiva entre a linha de transmissão e a terra.

As sobretensões de origem externa ocorrerem por meio de três processos diferentes:

1. **Tensão induzida** – ocorre quando a descarga atmosférica atinge o solo próximo à linha de transmissão.
2. **Falha na blindagem** – ocorre quando a descarga atinge diretamente o condutor de fase.
3. **Descarga de retorno** – ocorre quando a descarga atmosférica atinge a torre ou o cabo para-raio e, após um curto intervalo de tempo, ocorre um centelhamento entre a torre e o condutor, assumindo então o potencial do elemento atingido.

Os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, o efeito corona, os para-raios e as perdas existentes provocam o amortecimento e distorção das ondas propagantes, acarretando em sobretensões atmosféricas com diferentes tipos de formas de onda em um sistema de transmissão.

No segundo tipo de sobretensão, de origem interna, as sobretensões ocorrem devido a operações de manobra no sistema elétrico, tais como: energização, re-

fechamento, abertura pós-falha, falta de sincronização dos pólos dos disjuntores, etc. A norma ABNT NBR IEC 62271-102:2006 [6] define equipamentos de manobra como: "Dispositivos elétricos destinados a estabelecer ou interromper corrente elétrica, em um ou mais circuitos elétricos", como disjuntores e chaves.

As sobretensões originadas por impulsos de manobra têm as suas formas influenciadas pela impedância do sistema, bem como pelas condições de manobra e suas amplitudes, estando sempre relacionadas com a tensão de operação. A taxa de crescimento desse tipo de sobretensão é usualmente menor que a induzida por tensões atmosféricas, porém, atualmente sabe-se que as sobretensões de manobra possuem formas de onda e níveis de tensão que podem ser prejudiciais para diversos sistemas de isolamento.

Apesar da forma de onda real das sobretensões (atmosféricas e manobra) variarem bastante, é necessário que sejam simulados estes transitórios de tensão em laboratório, por meios relativamente simples e práticos aplicados aos equipamentos de alta tensão, com a finalidade de testar sua capacidade de isolamento. Atualmente, diversas normas nacionais e internacionais definem os impulsos de tensão como sendo uma tensão unidirecional que atinge rapidamente o valor de crista e em seguida decresce de forma relativamente lenta até zero. Na norma IEC 60060-1:2010 [7], adotada pela maioria dos países, uma distinção é feita entre os impulsos atmosféricos e os impulsos de manobra, de acordo com a origem do transitório. A figura 1 apresenta um exemplo de simulação de uma sobretensão atmosférica feita em um ensaio de cadeia de isoladores poliméricos no laboratório AT1 do Cepel.



Figura 1 - Impulso atmosférico em cadeia de isoladores poliméricos.

Conforme pode ser visualizado na tabela 1, é possível indicar o tipo de impulso de tensão que poderá ser aplicado dependendo do nível de tensão nominal do equipamento elétrico. Os surtos de manobra causam significativas falhas nos equipamentos elétricos com tensões nominais com magnitude acima de 245 kV, já ensaios com impulsos atmosféricos são aplicados a equipamentos elétricos com classe de tensão acima de 1 kV, devido estarem sujeitos a danos por descargas atmosféricas [8].

Tabela 1 – Tipos de impulsos de tensão aplicados aos ensaios de acordo com o nível de tensão do equipamento

Tipo de aplicação	Tensão nominal dos equipamentos
Impulso de manobra	Maior que 245 kV
Impulso atmosférico	Acima de 1 kV

2.2.1.

Formação do impulso e suas características

O impulso de tensão pode ser considerado como constituído pela soma de duas curvas exponenciais $e^{-\alpha t}$ e $e^{-\beta t}$, gerados por meio de um gerador de impulsos. O impulso $u_d(t)$ é definido na norma IEC 60060-1 [7] por meio da função exponencial apresentada em (1), onde: U é a constante de amplitude, t_d é o intervalo de tempo entre a origem da curva ajustada e o ponto de disparo (trigger) da curva registrada, τ_1 representa a taxa de descida da onda e τ_2 representa a taxa de subida da frente de onda.

$$u_d(t) = U \left(e^{\frac{-(t-t_d)}{\tau_1}} - e^{\frac{-(t-t_d)}{\tau_2}} \right), \quad (1)$$

Esse tipo de gerador (figura 2) tem como principal função simular impulsos de tensão que poderiam ocorrer em equipamentos presentes em uma linha de transmissão, por meio de um circuito simples proposto por Erwin Marx em 1923. O gerador é formado por um conjunto de capacitores, que são carregados em paralelo com uma tensão pré-estabelecida e, posteriormente, descarregados em série para gerar o impulso [9]. O impulso produzido é caracterizado por um rápido crescimento e lento

decaimento, sendo que suas características morfológicas podem ser ajustadas por meio dos resistores e capacitores utilizados na operação do gerador.



Figura 2 - Gerador de Impulso (Laboratórios AT1 e CA2 – Cepel)

O circuito elétrico de um gerador de impulsos é tipicamente composto por dois resistores (R_p e R_s) responsáveis pelo ajuste dos parâmetros de forma de onda, sendo um responsável pela frente do impulso e denominado resistor de frente de onda (R_s) e o outro responsável pela cauda do impulso, denominado resistor de cauda de onda (R_p). Esses dois resistores são responsáveis pela obtenção da forma de onda adequada para a realização de um determinado ensaio de impulso, seja ele atmosférico ou manobra.

A Figura 3 apresenta um diagrama elétrico típico de um gerador de impulso, mostrando os resistores R_p e R_s , descritos a seguir.

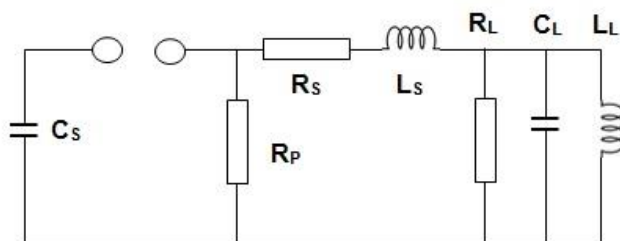


Figura 3 – Diagrama elétrico típico de um gerador de impulso representando 01 estágio do gerador, onde, C_s = capacitância do impulso, R_p = resistência paralela ou resistor de cauda, R_s = resistência série ou resistor de frente, L_s = Indutância série total e R_L , C_L , L_L = Carga (corpo de prova, divisor, etc.).

Em sua constituição básica estão os capacitores de impulso (C_s) construídos de modo a obter uma baixíssima indutância possibilitando sua operação com alta carga de

trabalho (são geralmente colocados em cada estágio do gerador dois capacitores ligados em série por sua carcaça), o resistor de cauda (R_p) está correlacionado com a capacitância do gerador (C_s), o resistor de frente (R_s) está intimamente ligado à indutância do circuito de impulsos e a sua carga capacitiva, e, por fim resistor de frente externo ao gerador é adicionalmente utilizado para melhorar as oscilações na forma de impulso atmosférico. Cada estágio do gerador é composto por capacitores, resistores e um *gap* (responsável pelo centelhamento das esferas), constituindo assim um circuito RC. Como citado anteriormente, o impulso é formado pelo carregamento e descarregamento do capacitor de carga C_L . Entretanto, os valores de cauda e frente dependerão diretamente dos respectivos resistores, paralelo e série.

- **Resistor de frente de impulso ou resistor série (R_s)** – este resistor está relacionado com a formação da frente de onda do impulso de tensão, estando intimamente ligado à indutância do circuito de geração do impulso e à carga capacitiva no circuito existente. Este resistor reduz as oscilações na frente do impulso atmosférico. Para melhorar as oscilações na forma de onda de impulso atmosférico, pode ser usado adicionalmente um resistor de frente externo ao gerador de impulso (nível de isolamento nominal de 300 kV por metro) [10]. A resistência de frente do circuito de impulso é proporcional ao tempo de frente e diretamente proporcional ao rendimento do gerador de impulso (η_{GI}), conforme indicado na figura 4.

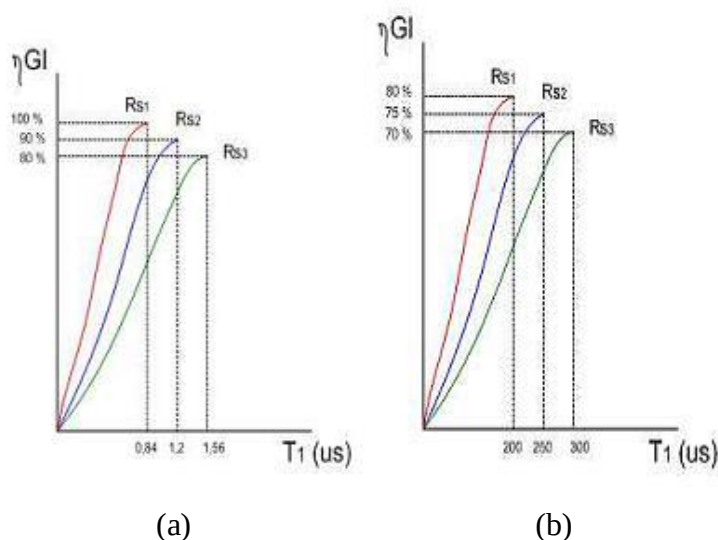


Figura 4 - Variação da amplitude do impulso em relação ao valor do resistor de frente para os impulsos atmosféricos plenos e manobra ($R_{s3} < R_{s2} < R_{s1}$), onde: (a) representa as tolerâncias no tempo de frente de $\pm 30\%$ para um impulso atmosférico pleno ($T_{Rs1} = 0,84 \mu s$, $T_{Rs2} = 1,2 \mu s$ e $T_{Rs3} = 1,56 \mu s$) e (b) representa as tolerâncias no tempo de frente de $\pm 20\%$ para um impulso de manobra ($T_{Rs1} = 200 \mu s$, $T_{Rs2} = 250 \mu s$ e $T_{Rs3} = 300 \mu s$).

- **Resistor de cauda de impulso ou resistor paralelo (R_p)** – este resistor está relacionado com a formação da cauda de onda do impulso de tensão, estando intimamente correlacionado com a capacitância do gerador e sendo também empregado no carregamento do gerador. O resistor de cauda é responsável por permitir uma melhor distribuição de tensão entre os estágios durante o carregamento do gerador, além de permitir a realização de conexões em paralelo, aumentando a flexibilidade do gerador. Este resistor afeta de modo diretamente proporcional o tempo de cauda, conforme apresentado na figura 5.

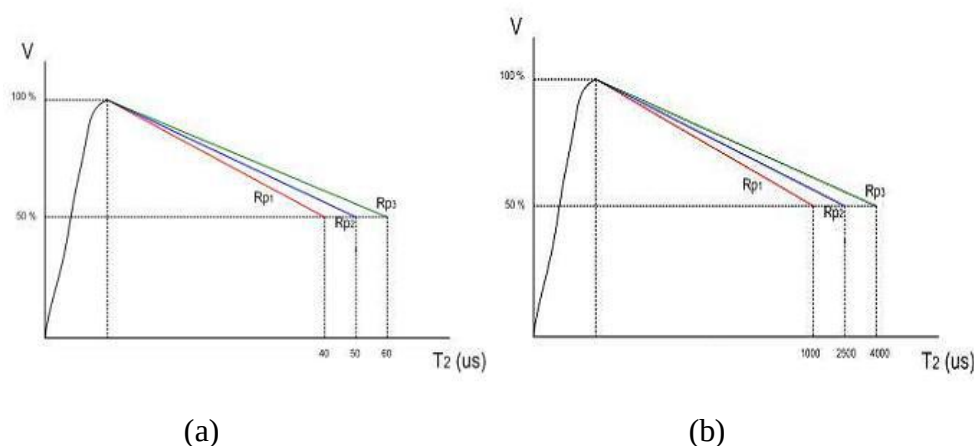


Figura 5 - Variação do resistor de cauda de impulso para os impulsos atmosféricos plenos e manobra ($R_{p3} < R_{p2} < R_{p1}$), onde: (a) representa as tolerâncias no tempo de cauda de $\pm 20\%$ para um impulso atmosférico pleno ($T_{Rs1}=40 \mu s$, $T_{Rs2}=50 \mu s$ e $T_{Rs3}=60 \mu s$) e (b) representa as tolerâncias no tempo de cauda de $\pm 60\%$ para um impulso de manobra ($T_{Rs1}=1000 \mu s$, $T_{Rs2}=2500 \mu s$ e $T_{Rs}=4000 \mu s$).

2.2.2. Tipos de Impulso de Tensão

2.2.2.1. Impulso atmosférico pleno (IAP)

Impulso atmosférico pleno é definido como um impulso de tensão que não é interrompido por uma descarga disruptiva [11], sendo representado por uma onda completa. A ocorrência de descargas disruptivas está associada à falha do isolamento do equipamento frente a uma perturbação elétrica.

Os IAPs têm a finalidade de simular falhas que se propagam por um determinado comprimento de linha de transmissão antes de atingirem um dado equipamento elétrico, ocasionando a variação do surto de tensão de zero até a crista e decaindo até o tempo de meio valor. Um comportamento similar pode ser representado por uma forma de onda

padronizada. A indução de maiores oscilações de tensão em uma forma de onda plena pode ser obtida por meio do incremento de sua duração. Entretanto, outras situações demandam maiores níveis de isolamento do equipamento elétrico [11].

Nas aplicações de impulso atmosférico pleno para ensaios normalizados de tensão (figura 6), o tempo virtual de frente T_1 padrão adotado é de $1,2 \mu s$ e o tempo virtual padrão até o meio valor T_2 é de $50 \mu s$, sendo normalmente referenciados como impulsos T_1/T_2 e conhecido como impulso normalizado de tensão de $1,2/50 \mu s$.

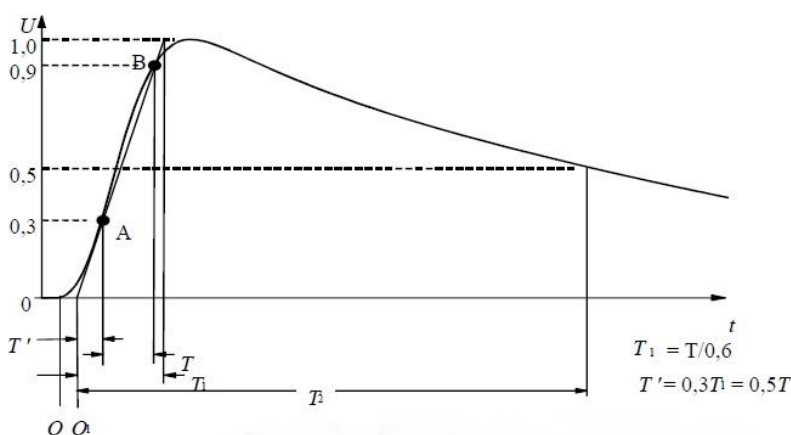


Figura 6 – Impulso atmosférico pleno normalizado

Considerando a Figura 6, os seguintes parâmetros definem um IAP:

- **O_1 (Origem virtual)** - é definida como o ponto onde a reta AB corta o eixo dos tempos, a origem virtual é o instante que precede o ponto A na curva da tensão de ensaio por um tempo de $0,3 T_1$. O ponto A é definido em 30% do nível de crista do impulso devido à dificuldade em se obter um registro desses impulsos sem distorções no início da frente de onda, sendo essas distorções quase sempre em forma de oscilações que podem ser causadas tanto por efeitos de indutâncias indesejadas presentes no circuito de ensaio como pelo próprio sistema de medição. O ponto B corresponde a 90% do valor de pico da curva de tensão.
- **T_1 (Tempo de frente)** - é um parâmetro virtual definido como 1,67 vezes o intervalo de tempo T entre os instantes correspondentes a 30 % e 90 % do valor de pico da curva da tensão de ensaio, pontos A e B. O parâmetro T_1 somente pode ser definido para formas de onda do tipo IAP e IAC cortados na crista ou na cauda, mas não para IACs cortados na frente.

- **T_2 (Tempo até o meio valor)** - é um parâmetro virtual definido como o intervalo de tempo entre a origem virtual (O_1) e o instante em que a curva da tensão de ensaio diminui até a metade do seu valor de crista (T_2).

As seguintes tolerâncias são aceitas pela norma IEC 60060-1 [11] para os parâmetros T_1 e T_2 :

- Tempo de frente (T_1) - $\pm 30\%$ (0,84 até 1,56 μs)
- Tempo de cauda (T_2) - $\pm 20\%$ (40 até 60 μs)

2.2.2.2.

Impulso atmosférico cortado na frente (IACF)

Um impulso atmosférico cortado na frente, ilustrado na figura 7, é definido como um impulso de tensão durante o qual uma descarga disruptiva causa um rápido colapso de tensão, levando o seu valor praticamente a zero. Os impulsos atmosféricos cortados na frente (figura 7) simulam a condição em que uma sobretensão atinge um ponto muito próximo ou diretamente os terminais de um equipamento, como um transformador por exemplo. Desta forma, provoca-se uma disrupção no equipamento atingido, devido ao elevado nível de tensão. Este tipo de impulso caracteriza-se por possuir tempo de duração menor, porém elevada taxa de variação.

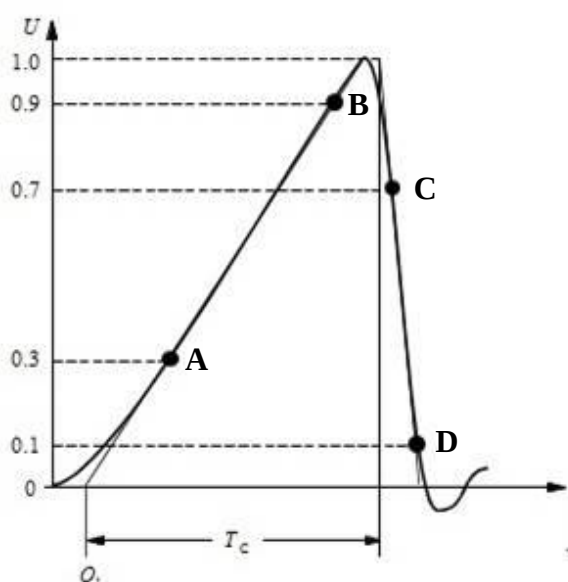


Figura 7 – Impulso atmosférico cortado na frente

Considerando a Figura 7, os seguintes parâmetros definem um IACF:

- **O₁ (Origem virtual)** - mesma definição para todos os tipos de forma de onda de impulso atmosférico (IAP, IACF e IACC).
- **U (Valor da tensão de ensaio)** - Valor máximo da curva de tensão de ensaio medido a partir do nível-base na mesma sensibilidade que o impulso aplicado.
- **Instante de corte** - é o instante em que a extrapolação da linha entre 70% e 10%, pontos (C e D) sobre a descarga disruptiva, corta o nível imediatamente antes da disrupção.
- **T_c (Tempo de corte)** -. para impulsos cortados na frente o tempo análogo a T₁ é denominado tempo de corte T_c.

A seguinte tolerância é aceita pela norma IEC 60060-1 [11] para o parâmetro T_c:

- Tempo de corte (T_c): $0,5 \mu s < T_c < 0,9 \mu s$

2.2.2.3.

Impulso atmosférico cortado na cauda (IACC)

Os impulsos atmosféricos cortados na cauda (figura 8) ocorrem em decorrência do rompimento do isolamento em pontos específicos do circuito, resultando, em ondas com uma grande variação da amplitude de tensão. Têm por finalidade simular o caso em que a crista da sobretensão penetra por completo nos terminais de um transformador, provocando posteriormente uma disrupção em um isolante próximo da linha de transmissão. Impulsos cortados na cauda, ao contrário dos impulsos plenos, não produzem fortes oscilações, porém, possuem amplitudes superiores, gerando tensões mais elevadas.

O termo cortado na cauda é utilizado a fim de distingui-lo de um impulso cortado na frente, que possui um tempo de corte na faixa de $0,5 \mu s$ até $0,9 \mu s$. Por sua vez, IACCs apresentam tempos de corte de $2 \mu s$ até $5 \mu s$.

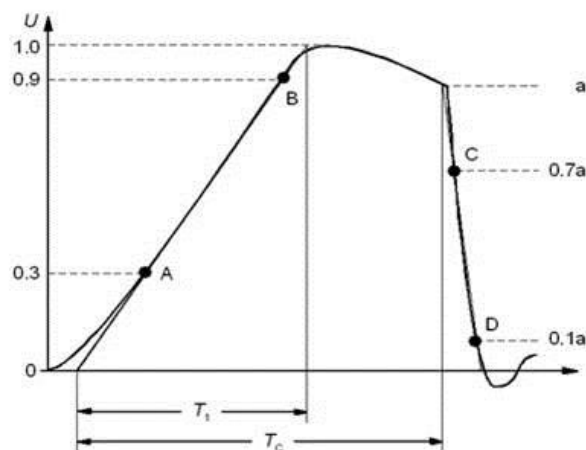


Figura 8 – Impulso atmosférico cortado na cauda

Considerando a Figura 8, os seguintes parâmetros definem um IACC:

- **T_1 (Tempo de frente)** - mesma definição utilizada para a forma de onda de impulso atmosférico pleno (IAP).
- **Instante de corte** - mesma definição utilizada para a forma de onda de impulso atmosférico cortado na frente (IACF).
- **T_c (Tempo de corte)** - é um parâmetro virtual definido como o intervalo de tempo entre a origem virtual O_1 e o instante do corte.

As seguintes tolerâncias são aceitas pela norma IEC 60060-1 [11] para os parâmetros T_1 e T_c :

- Tempo de frente (T_1) - $\pm 30\%$ (0,84 até 1,56 μs)
- Tempo de corte (T_c) - $2\ \mu s < T_c < 5\ \mu s$

2.2.2.4.

Impulso de Manobra (IM)

Embora os impulsos de manobra (figura 9) também sejam sobretensões rápidas na rede, esse tipo de sobretensão possui uma maior duração comparada às atribuídas a sobretensões atmosféricas. Impulsos de manobra possuem também formas de onda normalizadas objetivando sua utilização em ensaios elétricos para promover a análise de diferentes tipos de equipamentos. Por estas formas de onda possuírem um

comportamento mais aleatório que o apresentado por impulsos atmosféricos, dependendo de fatores como nível de tensão aplicado em ensaios e existência de materiais condutores próximos aos equipamentos ensaiados, descargas elétricas perigosas podem ocorrer em diversos locais do laboratório.

De forma padronizada, esse tipo de impulso possui um tempo de crista (T_p) com duração de 250 μ s e tempo de cauda (T_2) com 2500 μ s, sendo conhecido como impulso de manobra padronizado de 250/2500 μ s. Devido a estes parâmetros de tempo possuírem valores elevados, não há necessidade prática de se definir uma origem virtual para o impulso de manobra [12].

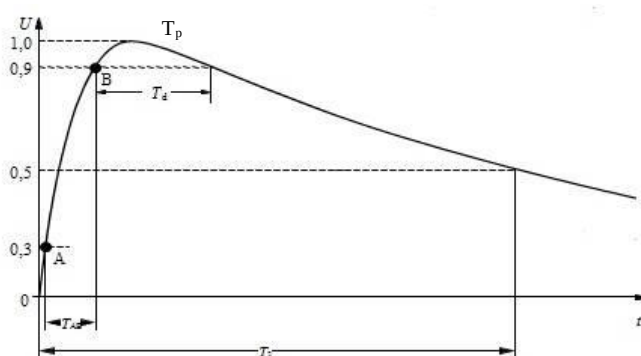


Figura 9 – Impulso de manobra

Considerando a Figura 9, os seguintes parâmetros definem um IM:

- **O (Origem real)** – é o instante em que a curva começa a registrar um aumento (monotônico) ou diminuição da onda.
- **T_p (Tempo de pico)** – é o intervalo de tempo entre a origem real (O) e o instante em que a tensão atinge seu valor máximo (T_p). As diferenças nas definições de um impulso de manobra em relação ao impulso atmosférico podem ser melhor entendidas enfatizando a escala de tempo.
- **T_d (Tempo acima de 90%)** – é o intervalo de tempo em que a tensão do impulso está acima de 90% da tensão de ensaio.
- **T_2 (Tempo até o meio valor)** - é um parâmetro virtual definido como o intervalo de tempo entre a origem real (O) e o instante em que a curva da tensão de ensaio diminui até a metade do seu valor de crista (T_2).

As seguintes tolerâncias são aceitas pela norma IEC 60060-1 [11] para os parâmetros T_p e T_2 :

- Tempo de frente (T_p) - $\pm 20 \%$ (200 até 300 μs)
- Tempo de cauda (T_2) - $\pm 60 \%$ (1000 até 4000 μs)

2.3.

Normalização em alta tensão

Com o desenvolvimento das técnicas de ensaio de impulsos, diversas universidades e centros de pesquisas deram início ao estudo e exploração desse novo ramo científico, porém, os resultados obtidos por diferentes grupos não poderiam ser comparados pelo fato dos impulsos serem aplicados sem padronização.

Em 1933, o Comitê da AIEE (*American Institute of Electrical Engineers*) recomendou que, quando possível, o ensaio de impulso atmosférico fosse realizado com as seguintes formas de onda, onde se relacionam tempo de frente / tempo de cauda: 1 μs /5 μs , 1 μs /10 μs e 1,5 μs /40 μs [13].

Para que todas as finalidades fossem atendidas, as associações nacionais e internacionais para normalização optaram então por escolher uma padronização para a realização de impulsos. Com base nas tolerâncias apresentadas pelos valores indicados pela IEC, foi então decidido pelas associações a sua utilização, normalizando-se a forma de impulso com os valores abaixo, sendo estes medidos a partir da origem virtual O_1 e definidos da seguinte forma:

- Forma de onda padronizada 1,2 μs / 50 μs ;
- tempo de frente igual a 1,67 vezes o intervalo de tempo compreendido entre os instantes que correspondem a 30% e 90% do valor da tensão de crista, definido numericamente a partir da semelhança de triângulos mostrada na figura 10;
- origem virtual determinada pelo encontro da reta que une os pontos que representam 30% e 90% do valor de crista com o eixo horizontal;

- tempo de cauda é o intervalo compreendido entre a origem virtual e o instante quando a tensão atinge 50% do valor de crista, após passar pela crista do impulso.

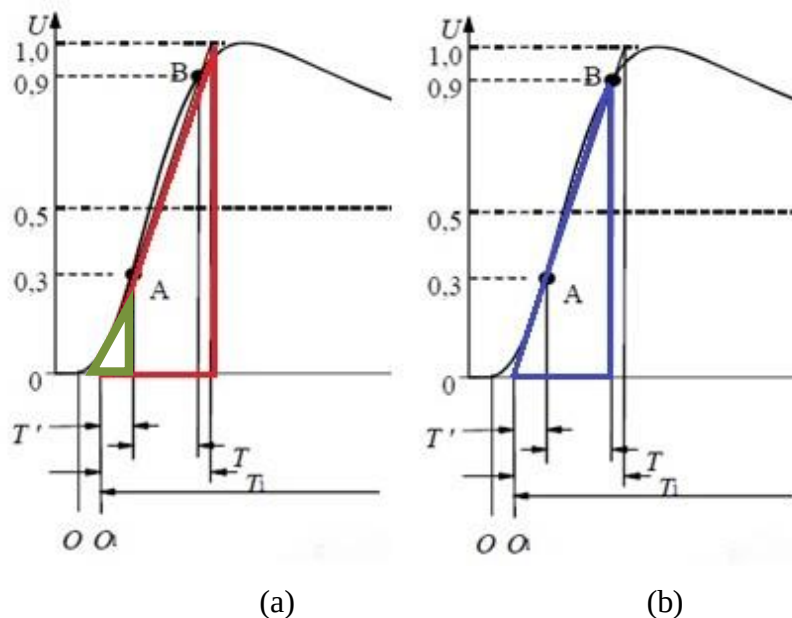


Figura 10 – Semelhança de triângulos.

Considerando a semelhança dos triângulos figura 10 (a) e 10 (b), pode-se escrever

$$\frac{T'}{0,3} = \frac{T' + T}{0,9} \rightarrow 3T' = T' + T \rightarrow 2T' = T \rightarrow T' = 0,5 T \quad (2)$$

$$\frac{T_1}{1} = \frac{T' + T}{0,9} \rightarrow T_1 = \frac{T + 0,5 T}{0,9} \rightarrow T_1 = \frac{1,5 T}{0,9} \therefore T_1 = 1,67 T \quad (3)$$

A IEC estabelece margens de tolerância que foram aceitas pelas demais normas, que passaram a adotar faixas de aceitação para os tempos de frente e de cauda, conforme definidos pela IEC. Desta forma, foram constituídos os seguintes grupos de valores, utilizados na aprovação de impulsos atmosférico e de manobra:

- **Impulso atmosférico**

- Tolerâncias para tempo de frente: $\pm 30\%$
- Tolerâncias para tempo de cauda: $\pm 20\%$
- Faixa de aceitação para tempo de frente $0,84 \mu s \leq T_f \leq 1,56 \mu s$
- Faixa de aceitação para tempo de cauda $40 \mu s \leq T_c \leq 60 \mu s$

- **Impulso de manobra**

- Tolerâncias para tempo de frente: $\pm 20\%$
- Tolerâncias para tempo de cauda: $\pm 60\%$
- Faixa de aceitação para tempo de frente: $200 \mu s \leq T_f \leq 300 \mu s$
- Faixa de aceitação para tempo de cauda: $1000 \mu s \leq T_c \leq 4000 \mu s$

A qualificação e aprovação final, a partir dos resultados de ensaios normalizados feitos em laboratórios, requerem a calibração de todos os sistemas de medição que são utilizados nestes ensaios, preferencialmente por meio de procedimentos normalizados e reconhecidos, com o objetivo de garantir a rastreabilidade, qualidade e confiabilidade das medições de alta tensão.

2.3.1.

Organismos

No âmbito internacional, dois organismos de normalização estão relacionados com os organismos previstos no modelo brasileiro, sendo eles chamados de organismos de normalização internacionais: a *International Organization for Standardization* (ISO) e a *International Electrotechnical Commission* (IEC). Todas as normas, nacionais ou internacionais, dispõem de uma terminologia específica e são revistas sempre que necessário.

A ISO é uma organização mundial responsável em promover a normatização de produtos e empresas para manter a qualidade permanente, tendo como principal objetivo a aprovação de normas internacionais em todos os campos técnicos, como normas de processos e procedimentos, normas técnicas, classificação de países, e etc.

As normas ISO possuem versões originais em inglês, sendo responsabilidade da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a adaptação destas normas para o contexto nacional. Ou seja, a ABNT é a responsável pela adaptação e desenvolvimento de padrões e normas, sendo a representante exclusiva da ISO e da IEC no Brasil. Por fim, as Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBRs) identificam que uma determinada norma é regulamentadora (NR) para o âmbito nacional.

Na falta de uma normalização técnica brasileira a respeito de um determinado assunto, segundo a legislação brasileira, normas técnicas emitidas por organismos internacionais podem ser utilizadas, como por exemplo, a IEC.

A IEC é uma organização mundial para padronização composta por Comitês eletrotécnicos internacionais que contam com a colaboração de especialistas técnicos internacionais, com o objetivo de promover a cooperação internacional nas questões relacionadas à normalização nos campos elétricos e eletrônicos. Com esta finalidade, além de outras atividades, a IEC publica normas internacionalmente válidas em engenharia elétrica, além de especificações técnicas e relatórios técnicos [14].

2.3.2.

Normas Aplicáveis a Ensaios de Alta Tensão

A maioria das atividades de estudo e pesquisa na área de medição e ensaios de equipamentos de alta tensão (AT) se baseiam atualmente em duas normas: IEC 60060-1 “*High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements*”, que aborda definições gerais e requisitos de ensaios; e IEC 60060-2 “*High-voltage Test Techniques – Part 2: Measuring Systems*”, que trata de sistemas de medição. Ambas as normas são consideradas fundamentais para a qualificação e utilização de sistemas de medição em ensaios de equipamentos utilizados em laboratórios industriais, empresas de energia e laboratórios de pesquisa de alta tensão.

No final de 2010, a IEC emitiu a terceira revisão técnica das normas 60060-1, cancelando e substituindo a segunda edição de 1989 [2] e 60060-2, cancelando e substituindo a segunda edição de 1994 [3]. As principais alterações de ordem técnica relacionadas as edições anteriores destas normas são apresentadas a seguir. As próximas subseções também discutem as normas IEC 61083-1:2001 e IEC 61083-2:2013, que abordam aspectos de *hardware* e *software* de sistemas de medição de impulsos de alta tensão.

2.3.2.1.

IEC 60060-1:2010 principais alterações

A norma IEC 60060-1 é uma norma aplicada a ensaios elétricos em alta tensão e, em sua versão anterior, classificava os impulsos atmosféricos em dois tipos: "suave" e "com oscilações amortecidas". O último caso exigia que o usuário desenhasse manualmente uma curva média através das oscilações [15] a fim de evitar ou detectar erros de traçado, sendo necessário pelo menos duas diferentes pessoas para estimar a forma de onda de impulso por meio de um oscilograma obtido durante o ensaio.

A versão atual da norma IEC 60060-1:2010 [7], bem como sua versão brasileira traduzida pela ABNT em 2013 (norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 [11]), no que se refere a ensaios de impulso atmosférico, teve como principal alteração a inclusão de um novo método para o cálculo dos parâmetros de tempo das formas de onda na presença de oscilações e *overshoot*, utilizando a função de tensão de ensaio $k(f)$. Esta nova função, estabelecida com base em resultados experimentais de um projeto europeu [11], é dependente da frequência e representa a resposta do isolamento do equipamento quando submetido a uma tensão de impulso atmosférico com sobrelevação na crista (*overshoot*), sendo definida por

$$K(f) = \frac{1}{1 + 2.2f^2}, \quad (4)$$

onde f é a frequência em MHz. O filtro digital definido por $k(f)$ é basicamente um filtro passa-baixa, conforme apresentado na figura 11.

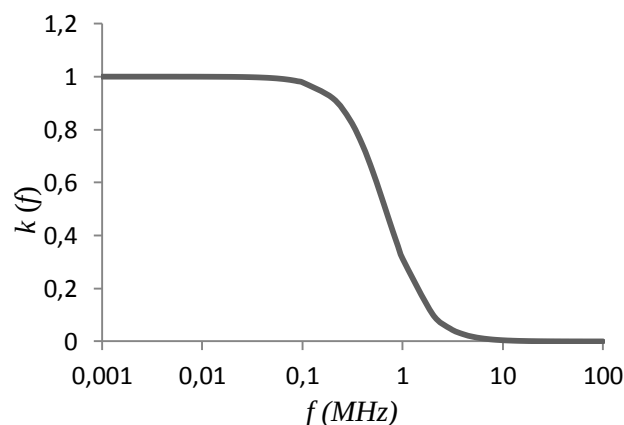


Figura 11 – Função tensão de ensaio.

Na prática, a utilização da função tensão de ensaio envolve a filtragem digital do resíduo $R(t)$ entre a forma de onda original do impulso ($V_0(t)$) e a curva base ($U_m(t)$), obtida por meio de um ajuste exponencial. Na sequência, o resíduo filtrado $R_f(t)$ é adicionado a $U_m(t)$ gerando a curva de tensão de ensaio $V_f(t)$, por sua vez, o cálculo dos parâmetros de amplitude e tempo é feito a partir da curva de tensão de ensaio, $U_f(t)$. Este processamento de sinal é descrito na revisão da norma IEC 60060-1 e envolve:

- a) Ajuste de uma curva exponencial dada pela equação (1) à curva original $U_0(t)$, a fim de obter a chamada curva base $U_m(t)$;

- b) Cálculo da curva residual $R(t)$ (que consiste basicamente na informação do *overshoot*), subtraindo a curva base $U_m(t)$ da curva original $U_0(t)$ (figura 12);
- c) Filtragem dessa curva residual $R(t)$ por um filtro digital com base na função da tensão de ensaio $k(f)$, obtendo a curva residual filtrada $R_f(t)$ (figura 13); e
- d) Adição da curva residual filtrada $R_f(t)$ à curva base $U_m(t)$, obtendo-se, assim, a curva de tensão de ensaio $U_f(t)$, a partir da qual os parâmetros de amplitude e tempo relevantes são estimados (figura 14).

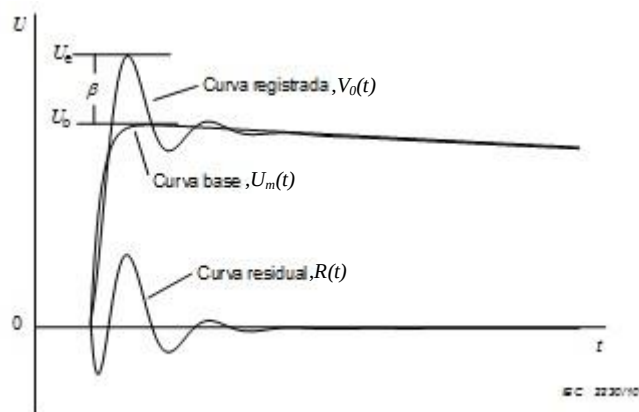


Figura 12 – Curva registrada e base mostrando sobrelevação e curva residual.

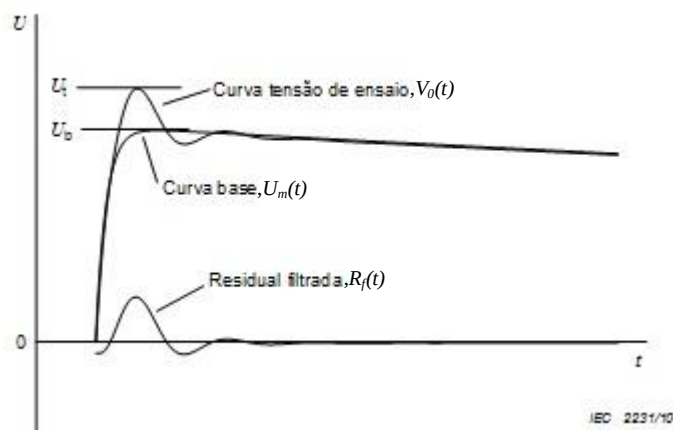


Figura 13 – Curva de tensão de ensaio (adição da curva base e curva residual filtrada).

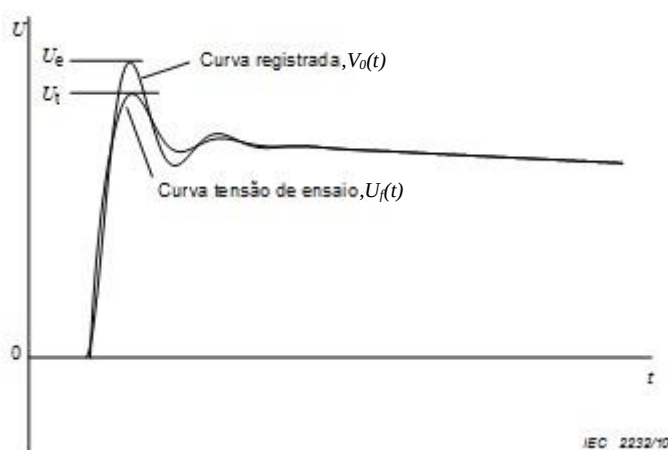


Figura 14 – Curvas da tensão registrada e da tensão de ensaio.

2.3.2.2.

IEC 60060-2:2010 principais alterações

A IEC 60060-2 é uma norma aplicada a sistemas de medição completos e seus componentes. Tais sistemas são comumente utilizados durante ensaios de alta tensão em fábrica ou em laboratórios com tensões CA, CC e impulsos, de acordo com os requisitos da norma IEC 60060-1. Esta norma tem como objetivo definir os termos utilizados, os métodos para a estimação da incerteza de medição, os requisitos que um sistema de medição precisa ter para que o mesmo seja utilizado em alta tensão, além dos métodos e procedimentos para aprovação desse sistema. Dentre os requisitos, podem-se destacar: o comportamento dinâmico, fator de escala atual, linearidade, resposta ao degrau, estabilidade a curto e longo prazo, incertezas, tolerâncias, etc.

Atualmente, não existe uma norma brasileira revisada no que se refere à qualificação de sistemas de medição utilizados nos ensaios de AT, assim como não existem disponíveis no mundo, de acordo com a IEC 60060-2:2010 [14], padrões para as tensões do sistema de potência acima de 1 kV. Entretanto, destaca-se que é possível calibrar os sistemas de medição com tensões entre 20% e 100% da tensão nominal. O comitê de estudos CE 003:42.01 – Ensaios Elétricos de Alta Tensão da ABNT está trabalhando para finalizar em breve a revisão da IEC 60060-2.

A terceira edição da norma IEC 60060-2:2010 foi revisada, de modo a se alinhar com a revisão da IEC 60060-1:2010. Dentre as principais alterações de ordem técnica com relação à edição anterior, destacam-se:

- A inclusão do cálculo de incerteza de medição em praticamente todos os ensaios realizados para qualificar um sistema de medição, seja para ATCC, ATCA ou impulsos;
- A sistemática de avaliação do comportamento dinâmico de sistemas de medição por meio da medição e análise dos parâmetros da resposta ao degrau. Durante décadas a IEC utilizou os parâmetros (T_N ; T_α ; β ; t_s) para qualificar um Sistema de Medição Aprovado (SMA) como apto para medição de impulsos de tensão. Atualmente, a IEC utiliza o parâmetro “Nível de Referência” (I_R) da resposta ao degrau (figura 15), para caracterizar a faixa de utilização de um SMA com relação ao tempo de frente (T_1), para ensaios com impulsos de tensão.

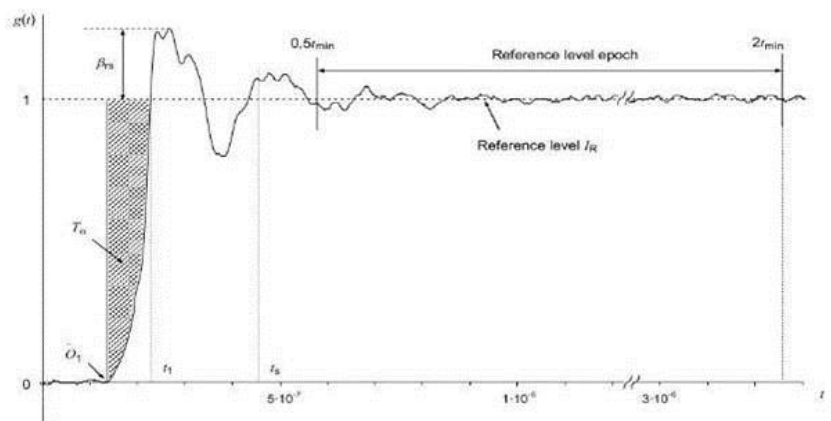


Figura 15 – Níveis de referência para caracterização da faixa de utilização de um SMA

O nível de referência (I_R) é dado pelo valor médio de tensão normalizada no intervalo de tempo entre 0,5 vezes o limite inferior do período nominal ($0,5 t_{\min}$) e duas vezes o limite superior do período nominal ($2 t_{\max}$) [14].

2.3.2.3. IEC 61083-1:2001

Esta parte da norma é aplicada a registradores digitais usados para medições durante os ensaios em impulsos de alta tensão e ensaios de impulsos de corrente, incluindo osciloscópios digitais, osciloscópios analógicos e voltímetros de pico. A IEC 61083-1:2001 “*Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 1: Requirements for instruments*” [16] é aplicada para a avaliação da conformidade dos instrumentos de medição utilizados nos ensaios com impulso de alta tensão, especificando as características de medição e calibrações que são necessárias para

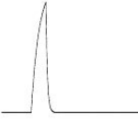
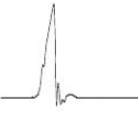
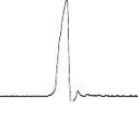
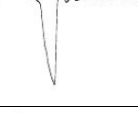
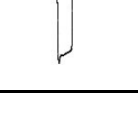
atender aos procedimentos de medição e às incertezas especificadas na norma IEC 60060-2:2010 [14].

2.3.2.4. IEC 61083-2:2013

Para que se pudesse garantir a uniformidade e exatidão nas medidas dos parâmetros de impulso, passou a ser necessária a implementação de um *software* de medição a ser utilizado em osciloscópios e digitalizadores, com o apoio da norma IEC 61083-2:2013 “*Digital Records For Measurements In High-Voltage Impulse Test – Part 2: Evaluation of Software Used For Determination of the Parameters of Impulse Waveforms*” [17] que, para cada parâmetro relevante, possui 48 formas de onda de referência de tensão com limites que são previamente definidos.

Ou seja, a norma IEC 61083-2:2013 estabelece requisitos de *software* para medições de tensão de impulso, fornecendo formas de onda padronizadas que podem ser usadas para testar os algoritmos de processamento, juntamente com os valores de referência e os intervalos de aceitação para cada parâmetro de amplitude e tempo [15]. A tabela 2 apresenta alguns exemplos dos valores de referência e limites de aceitação para os parâmetros de impulsos das formas de onda geradas pelo *software* TDG (*Test Data Generator*), desenvolvido a fim de gerar arquivos de dados de referência digital, representando formas de onda de impulso sintetizadas e gravadas com o propósito de testar *softwares* utilizados para determinar os parâmetros de impulsos, tal como definido nas normas [17].

Tabela 2 – Exemplo de formas de onda, valores de referência e limites de aceitação para os parâmetros de impulsos IAC definidos pela norma IEC 61083-2:2013

Designação no TDG (Test Data Generator)	Impulso de referência	Descrição	U_p, U_t		T_1		T_c		β'	
			Valor de ref. kV	Lim. de aceitação % de U_p ou U_t	Valor de ref. μs	Limite de aceitação % de T_1	Valor de ref. kV μs	Limite de aceitação % de T_c	Valor de ref. kV μs	Limite de aceitação % de T_c
LIC – A1		Impulso atmosférico cortado na frente	872,2	$\pm 1,0$			0,543	$\pm 2,0$		
LIC-M1		Cortado na frente com oscilações	850,0	$\pm 1,0$			0,569	$\pm 2,0$		
LIC-M2		Cortado na frente	0,289	$\pm 1,0$			0,514	$\pm 2,0$		
I _{CA} -M3		Cortado na frente	0,303	$\pm 1,0$			0,568	$\pm 2,0$		
I _{CA} -M4		Cortado na cauda	0,147	$\pm 1,0$	1,305	$\pm 2,0$	6,00	$\pm 2,0$	-0,2	$\pm 1,0$
I _{CA} -M5		Cortado na cauda	389,9	$\pm 1,0$	0,857	$\pm 2,0$	9,24	$\pm 2,0$	6,8	$\pm 1,0$

2.4.

Sistema de medição

Uma medição tem por principal objetivo a determinação do valor de uma grandeza específica a ser medida. Medições de tensões são realizadas diretamente por instrumentos convencionais de medição elétrica, desde algumas unidades de microvolt (μV) até o limite máximo de aproximadamente 1000 V. Acima desse valor torna-se então necessária a atenuação da tensão a níveis que possam ser medidos pelos instrumentos.

Assim, um sistema de medição de alta tensão pode ser definido como um conjunto completo de dispositivos adequados para se fazer medições acima de 1000 V, e compreende os componentes, explicitados na figura 16.

– **Dispositivo de conversão (divisor de tensão)** - tem a função de converter uma grandeza a ser medida em outra grandeza que seja compatível com o instrumento indicador ou de registro.

– **Sistema de transmissão (cabo coaxial, via de fibra óptica)** - é o conjunto de dispositivos que transfere o sinal de saída de um dispositivo de conversão para o instrumento indicador ou de registro.

– **Instrumentos indicadores ou de registro do sinal (osciloscópios, voltímetros, digitalizadores)** - são dispositivos destinados a prover ou mostrar um registro do valor da medida ou relacionado a ela.

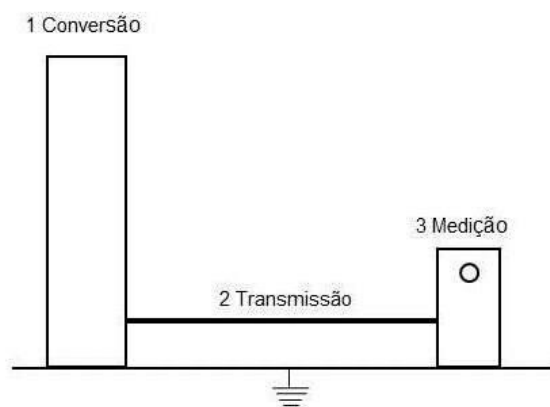


Figura 16 – Componentes básicos de um sistema de medição utilizado em alta tensão.

A qualificação e aprovação de um sistema de medição e os seus componentes se dá por meio de um grande número de ensaios e calibrações. Sistemas de medição (SM) devem ser calibrados por laboratórios acreditados para calibração objetivando garantir a rastreabilidade, a qualidade e a confiabilidade das medições em alta tensão. Tais laboratórios devem possuir os sistemas de medição de referência (SMR) necessários e pessoal qualificado para calibrar outros Sistemas de Medição de Referência ou Sistemas de medição Aprovados (SMA).

A calibração de um sistema de medição é efetuada de acordo com métodos normalizados de medição, seguindo procedimentos com as instruções do processo de calibração. Como resultado da calibração, obtém-se um valor numérico para a quantidade medida, atrelado a uma incerteza de medição. A incerteza total é constituída por contribuições individuais de parcelas advindas de diversas grandezas que afetam a medição, sendo considerada uma importante medida de qualidade. Os detalhes das calibrações, o valor medido e a incerteza de medição são indicados no certificado de calibração [18].

Os laboratórios acreditados para calibração devem cumprir requisitos relacionados à utilização de instrumentos de medição, com calibrações rastreadas aos padrões nacionais, e o atendimento destes deve ser comprovado por meio de certificados. Atualmente, existe uma necessidade crescente de que laboratórios de calibração e de ensaio busquem acreditação, que é o reconhecimento da competência técnica do mesmo por um organismo independente, evidenciando sua qualificação para a prestação dos serviços. A figura 17 apresenta a estrutura para rastreabilidade dos Sistemas de Medição de Alta tensão.

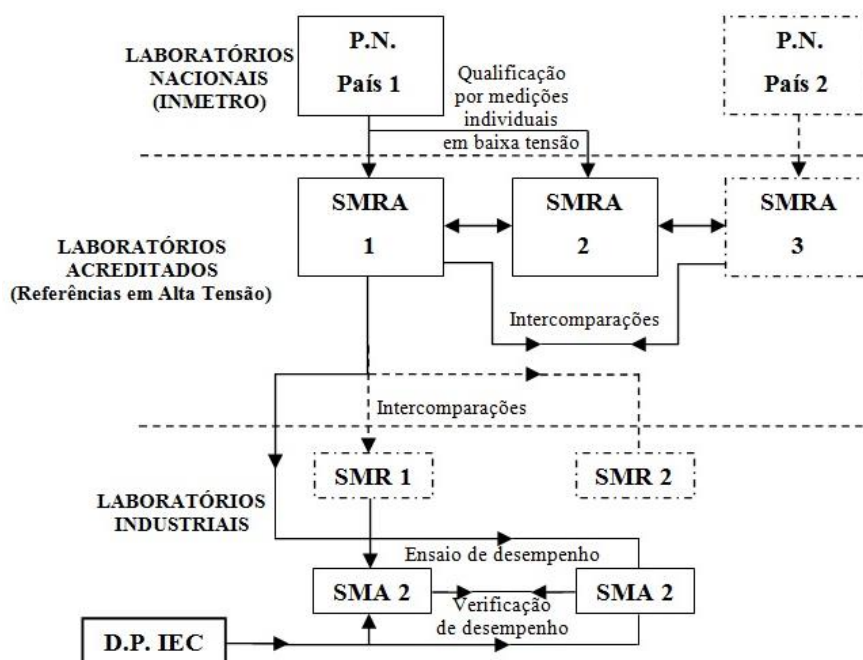


Figura 17 – Estrutura para rastreabilidade dos Sistemas de Medição de Alta tensão, onde, P.N. = padrão nacional - baixa tensão, SMRA = Sistema de Medição de Referência Acreditado, SMR = Sistema de Medição de Referência, SMA = Sistema de Medição Aprovado e D.P. IEC = Dispositivo Padronizado pela IEC.

Todos os SMRs devem ser rastreados por meio de intercomparações com os SMRA. Por sua vez, os SMRAs são rastreáveis aos nacionais, mantidos tipicamente pelos Institutos Nacionais de Metrologia (INM) de cada país. Por exemplo, na Alemanha o *Physikalisch Technische Bundesanstalt* (PTB); no Reino Unido, o *National Physical Laboratory* (NPL); e nos EUA o *National Institute of Standards and Technology* (NIST) são responsáveis pela manutenção dos PNs. Muitos destes INMs também desenvolvem pesquisas a fim de fabricar padrões de medição possuindo as menores incertezas de medição possíveis. As intercomparações regulares entre os institutos de metrologia industrial asseguram a uniformidade das medidas em todo o mundo, como é o caso também na área das técnicas de alta tensão [18].

Uma acreditação é um reconhecimento internacional válido, em que é atestado o atendimento aos requisitos gerais sobre o sistema de gestão e as exigências especiais sobre a competência técnica do laboratório, incluindo o pessoal. A manutenção da acreditação envolve a supervisão regular e a auditoria da calibração e dos laboratórios de ensaio em intervalo de tempo periódico.

A acreditação formal de um laboratório de calibração e ensaio não é expressamente exigida na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 [1]. A acreditação de um serviço, calibração ou ensaio depende principalmente da visão estratégia de negócio da empresa ou laboratório. No entanto, o laboratório deve possuir a competência necessária para as suas atividades, estando em condições de provar isso a qualquer momento. Por este meio, uma hierarquia dos sistemas de medição passa a existir com relação à sua exatidão, a partir do padrão nacional de medição mantida pelo instituto de metrologia do país em questão, conforme apresentado na figura 18.



Figura 18 – Hierarquia de um equipamento de medição utilizado para ensaios de alta tensão, que são rastreados aos padrões de medição mantidos no Instituto Nacional de Metrologia (INM).

Ensaio e calibrações de um equipamento de acordo com normas e procedimentos reconhecidos, bem como a documentação dos resultados, representam uma parte importante na gestão da qualidade.

2.4.1.

Sistema de medição de impulso de alta tensão

No que se refere à medição convencional de impulsos de alta tensão em ensaios, os parâmetros relevantes que precisam ser medidos são os tempos associados à forma de onda e os valores de crista. Atualmente, com a revisão da IEC 60060-1:2010, tanto os parâmetros de tempo quanto o valor da amplitude devem ser medidos utilizando osciloscópios ou registradores digitais de impulso, de acordo com os requisitos das normas IEC 61083-1:2001[16] e IEC 61083-2:2013 [17].

Alguns ensaios, no entanto, requerem que a forma de onda completa do impulso seja medida, além de apenas os parâmetros característicos. Destaca-se que a forma de onda real do impulso de alta tensão não deve apresentar distorções ocasionadas por atenuações indesejadas ou oscilações causadas pelo Sistema de Medição.

O sistema de medição completo de impulso de alta tensão (figura 19) consiste basicamente nos componentes apresentados anteriormente na seção 2.4 (figura 16), acrescentando-se um gerador de impulso como o descrito na seção 2.2.1. Quando um impulso de tensão é aplicado à entrada de um divisor de tensão, uma tensão reduzida aparece na saída do divisor, a qual é transmitida pelo cabo de medição para o instrumento de medição em baixa tensão (digitalizador), geralmente localizado em uma sala especial de medição e de controle com vista para a área de ensaio. A tensão que chega até a sala de controle deve ser uma cópia fiel, porém atenuada da tensão do impulso aplicado à entrada do divisor [18].

Um componente importante que muitas vezes contribui para distorções significativas no impulso medido é o condutor de alta tensão, utilizado para conectar o divisor ao ponto onde se deseja medir o impulso. Devido às dimensões dos divisores de impulso, as capacitâncias e indutâncias dos seus condutores de alta tensão podem ter efeito significativo nas frequências dos sinais medidos [12].

Visando evitar erros devido a reflexões nas suas extremidades pela alta velocidade de propagação dos sinais, o cabo de transmissão deve ser terminado em sua extremidade (conectado ao instrumento) por uma resistência de valor igual à sua impedância característica Z_0 , chamada de impedância de casamento, normalmente de 50 Ω ou 75 Ω , dependendo do caso. Para divisores capacitivos amortecidos (RC-série), o casamento do cabo coaxial não pode ser feito em paralelo com a entrada do osciloscópio, pois a terminação de baixa resistência (50 Ω ou 75 Ω) estaria também eletricamente em

paralelo com a unidade de baixa tensão do divisor capacitivo, afetando significativamente o seu comportamento. Assim, a fim de evitar oscilações originadas por reflexões, o cabo é adequadamente terminado na sua entrada do lado de baixa tensão do divisor, sendo este tipo de terminação utilizada para divisores capacitivos chamada de falso casamento.

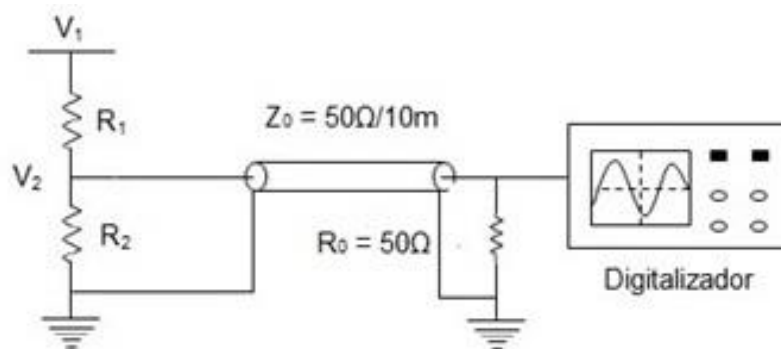


Figura 19 – Diagrama elétrico do sistema de medição completo.

Exige-se, para todo sistema de medição utilizado em ensaios de equipamentos de alta tensão, ensaios periódicos de desempenho, com o principal objetivo de determinar o comportamento dinâmico e o fator de escala dos sistemas de medição. A determinação do fator de escala e os parâmetros de tempo estão associados a incertezas de medição, a serem determinadas de acordo com as regras do GUM [19], tendo em conta a incerteza de medição do sistema de referência. A figura 20 apresenta a aplicação do método de referência para aprovar um sistema de medição de impulso, sendo que a comparação pode ser feita em tensões de no mínimo 20% da tensão nominal do sistema de medição. O método impõe a aplicação de no mínimo 10 impulsos de alta tensão e a realização de leituras simultâneas em ambos os sistemas.

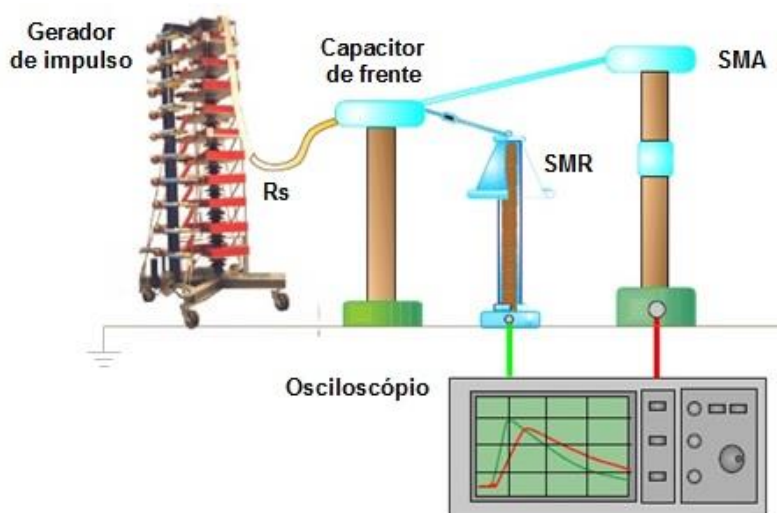


Figura 20 – Método de referência para aprovação de um SM de impulso de tensão.

Na figura 20, pode-se observar, da esquerda para a direita, um gerador de impulsos, um resistor de frente (R_s) ligado ao capacitor de frente (ou capacitor de acoplamento) e, conectados em paralelo, um divisor de tensão de referência e o divisor de tensão a ser calibrado, com suas saídas devidamente ligadas aos canais de um osciloscópio.

Nas tabelas 3 e 4 são apresentados os principais requisitos de incerteza de SMRs e SMAs para os parâmetros característicos de cada tipo de impulso.

Tabela 3 – Características de um SMR (Padrão utilizado na calibração de SMA ou outros SMRs)

Tipo de Impulso	Incerteza (U)	T_1 e T_C	T_2
IAP (LI)	$\leq 1\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
IAC (LIC)	$\leq 3\%$ $0,5 \text{ us} < T_C < 0,9 \text{ us}$	$\leq 5\%$	-
IM (SI)	$\leq 1\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$

Tabela 4 – Características de um SMA

Tipo de Impulso	Incerteza (U)	T_1 e T_C	T_2
IAP (LI)	$\leq 3\%$	$\leq 10\%$	$\leq 10\%$
IAC (LIC)	$\leq 5\%$ $0,5 \text{ us} < T_C < 2 \text{ us}$	$\leq 10\%$	-
IM (SI)	$\leq 3\%$	$\leq 10\%$	$\leq 10\%$

2.4.1.1.

Divisores de alta tensão

Estes dispositivos de conversão são normalmente utilizados em laboratórios de calibração e ensaios em alta tensão, tendo como finalidade reduzir a amplitude da grandeza a ser medida a níveis que sejam compatíveis com a entrada dos instrumentos de medição de baixa tensão. Divisores de alta tensão são compostos por uma unidade de alta tensão em que se conecta o condutor de alta tensão e outra unidade de baixa tensão à qual se liga o cabo de medição. Consequentemente, tem-se que tal que a tensão de entrada aplicada nos terminais do dispositivo completo e a tensão de saída obtida na unidade de baixa tensão. Outro elemento importante em um divisor de alta tensão é a instalação de eletrodos de equalização (toroides), que possuem a função de uniformizar a distribuição de potencial elétrico do longo da coluna do divisor, minimizando também o efeito corona [12].

A utilização desses dispositivos de conversão, chamados de DVAT, é a forma mais eficiente e adequada para que sejam efetuadas medições em alta tensão ($> 1000 \text{ V}$). Os elementos das duas unidades dos divisores de alta tensão são usualmente resistores, capacitores ou combinações destes, sendo que o dispositivo é caracterizado pelo tipo de arranjo de seus elementos. Por exemplo: resistivo, capacitivo, RC-série ou universal, conforme apresentado na figura 21. Nesta figura tem-se V_1 = alta tensão a ser medida; V_2 = fração medida da tensão; Z_1 , R_1 , C_1 são componentes das unidades de alta tensão; e Z_2 , R_2 , C_2 são componentes das unidades de baixa tensão.

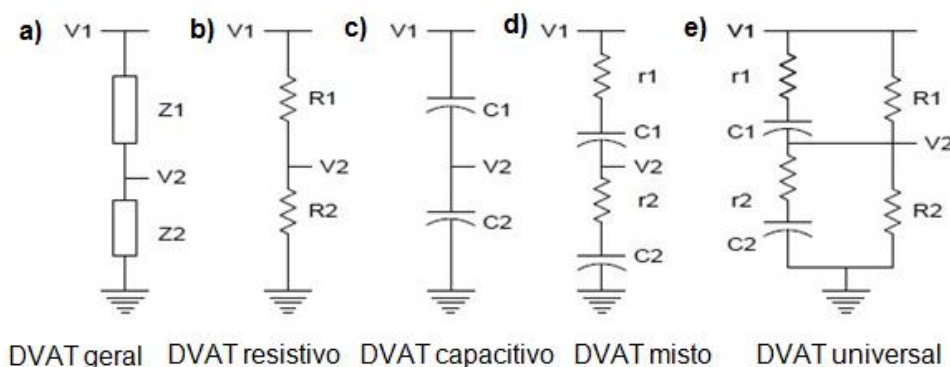


Figura 21 – Circuitos simplificados dos diferentes tipos de arranjo de divisores de alta tensão (DVAT).

Para medições de impulsos rápidos de tensão, divisores de tensão resistivos de baixa impedância são normalmente utilizados por possuírem um excelente

comportamento dinâmico. Tais divisores são construídos de forma a minimizar o efeito indutivo, sendo bastante utilizados em medições de impulsos plenos e cortados. A resistência da unidade de alta tensão (R_1) deve estar na faixa de 3 k Ω a 15 k Ω , pois, apesar do impulso ser de curta duração, existe um compromisso entre a resistência mínima possível em função do efeito da carga do divisor no circuito de ensaio e das capacitâncias parasitas. Além do efeito indesejado introduzido pelas capacitâncias parasitas, outro parâmetro indesejável no que se refere a medições de impulsos atmosféricos é a indutância inerente aos resistores utilizados para a construção dos divisores. Estas indutâncias tornam os divisores mais lentos, o que não é satisfatório para medições de impulsos atmosféricos, que são de curta duração. As figuras 22 e 23 apresentam, respectivamente, os detalhes da estrutura interna e externa dos componentes de um divisor resistivo para medição de impulso atmosférico e o modelo completo do divisor.



Figura 22 – Detalhes da estrutura de um divisor resistivo para medição de impulso atmosférico e seus componentes.

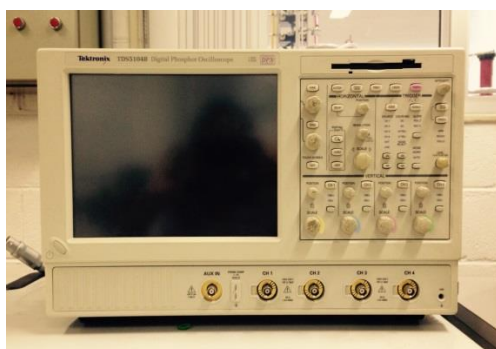


Figura 23 – Divisor resistivo para medição de impulso atmosférico.

2.4.1.2.

Registradores digitais para medições de impulsos

Na maioria dos laboratórios de ensaio e calibração, registradores digitais (figura 24) são usados para o registro das formas de onda de tensões provenientes de ensaios de impulso, sendo eles: osciloscópios digitais e voltímetros de crista, digitalizadores, entre outros, com os quais alguns princípios estruturais e funcionais estão associados.



(a)



(b)



(c)

Figura 24 – Tipos de gravadores digitais para medição de impulso de alta tensão, sendo (a) osciloscópio digital, (b) digitalizador Hias 743 e (c) digitalizador HBM ISOBE 5600.

Os instrumentos de medição utilizados em sistemas de medição de impulsos de tensão possuem requisitos regulamentados por documentos normativos internacionais IEC 61083-1:2001 [16] e IEC 61083-2 [17], que definem os termos relacionados especificamente com os registradores digitais utilizados para medições em ensaios de impulso de alta tensão. A verificação regular e a calibração desses instrumentos de medição são feitas por meio de calibradores de impulso precisos que geram formas de onda equivalentes às de alta tensão.

Uma grande vantagem dos registradores digitais está na avaliação auxiliada por computador com formas de onda digitalizadas e a utilização de um *software* dedicado. Os parâmetros de um impulso determinados pelo software de avaliação devem estar próximos aos valores de referência e dentro dos limites prescritos nas normas. Um determinado *software* para o processamento de impulsos é considerado adequado somente se apresentar resultados aderentes aos valores dos parâmetros normalizados já conhecidos e fornecidos, dentro de uma tolerância aceitável.

A determinação padronizada de parâmetros de impulso é por vezes bastante complicada, especialmente para o caso de tensões de impulso atmosférico com oscilações sobrepostas.

Registradores digitais possuem como principais características: resolução de tensão, taxa de amostragem máxima (podendo ser ajustada), largura de banda analógica e capacidade de armazenamento. Os gravadores mais recentes, especialmente construídos para medir os impulsos de alta tensão, possuem frequência máxima de 40 GHz a 60 GHz, resolução de 8 a 14 bits, além de atenuadores internos para tensões de impulso de 1000 V ou até 2000 V, que é normalmente o valor máximo da tensão transmitida pelos cabos de medição na saída de divisores de impulso de alta tensão.

O processamento dos sinais para o cálculo dos parâmetros característicos de tempo e amplitude de impulsos de tensão requer a determinação de:

- nível base (zero) e nível de topo (crista);
- amplitude do impulso;
- linhas e pontos a 10%, 30%, 50% e 90% da amplitude do impulso;
- amplitude de todas as demais características da forma de onda do impulso, calculadas pelas diferenças entre linhas e pontos.

2.4.2. IMPREAL

O IMPREAL 2.0 (figura 25) é um sistema desenvolvido em LabVIEW que controla e analisa os parâmetros de impulsos medidos pelos osciloscópios Tektronix modelos TDS, com resolução vertical de 8 bits e taxa de amostragem de alguns GHz [20]. O *software* foi desenvolvido com o principal objetivo de implementar os novos requisitos das normas IEC 60060-1 [7] e IEC 60060-2 [14] utilizando as recomendações do anexo B da IEC 60060-1, de modo a capacitar os laboratórios de ensaios e calibração

em alta tensão do Cepel, com uma ferramenta destinada à determinação automática dos parâmetros dos impulsos, garantindo a confiabilidade dos resultados.

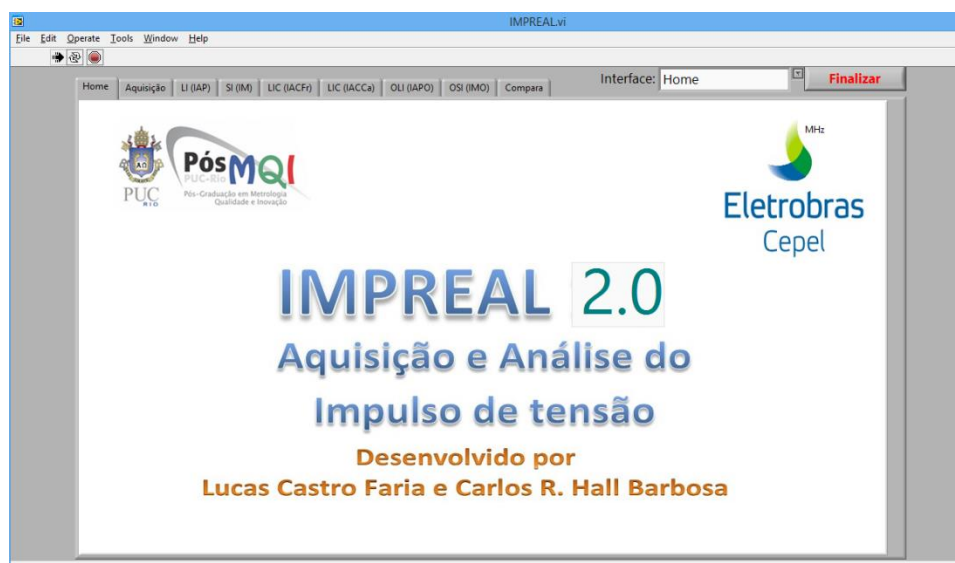


Figura 25 – Interface inicial do software IMPREAL 2.0.

O IMPREAL 2.0 realiza a aquisição e analisa os parâmetros de impulsos atmosféricos plenos (LI-IAP), impulsos cortados na frente (LIC-IACF), impulsos cortados na cauda (LIC-IACC) e impulsos de manobra (SI-IM) [21]. As figuras 26 e 27 apresentam respectivamente a interface de aquisição que simula o painel de um osciloscópio e a interface de análise que calcula automaticamente os parâmetros de interesse, para o caso do IACC.

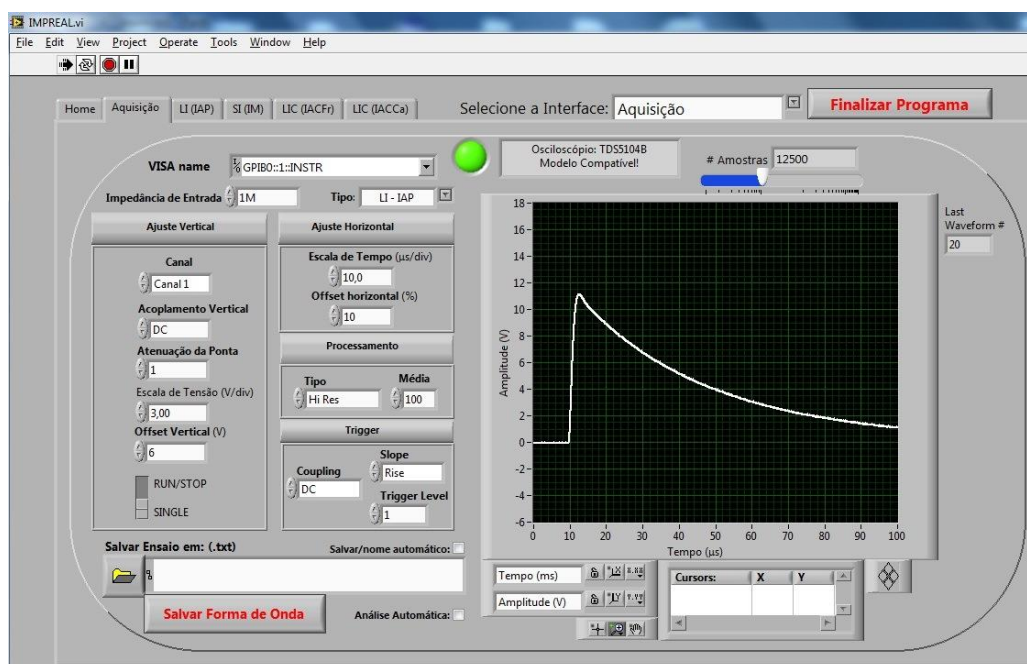


Figura 26 – Interface de aquisição do software IMPREAL 2.0.

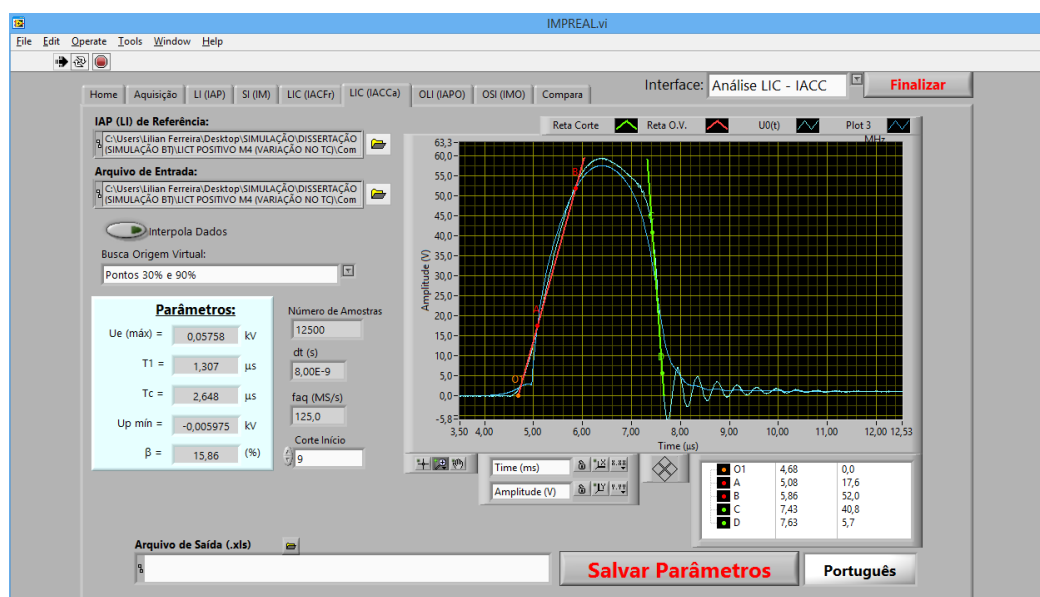


Figura 27 – Interface de análise LIC (IACC) do software IMPREAL 2.0.

3

Impulso Atmosférico Cortado na Cauda

Impulsos atmosféricos cortados na cauda são baseados em impulsos atmosféricos plenos padronizados que sobem para o seu valor de pico em torno de $0,84 \mu\text{s}$ a $1,56 \mu\text{s}$, e posteriormente decaem lentamente até zero com tempo até o corte variando entre $2 \mu\text{s}$ a $5 \mu\text{s}$. Após a aplicação do impulso pleno, utilizando o mesmo ajuste para o gerador de impulso e para o objeto sob ensaio, é então inserido um equipamento responsável pelo corte, normalmente formado por um par de eletrodos chamados de esferas de corte ou *chopping gap* (figura 28) para provocar a disrupção da forma de onda de impulso, sujeitando o objeto sob ensaio a um enorme estresse. Este tipo de impulso é bastante utilizado em ensaios dielétricos em transformadores e reatores.

A distância entre as esferas é controlada de modo a definir o instante em que o impulso pleno é cortado.



Figura 28 – Esferas de corte ou chopping gap.

3.1.

Procedimento de ensaio

Conforme visto no capítulo 2, de acordo com a norma IEC 60060-1 [7], os parâmetros que precisam ser calculados para avaliar a forma de onda do IACC são:

- parâmetros de tempo T_1 (tempo de frente), calculado como $(T_A - T_B)/0,6$;
- parâmetro de tempo T_c (tempo de corte), intervalo de tempo entre a origem virtual, O_1 , e o instante de corte t_c (extrapolação da linha entre os pontos (C e D) equivalentes a 70% e 10% sobre o colapso da tensão); e
- parâmetro de amplitude U_t (valor da tensão de ensaio), que é o valor absoluto máximo da forma de onda.

Para as formas de onda de IACC a norma IEC 60060-1 [7] não é clara no que se refere ao instante de corte t_c , ou seja, se a avaliação do mesmo deve ser feita na forma de onda original adquirida ou no sinal filtrado digitalmente, porém, conforme descrito em [22], esta avaliação na verdade deve ser baseada em uma combinação de ambas. Deste modo, com a finalidade de preservar as características de alta frequência da tensão de corte, o instante de corte t_c precisa ser calculado no impulso cortado na cauda antes da aplicação do filtro digital $k(f)$ e em seguida os procedimentos para se encontrar a curva tensão de ensaio (até o instante de corte t_c) são então empregados. A tensão de pico U_p , o parâmetro de tempo T_1 e a origem virtual O_1 podem ser calculados a partir da curva tensão de ensaio $U_t(t)$ e, por fim, o parâmetro T_c pode ser então calculado subtraindo a origem virtual O_1 do instante de corte t_c .

Para impulsos atmosféricos cortados na cauda, a norma IEC 61083-2:2013 [17] fornece dois tipos de formas de onda padronizadas, juntamente com seus impulsos atmosféricos plenos de referência, sendo uma positiva e outra negativa, intituladas como “LIC-M4” e LIC-M5” (figuras 29 e 30), com seus intervalos de aceitação apresentados na tabela 5.

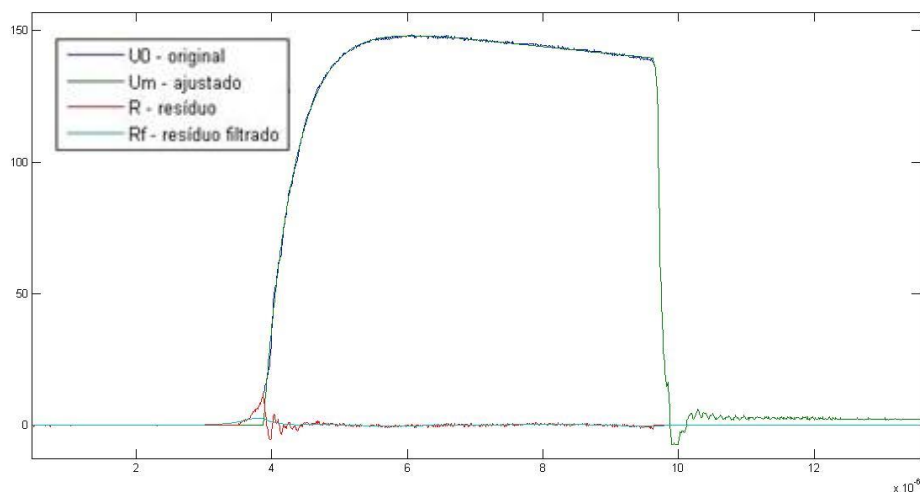


Figura 29 – Forma de onda LIC M4.

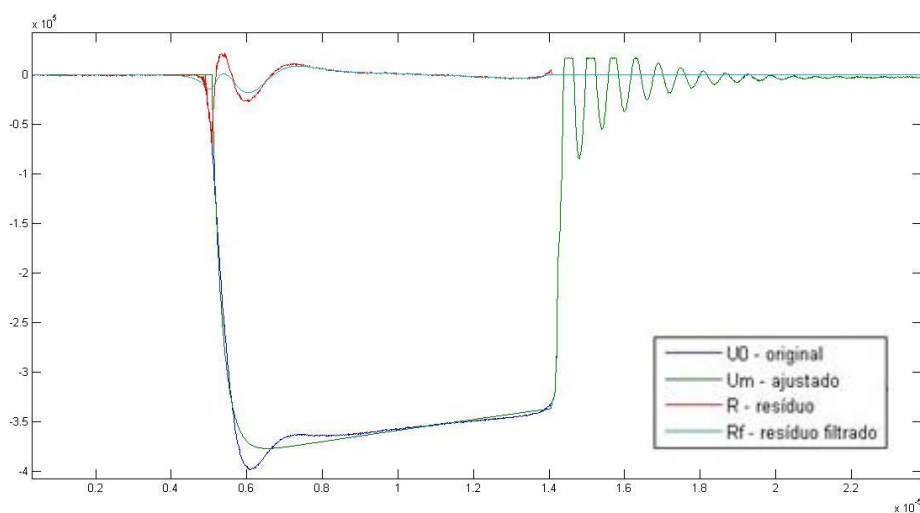


Figura 30 – Forma de onda LIC M5.

Tabela 5 – Intervalos de aceitação para IACC de acordo com a norma 61083-2:2013

Forma de onda	Parâmetros	Intervalo de aceitação
LIC-M4	Tempo de frente T_1 (μs)	1,279 a 1,331
	Tempo de corte T_c (μs)	5,877 a 6,117
	Valor da tensão de ensaio U_t (kV)	0,146 a 0,149
LIC-M5	Tempo de frente T_1 (μs)	0,840 a 0,874
	Tempo de corte T_c (μs)	9,055 a 9,425
	Valor da tensão de ensaio U_t (kV)	-393,8 a -386,0

3.2.

Metodologia atual de estimativa de parâmetros

O procedimento para avaliação e cálculo de parâmetros de impulsos atmosféricos plenos descrito na nova IEC 60060-1:2010 [7], envolve a inclusão da função tensão de ensaio para o processamento do *overshoot* descrito capítulo 2 (que exige o ajuste de uma dupla exponencial à curva registrada). Tal metodologia também deve ser aplicada aos impulsos atmosféricos cortados na cauda. No entanto, este ajuste da exponencial dupla, em princípio, não é possível para uma forma de onda cortada. Desta forma, atualmente para avaliação de impulsos atmosféricos cortados na cauda, a norma indica a necessidade de dois registros:

1. o impulso atmosférico cortado na cauda que será efetivamente avaliado; e
2. um impulso atmosférico pleno de referência, utilizando os mesmos parâmetros, de modo a permitir o ajuste de uma dupla exponencial padrão e, conseqüentemente, a obtenção da curva de base $U_m(t)$.

Porém, devido a necessidade destes dois registros indicados pela norma, este método padrão traz uma maior dificuldade no processamento das formas de onda de IACC, pois demanda um tempo maior na execução dos ensaios, além de causar um estresse significativo ao objeto sob ensaio.

3.3.

Nova Metodologia para análise de IACC

Atualmente, conforme definido pela norma IEC 60060-1 [7], a medição de um Impulso Atmosférico Cortado na Cauda (IACC) só é possível mediante a aplicação prévia de um Impulso Atmosférico Pleno (IAP) de referência, o que demanda um tempo maior na realização dos ensaios, além de causar um estresse significativo ao objeto sob ensaio.

Neste contexto, visando simplificar os procedimentos para este tipo de ensaio de alta tensão, desenvolveu-se e testou-se preliminarmente, com o auxílio do MATLAB, um novo método de processamento de sinais de IACC's para o qual, em princípio, não é mais necessária uma aplicação de impulso atmosférico pleno padronizado.

A validação do novo método foi baseada inicialmente na análise dos parâmetros estimados para duas formas de onda padronizadas de impulsos cortados na cauda (LIC-M4 e LIC-M5), disponíveis na norma 61083-2:2013 [17]. Em seguida, este novo método foi também testado com outros tipos de formas de onda de IACC, variando-se principalmente a amplitude e a duração do *overshoot*, bem como o tempo de corte, a fim de se validar e testar a robustez do método proposto.

O novo método aqui proposto, influencia diretamente todos os *softwares* atualmente utilizados para este tipo de medição, tendo como objetivo simplificar e substituir a atual metodologia de medição para IACC.

3.3.1.

Descrição

Em ensaios de IACC, a necessidade da aplicação prévia de um impulso atmosférico pleno de referência existe devido ao fato de que a ocorrência de *overshoot* exige o ajuste de uma função exponencial dupla à curva originalmente registrada, conforme descrito na seção 2.3.2. Contudo, este ajuste não é possível para uma forma de onda de um impulso cortado na cauda, sendo então necessária a aplicação prévia de um IAP.

Porém, como a curva de tensão de ensaio $U_t(t)$ precisa ser calculada somente até o instante de corte t_c , o ajuste da dupla exponencial também precisa ser feito até este instante. Desta forma, se a curva original $U_0(t)$ é cortada no instante em que ocorre o colapso da tensão, deve ser possível ajustar uma exponencial dupla e prosseguir com o

processamento de *overshoot*, sem a necessidade de se aplicar um impulso atmosférico pleno [15].

O ajuste da exponencial dupla à curva original é baseada na equação (1) apresentada na seção 2.2.1, devendo-se encontrar os parâmetros U , t_d , τ_1 e τ_2 com base em um algoritmo numérico, sendo: U o valor extremo da onda, τ_1 a taxa de descida da onda, τ_2 a taxa de subida da frente de onda e t_d a origem real ou virtual da curva. No entanto, o ajuste da exponencial dupla é um processo auxiliar, sendo que, a curva $U_m(t)$ obtida é apenas uma curva intermediária, utilizada para extrair a curva residual, que contém basicamente a oscilação. Desta forma, o desempenho do método não necessita ser avaliado com base nos parâmetros de ajuste da dupla exponencial, mas ao invés disso, deve ser analisado por meio dos parâmetros de tempo e de amplitude definidos pelas normas IEC 60060:2010, que possuem valores de referência e intervalos de aceitação para cada forma de onda definida na norma IEC 60060-2:2013 [15]. As figuras 31 e 32 apresentam uma forma de onda positiva de IACC com o exemplo do processamento do novo método alternativo para estimativa de parâmetros realizado com auxílio do MATLAB.

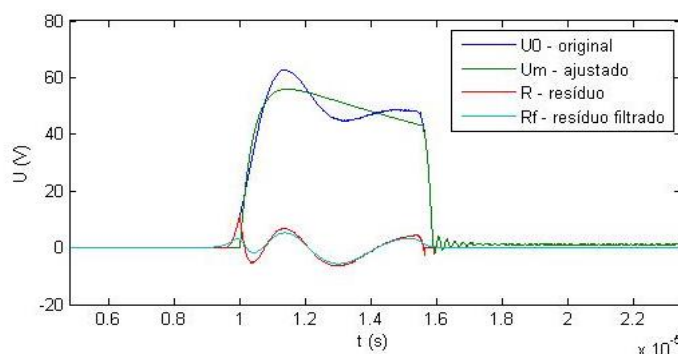


Figura 31 – Forma de onda positiva do IACC apresentando o ajuste da exponencial dupla e a aplicação do filtro digital.

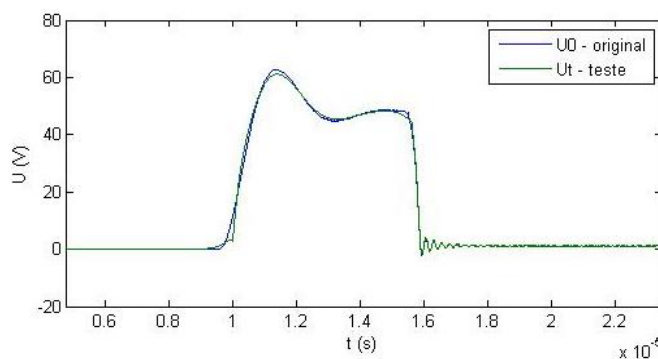


Figura 32 – Resultado final da forma de onda do IACC apresentando as formas de onda original e de ensaio.

4

Ensaaios experimentais

O objetivo principal deste capítulo é aplicar os conceitos teóricos vistos anteriormente de forma prática, por meio de ensaios experimentais realizados nos laboratórios CA2 e AT2 do Cepel. Os ensaios experimentais foram realizados com diversos tipos de formas de onda de IACC em ambas as polaridades, variando principalmente a amplitude e a duração do *overshoot*, além dos tempos de corte. Os ensaios experimentais foram divididos em duas etapas:

- **Primeira etapa:** ensaio de verificação em baixa tensão (BT), com o auxílio de um gerador de impulsos de bancada de laboratório.
- **Segunda etapa:** ensaio de verificação em alta tensão (AT), com ensaio dielétrico de tensão suportável sob impulso atmosférico em transformadores de distribuição.

Os parâmetros relevantes dos impulsos IACC apresentados neste Capítulo foram calculados utilizando o método padrão da norma IEC 60060-1 [7], implementado no *software* IMPREAL 2.0. Estes resultados serão comparados na sessão 4.3. com os advindos da aplicação do novo método alternativo, para medição de impulso atmosférico cortado na cauda, que exclui a necessidade de uma forma de onda de um impulso atmosférico pleno de referência com a finalidade de validar e testar a robustez deste novo método de processamento (apresentado no capítulo 3).

4.1.

Ensaaios em baixa tensão (BT)

O *software* IMPREAL 2.0 foi empregado a fim de estimar os parâmetros do impulso atmosférico cortado na cauda (IACC) em baixa tensão de duas formas de onda padronizadas (LIC-M4 e LIC-M5) utilizadas como referência, sendo uma positiva e outra negativa, disponíveis na norma IEC 61083-2:2013 [17]. Nestes ensaios, foram utilizados os tempos de frente e de cauda do IAP de referência, garantindo assim que as

ondas produzidas pelo gerador de impulso de bancada tinham as mesmas características temporais das formas de onda padrão LIC-M4 e LIC-M5. Entretanto, fez-se a amplitude e a duração do *overshoot* assumirem 3 diferentes níveis e variar-se o tempo de corte em 5 valores igualmente espaçados e dentro dos limites definidos pela norma IEC 61083-2:2013.

A fim de se obter um melhor controle dos parâmetros das formas de onda, um gerador de impulsos em baixa tensão de bancada de laboratório *Recurrent Surge Generator* RSG 482 da Haefely (figura 33), foi utilizado na geração dos impulsos atmosféricos plenos de referência e do impulso atmosférico cortado na cauda correspondente [15]. Os dados experimentais foram medidos pelo sistema IMPREAL 2.0 descrito na seção 2.4.4.

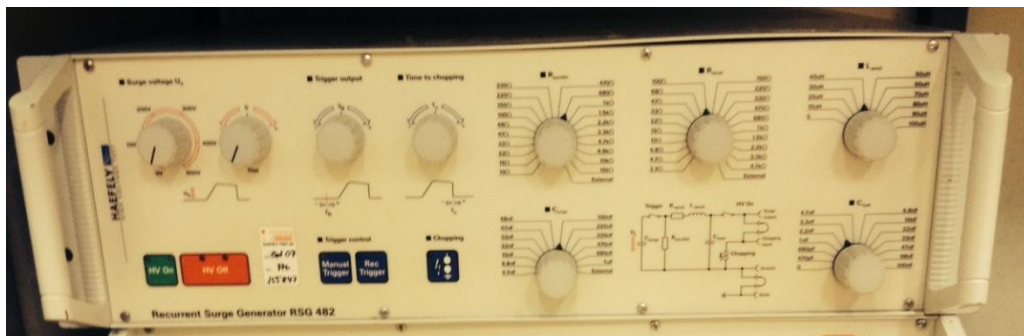


Figura 33 – Recurrent Surge Generator RSG 482, da Haefely.

4.1.1. Variação no overshoot β

As tabelas 6 e 7 apresentam os resultados atrelados a cada um dos três diferentes níveis de *overshoot* listados, para as formas de onda geradas utilizando o processamento padrão definido pela norma, baseadas nos parâmetros das formas de onda LIC-M4 (positiva) e LIC-M5 (negativa). As figuras 34 e 35 mostram as formas de ondas obtidas para cada nível de *overshoot* analisado.

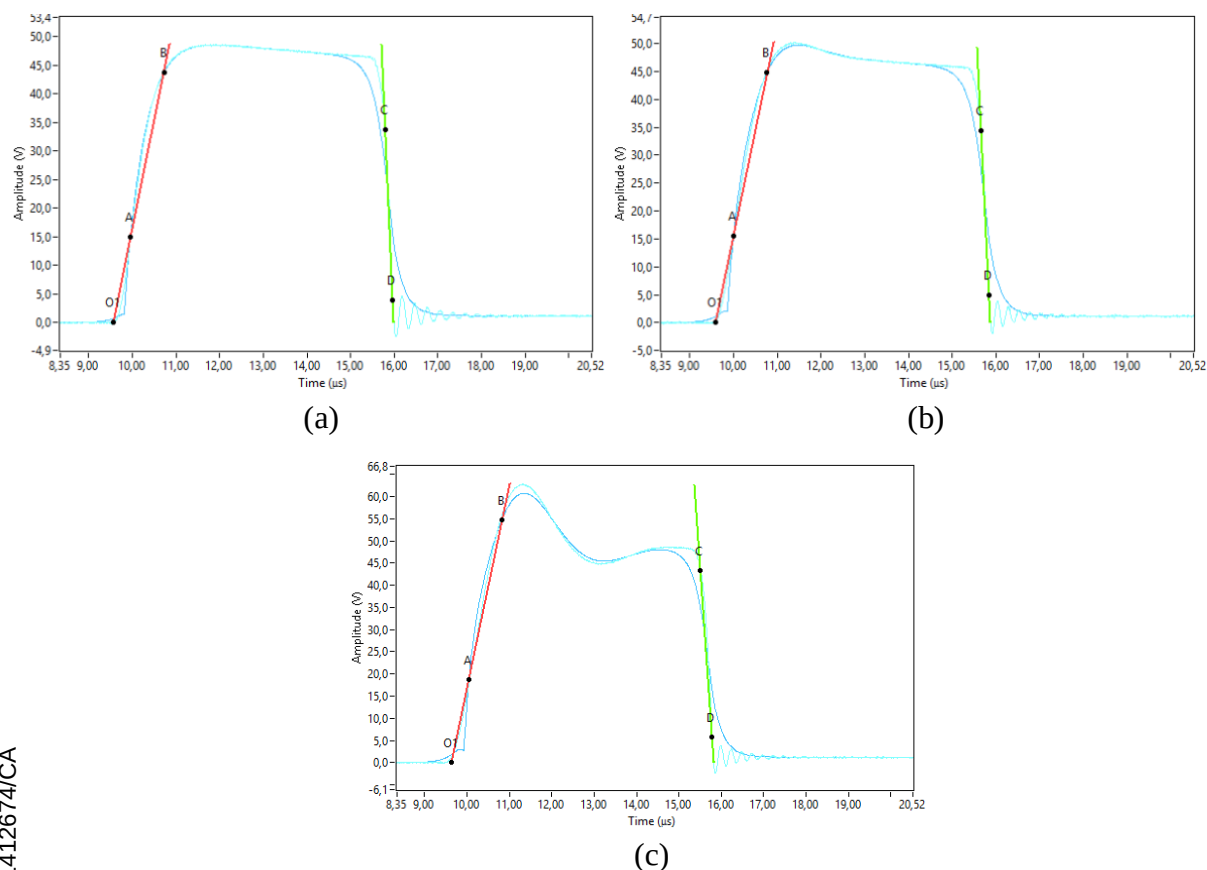


Figura 34 – Medição das formas de onda padrão LIC-M4, para três níveis de *overshoot* (a) 0%, (b) 4% e (c) 20%.

Tabela 6 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M4.

Overshoot	Parâmetros	Valor
0%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	1,280
	Tempo de corte $T_c(\mu s)$	6,144
	Tensão de ensaio $U_t(V)$	48,56
4%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	1,280
	Tempo de corte $T_c(\mu s)$	5,967
	Tensão de ensaio $U_t(V)$	49,74
20%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	1,293
	Tempo de corte $T_c(\mu s)$	5,727
	Tensão de ensaio $U_t(V)$	60,76

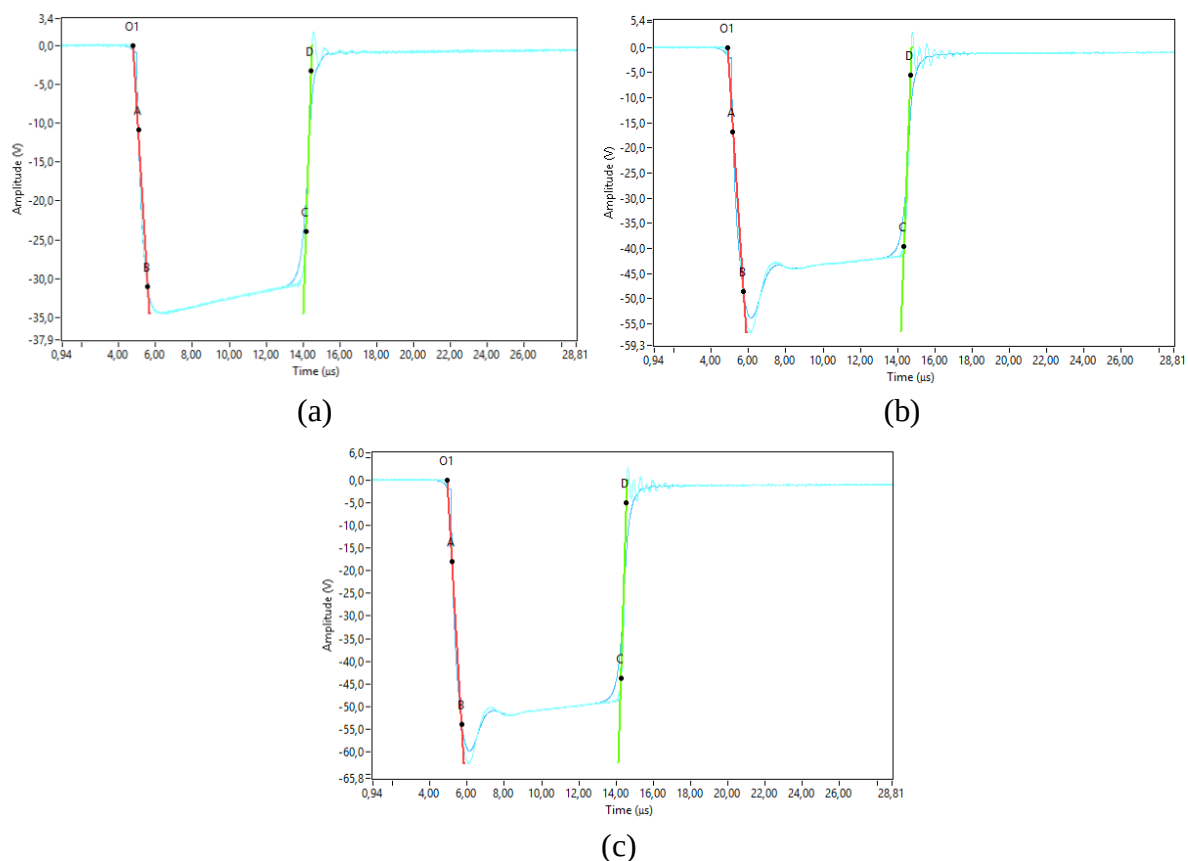


Figura 35 – Medição das formas de onda padrão LIC-M5, para três níveis de *overshoot* (a) 0%, (b) 15% e (c) 20%.

Tabela 7 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M5.

Overshoot	Parâmetros	Valor
0%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	0,827
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	9,239
	Tensão de ensaio $U_t(V)$	-34,4
15%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	0,933
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	9,291
	Tensão de ensaio $U_t(V)$	-53,9
20%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	0,853
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	9,192
	Tensão de ensaio $U_t(V)$	-59,82

4.1.2.

Varição no tempo de corte T_c

As tabelas 8 a 11 apresentam os resultados obtidos em função de variações no tempo de corte para ensaios, sem *overshoot* e com *overshoot*. Foram avaliados 5 valores igualmente espaçados de T_c para formas de onda baseadas nos parâmetros definidos para as ondas LIC-M4 (positiva) e LIC-M5 (negativa), produzidas pela norma IEC 60060-1 [7]. As figuras 36 a 39 mostram as formas de ondas geradas em função das variações aqui propostas.

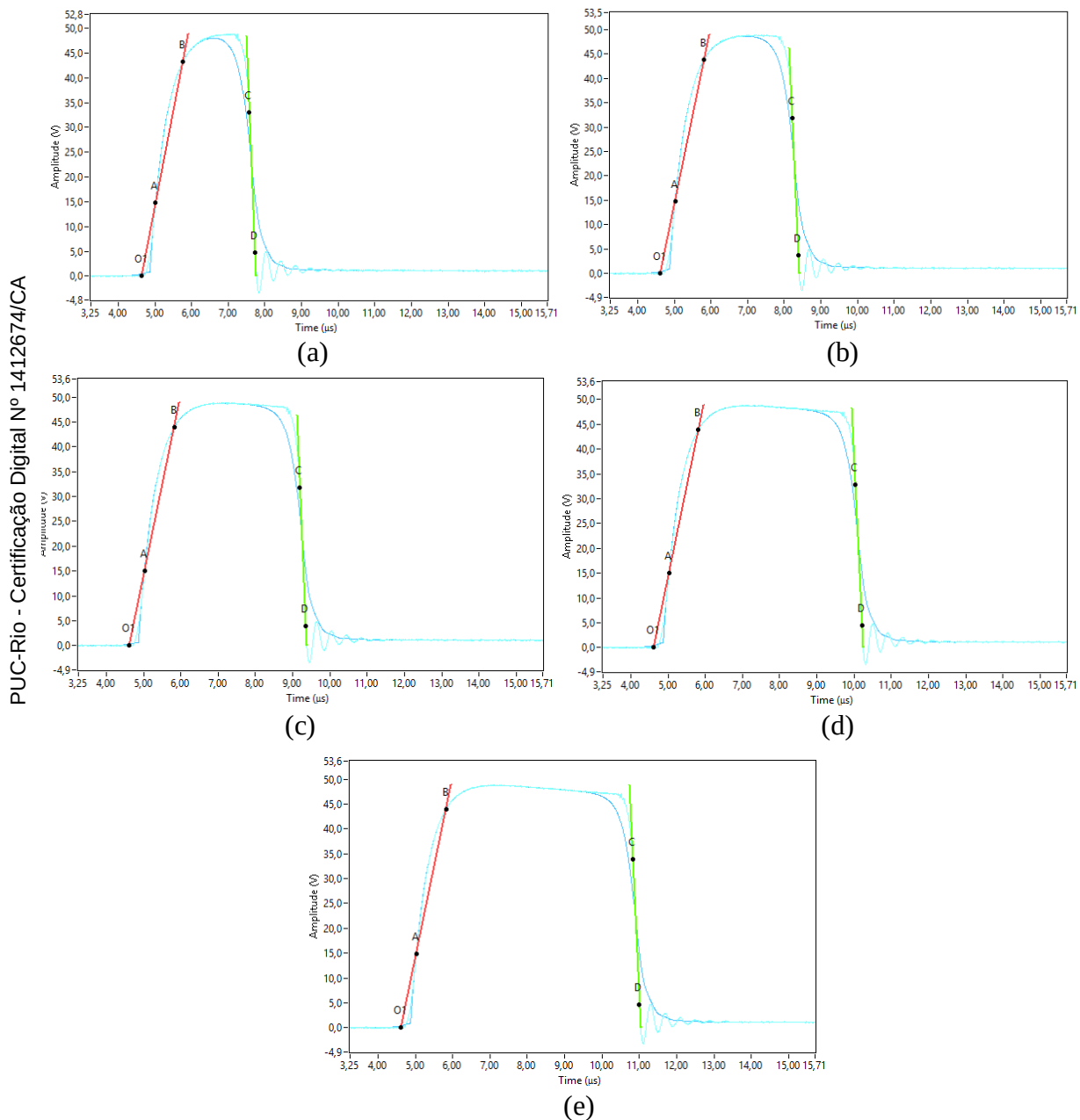


Figura 36 – Medição das formas de onda padrão LIC-M4 com 0% de *overshoot*, para: (a) $T_c = 2,862 \mu s$, (b) $T_c = 3,521 \mu s$, (c) $T_c = 4,502 \mu s$, (d) $T_c = 5,333 \mu s$ e (e) $5^\circ T_c = 6,116 \mu s$.

Tabela 8 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M4, com 0% de *overshoot*.

0% Overshoot	Parâmetros	Valor
T_c = a	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,253
	Tempo de corte T _c (μs)	2,862
	Tensão de ensaio U _t (V)	47,99
T_c = b	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,307
	Tempo de corte T _c (μs)	3,521
	Tensão de ensaio U _t (V)	48,59
T_c = c	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,333
	Tempo de corte T _c (μs)	4,502
	Tensão de ensaio U _t (V)	48,74
T_c = d	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,320
	Tempo de corte T _c (μs)	5,333
	Tensão de ensaio U _t (V)	48,73
T_c = e	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,333
	Tempo de corte T _c (μs)	6,116
	Tensão de ensaio U _t (V)	48,74

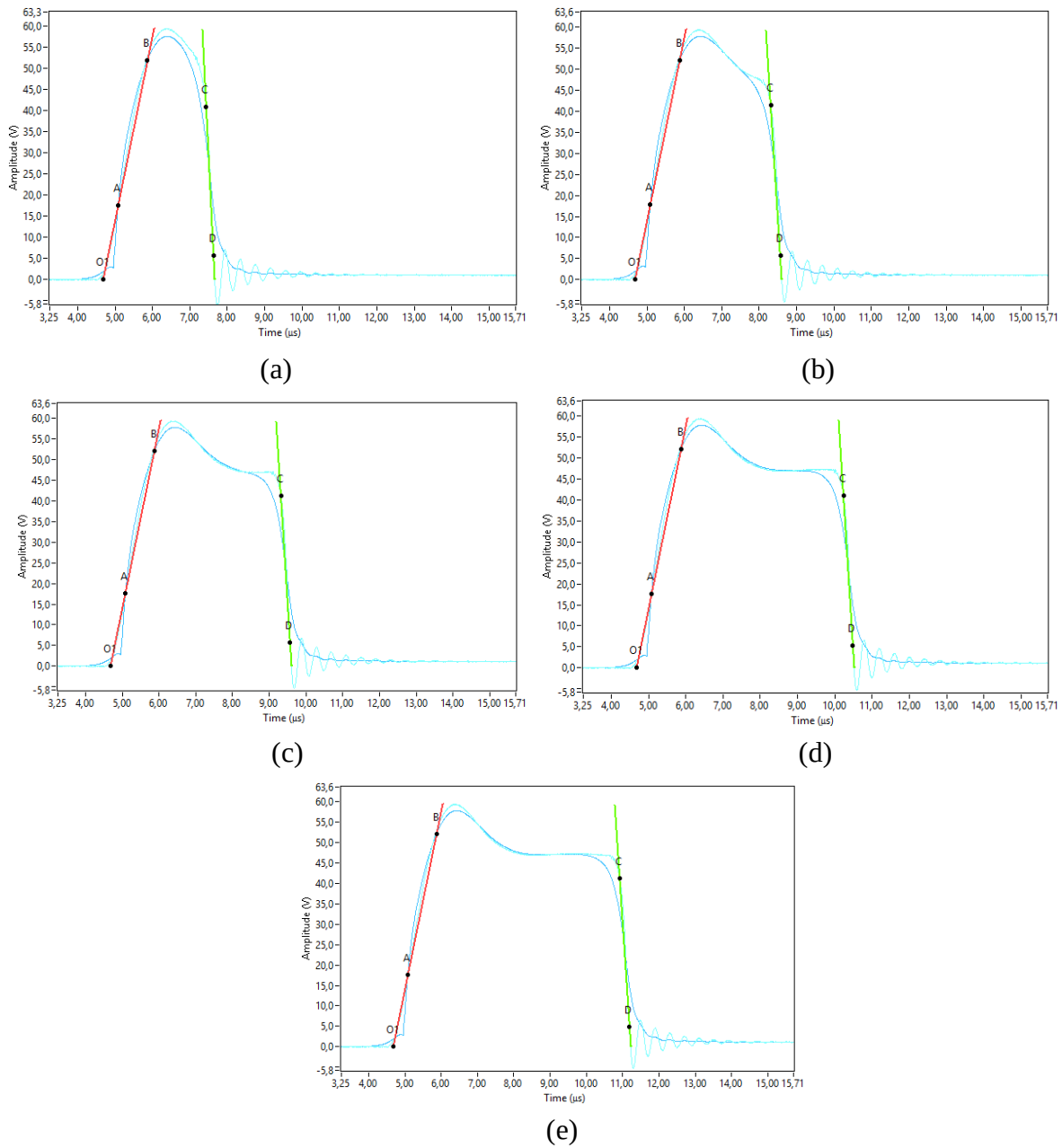


Figura 37 – Medição das formas de onda padrão LIC-M4 com 16% de *overshoot*, para: (a) $T_c = 2,648 \mu s$, (b) $T_c = 3,503 \mu s$, (c) $T_c = 4,508 \mu s$, (d) $T_c = 5,428 \mu s$ e (e) $T_c = 6,112 \mu s$.

Tabela 9 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M4, com 16% de *overshoot*.

16% Overshoot	Parâmetros	Valor
T_c = a	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,307
	Tempo de corte T _c (μs)	2,648
	Tensão de ensaio U _t (V)	57,58
T_c = b	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,307
	Tempo de corte T _c (μs)	3,503
	Tensão de ensaio U _t (V)	57,83
T_c = c	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,320
	Tempo de corte T _c (μs)	4,508
	Tensão de ensaio U _t (V)	57,83
T_c = d	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,320
	Tempo de corte T _c (μs)	5,428
	Tensão de ensaio U _t (V)	57,83
T_c = e	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,320
	Tempo de corte T _c (μs)	6,112
	Tensão de ensaio U _t (V)	57,83

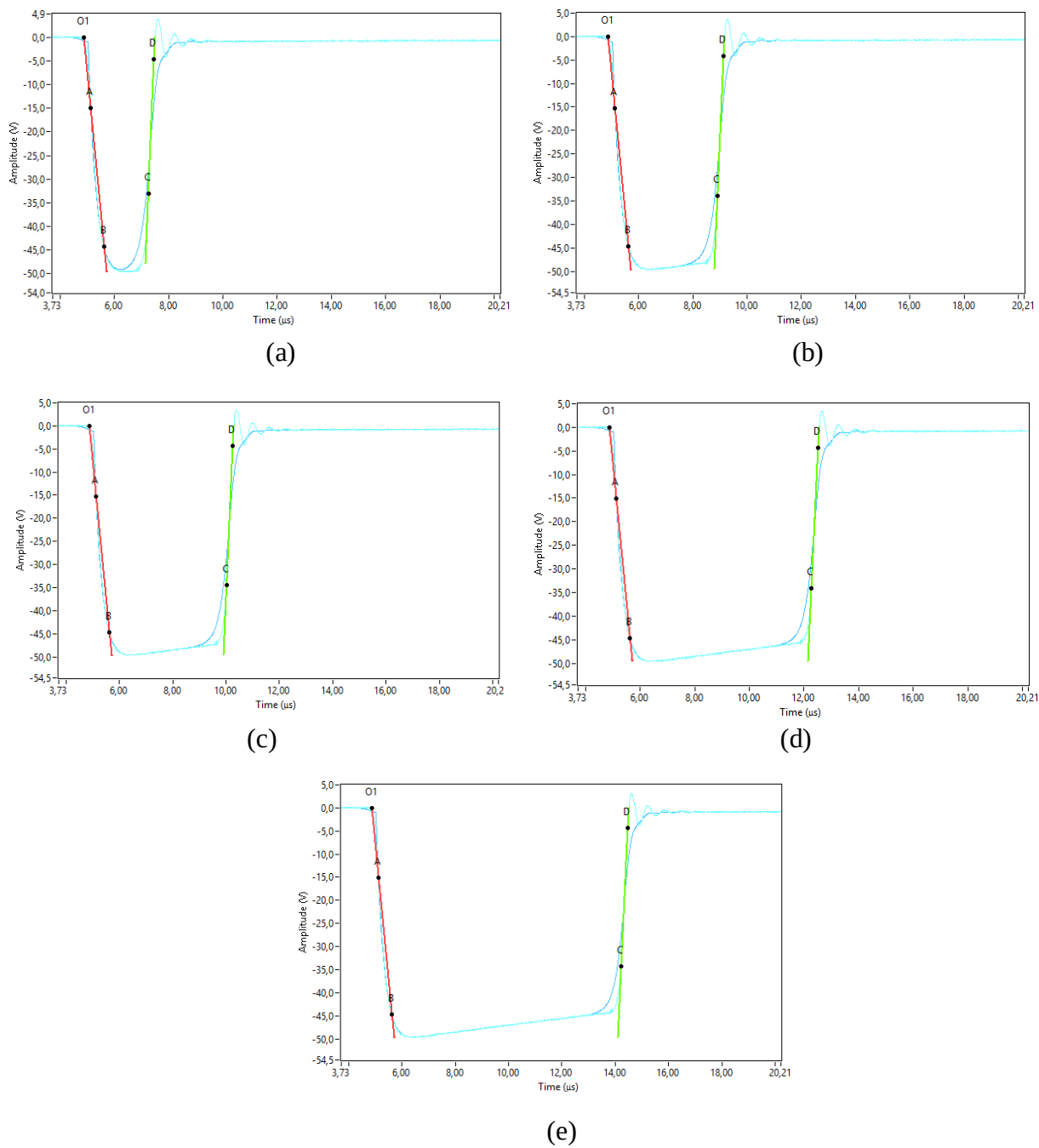


Figura 38 – Medição das formas de onda padrão LIC-M5 com 0% de *overshoot*, para: (a) $T_c = 2,272 \mu s$, (b) $T_c = 3,915 \mu s$, (c) $T_c = 5,030 \mu s$, (d) $T_c = 7,274 \mu s$ e (e) $5^\circ T_c = 9,222 \mu s$.

Tabela 10 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M5, com 0% de *overshoot*.

0% Overshoot	Parâmetros	Valor
T_c = a	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,813
	Tempo de corte T _c (μs)	2,272
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 49,10
T_c = b	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,827
	Tempo de corte T _c (μs)	3,915
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 49,53
T_c = c	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,827
	Tempo de corte T _c (μs)	5,030
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 49,55
T_c = d	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,839
	Tempo de corte T _c (μs)	7,274
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 49,52
T_c = e	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,839
	Tempo de corte T _c (μs)	9,222
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 49,54

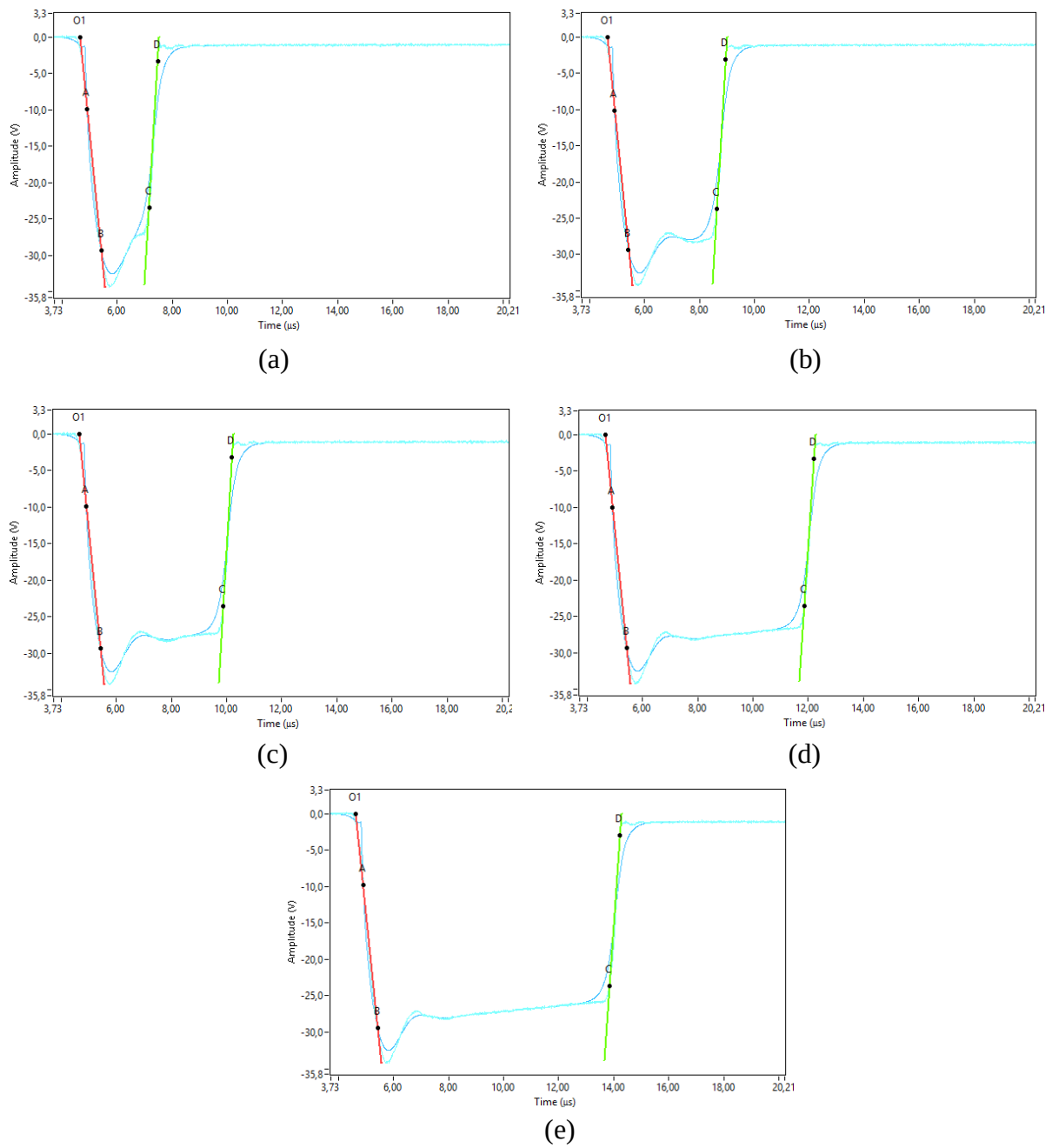


Figura 39 – Medição das formas de onda padrão LIC-M5 com 16% de *overshoot*, para: (a) $T_c = 2,347 \mu s$, (b) $T_c = 3,828 \mu s$, (c) $T_c = 5,065 \mu s$, (d) $T_c = 7,044 \mu s$ e (e) $5^\circ T_c = 9,017 \mu s$.

Tabela 11 – Resultado do processamento normalizado para os ensaios, correspondentes à forma de onda padrão LIC-M5, com 16% de *overshoot*.

16% Overshoot	Parâmetros	Valor
T_c = a	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,853
	Tempo de corte T _c (μs)	2,347
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 32,52
T_c = b	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,839
	Tempo de corte T _c (μs)	3,828
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 32,58
T_c = c	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,853
	Tempo de corte T _c (μs)	5,065
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 32,55
T_c = d	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,853
	Tempo de corte T _c (μs)	7,044
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 32,53
T_c = e	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,866
	Tempo de corte T _c (μs)	9,017
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 32,51

4.2.

Ensaaios em alta tensão (AT)

Para a execução do ensaio de tensão suportável sob impulso atmosférico utilizou-se o laboratório de Ensaaios Corona – AT2, localizado no Cepel, responsável por realizar ensaios dielétricos, que avaliam o isolamento de materiais elétricos, e medições que possibilitem a análise do desempenho desses equipamentos quando expostos a altos níveis de tensão.

Os equipamentos utilizados neste trabalho para o ensaio dielétrico padronizado são transformadores de distribuição (ilustrado na figura 40), com suas respectivas especificações mencionadas nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Informações nominais contidas na placa do transformador 1 testado em laboratório.

Dados de placa trafo 1	
Tensão Nominal	19,9 kV
Potência Nominal	10 kVA
Classe de Tensão	36,2 kV
Isolamento	Óleo Mineral
Nível Básico de Isolamento (NBI)	150 kV
Fabricante	ITAM

Tabela 13 – Informações nominais contidas na placa do transformador 2 testado em laboratório.

Dados de placa trafo 2	
Tensão Nominal	13,8 kV
Potência Nominal	5 kVA
Classe de Tensão	15 kV
Isolamento	Óleo Mineral
Nível Básico de Isolamento (NBI)	95 kV
Fabricante	ITAM



Figura 40 – Transformador de distribuição.

Os equipamentos elétricos são caracterizados por possuírem níveis de isolamento normalizados, baseados em sua tensão nominal de operação, denominados NBI (Nível básico de Isolamento). O NBI que corresponde à tensão a qual o isolamento do transformador pode ser submetido com 10% de probabilidade de ocorrer uma disrupção elétrica, de acordo com as normas ABNT NBR 6939 [23] e ABNT NBR IEC 60060-1:2013 [11].

Assim, este ensaio de disrupção tem o objetivo de verificar a suportabilidade do transformador, quando for aplicada uma tensão de impulso atmosférico nos seus terminais de linha, acessíveis externamente pelo lado de alta tensão.

O transformador deve suportar os ensaios de impulso atmosférico, de forma que não sejam produzidas descargas disruptivas e sem que haja evidências de falha. Os trafos analisados são equipamentos com isolação a óleo, para os quais o ensaio precisa ser realizado com tensões na polaridade negativa, a fim de reduzir o risco de descargas externas no circuito, de acordo com a norma ABNT NBR 5356-3 [24]. Os ensaios de impulso atmosférico devem ser feitos com impulsos normalizados plenos e cortados.

Na execução do ensaio, as seguintes variações são admitidas na forma do impulso:

- Valor de crista de $\pm 3\%$;
- Tempo de frente de $\pm 30\%$;

- Tempo até o meio valor de $\pm 20\%$, e
- Oscilações de amplitude ou sobrelevações de $\pm 5\%$, fixadas pela ABNT NBR 6936 [25], até um limite máximo de 10%.

Como o circuito de ensaio (figura 41) é do tipo RLC, em determinados casos, a forma de onda pode ser de difícil ajuste dentro das tolerâncias fixadas para o impulso, devido à baixa indutância ou alta capacitância para o terra do enrolamento. Consequentemente, a forma resultante do impulso é frequentemente oscilatória. O circuito é normalmente dividido em cinco estágios diferentes: o gerador de impulsos, o equipamento sob ensaio, o circuito de medição de tensão e corrente, o circuito de corte (quando aplicável) e o circuito para detecção de falhas.

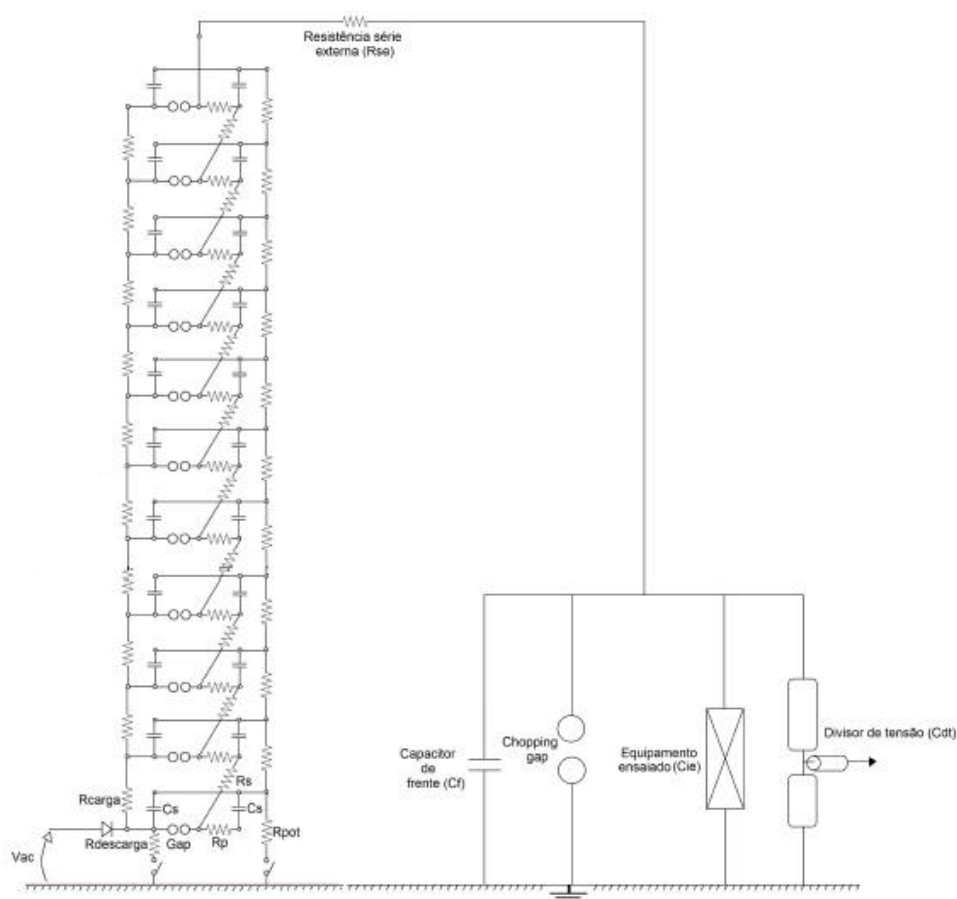


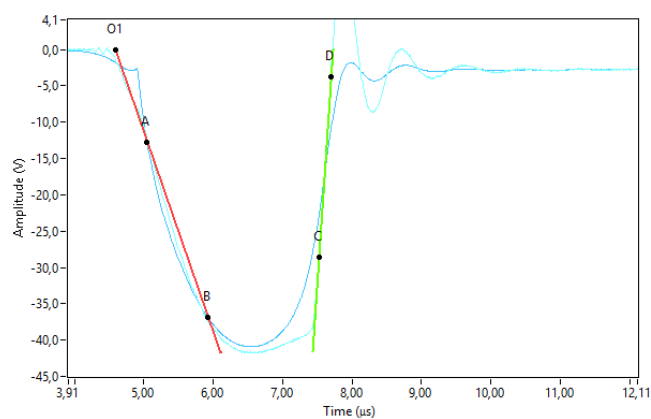
Figura 41 – Circuito de ensaio.

O ensaio de impulso deve ser feito com o transformador desenergizado, sendo que uma sequência de impulsos de tensão de diferentes tipos é então aplicada no transformador sob ensaio, na ordem abaixo mencionada: [24]

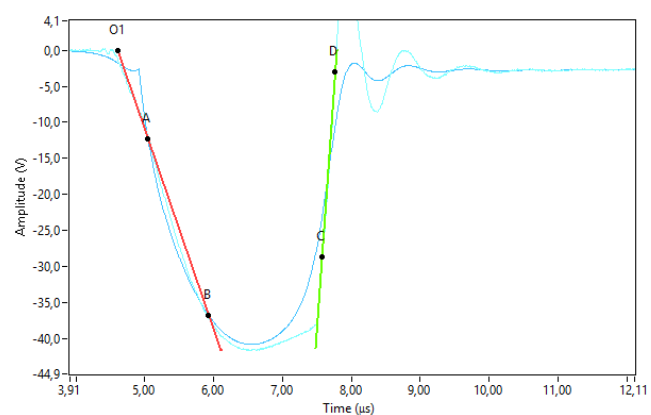
- Um impulso pleno normalizado com valor reduzido;
- Um impulso pleno normalizado com o valor especificado para o ensaio;
- Um ou mais impulsos cortados com valor reduzido;
- Dois impulsos cortados com o valor especificado para o ensaio;
- Dois impulsos plenos normalizados com o valor especificado para o ensaio.

Além da medição da tensão, a medição da corrente também deve ser realizada por meio de um transformador de corrente inserido entre os terminais não ensaiados do enrolamento. O critério de avaliação do ensaio é baseado na análise detalhada dos sinais obtidos de tensão e corrente, por meio de uma comparação minuciosa entre os oscilogramas dos impulsos plenos e cortados, com a finalidade de confirmar ou não a existência de falhas. Na ausência de significativas diferenças entre os transitórios registrados de tensão e corrente com a aplicação dos impulsos, torna-se comprovado que o isolamento do transformador suportou o ensaio.

Os dados do ensaio foram adquiridos pelo sistema IMPREAL 2.0 e as tabelas 14 e 15 apresentam os resultados referentes aos IACC analisados, obtidos no ensaio de tensão suportável sob impulso atmosférico, juntamente com as figuras 42 e 43 apresentam às respectivas formas de onda obtidas.



(a)

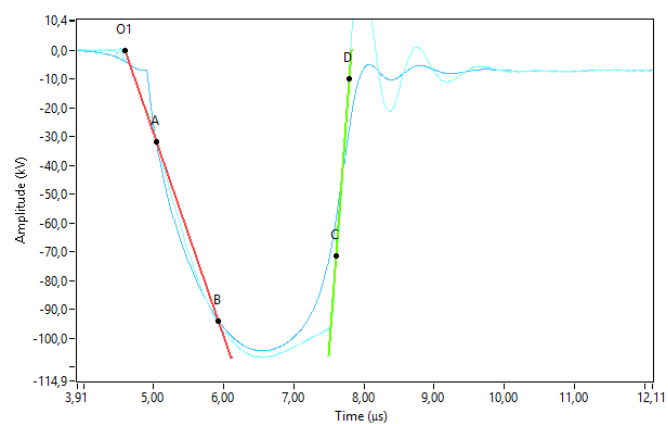


(b)

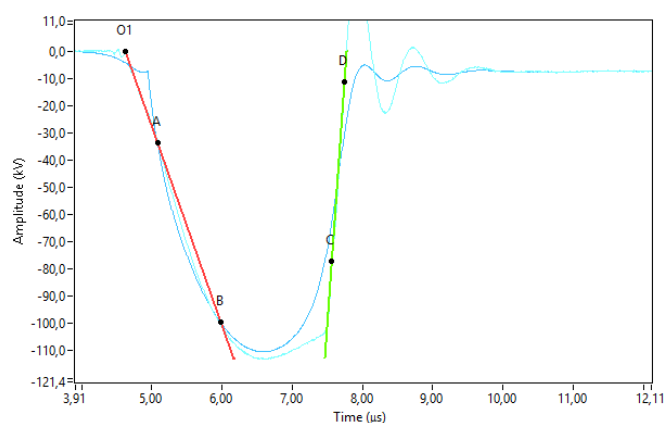
Figura 42 – Formas de onda obtidas durante o ensaio do transformador 1.

Tabela 14 – Resultados obtidos no ensaio de tensão suportável para o transformador 1.

Formas de onda	Parâmetros (IMPREAL)	Valor
Figura 40 (a)	Tempo de frente T_1 (μ s)	1,453
	Tempo de corte T_c (μ s)	2,839
	Valor da tensão de ensaio U_t (kV)	-163,19
Figura 40 (b)	Tempo de frente T_1 (μ s)	1,467
	Tempo de corte T_c (μ s)	2,878
	Valor da tensão de ensaio U_t (kV)	-162,83



(a)



(b)

Figura 43 – Formas de onda obtidas durante o ensaio do transformador 2.

Tabela 15 – Resultados obtidos no ensaio de tensão suportável para o transformador 2.

Formas de Onda	Parâmetros (IMPREAL)	Valor
Figura 41 (a)	Tempo de frente T_1 (μ s)	1,507
	Tempo de corte T_c (μ s)	2,842
	Valor da tensão de ensaio U_t (kV)	-110,4
Figura 41 (b)	Tempo de frente T_1 (μ s)	1,493
	Tempo de corte T_c (μ s)	2,920
	Valor da tensão de ensaio U_t (kV)	-104,5

4.3.

Resultados comparativos

Esta seção apresenta os resultados obtidos por meio da comparação dos parâmetros estimados pelos dois métodos. O método atual baseia-se na norma IEC 60060-1:2010, a fim de calcular os parâmetros de interesse com auxílio do *software* IMPREAL 2.0. Por sua vez, o método alternativo, descrito no capítulo 3 seção 3.3., é implementado com o auxílio do *software* MATLAB. Os dados experimentais aqui utilizados foram obtidos por meio de ensaios experimentais em BT e AT equivalentes aos descritos anteriormente neste capítulo. A comparação entre os resultados é feita por meio do cálculo da diferença percentual entre os parâmetros estimados pelos dois métodos.

4.3.1.

Resultados em baixa tensão (BT)

4.3.1.1.

Variação no overshoot β

As tabelas 16 e 17 apresentam os resultados da comparação entre os dois métodos (definido por norma e alternativo) para os ensaios baseados nas formas de onda positivas e negativas LIC-M4 e LIC-M5 assumindo-se três diferentes níveis de *overshoot*. As figuras 44 e 45 apresentam as formas de onda a partir das quais os parâmetros foram estimados.

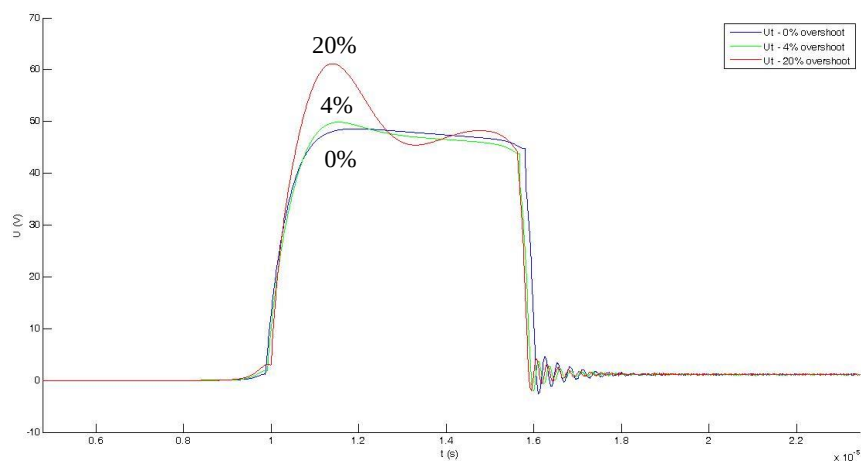


Figura 44 – Formas de onda obtidas para ensaios de IACC baseados na LIC-M4, utilizando-se três diferentes níveis de overshoot.

Tabela 16 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para os ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M4, positivas com variação no nível do overshoot.

Overshoot	Parâmetros	Método Normalizado	Método Alternativo	Diferença
0%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	1,280	1,293	1,02%
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	6,144	6,166	0,36%
	Tensão de ensaio $U_t (V)$	48,56	48,60	0,08%
4%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	1,280	1,280	0,0%
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	5,967	6,005	0,64%
	Tensão de ensaio $U_t (V)$	49,74	49,86	0,24%
20%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	1,293	1,253	-3,09%
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	5,727	5,879	2,65%
	Tensão de ensaio $U_t (V)$	60,76	61,18	0,69%

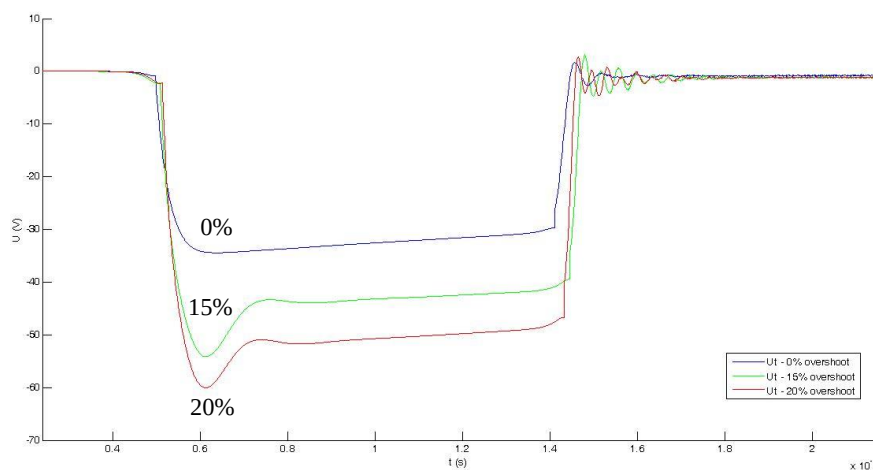


Figura 45 – Formas de onda obtidas para ensaios de IACC baseados na LIC-M5, utilizando-se três diferentes níveis de *overshoot*.

Tabela 17 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para os ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M5, positivas com variação no nível do *overshoot*.

Overshoot	Parâmetros	Método Normalizado	Método Alternativo	Diferença
0%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	0,827	0,840	1,57%
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	9,239	9,307	0,74%
	Tensão de ensaio $U_t (V)$	-34,4	-34,43	0,09%
15%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	0,933	0,920	1,07%
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	9,291	9,568	2,98%
	Tensão de ensaio $U_t (V)$	-53,9	-54,14	0,45%
20%	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	0,853	0,840	1,52%
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	9,192	9,363	1,86%
	Tensão de ensaio $U_t (V)$	-59,82	-56,45	5,63%

4.3.1.1.1.

Análise dos resultados para IACC com variação no overshoot β

Para o maior nível de *overshoot* há uma maior diferença entre os métodos, especialmente em relação ao tempo de frente T_1 , além de que, conforme esperado, em relação ao tempo de corte T_c a diferença aumenta conforme o nível de *overshoot* também aumenta.

4.3.1.2.

Variação no tempo de corte T_c

As tabelas 18 a 21 apresentam os resultados da comparação entre os dois métodos (definido por norma e alternativo) para ensaios baseados nas formas de onda positivas e negativas LIC-M4 e LIC-M5, variando-se o tempo de corte, para os casos sem *overshoot* e com *overshoot*, em 5 valores igualmente espaçados. As figuras 46 a 49 apresentam as formas de onda a partir das quais os parâmetros foram estimados.

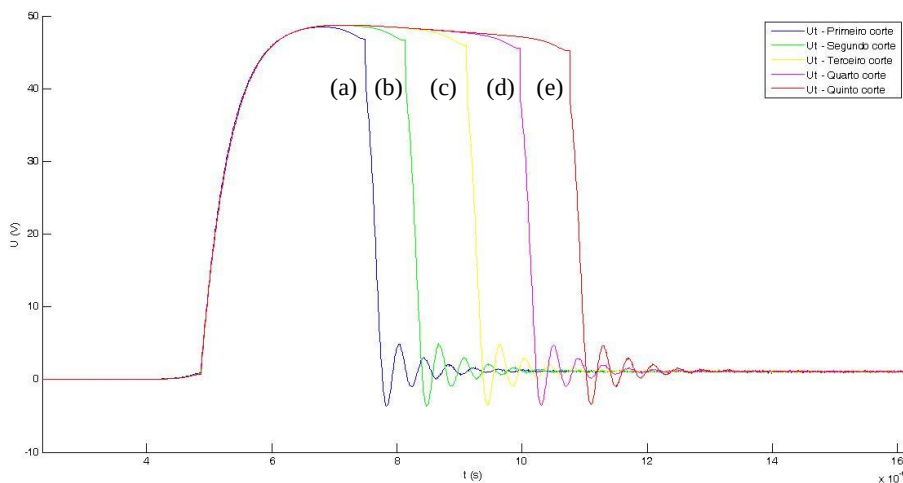


Figura 46 – Formas de onda obtidas por meio de ensaios de IACC baseados na forma de onda padrão LIC-M4, sem *overshoot* e com variação no tempo de corte.

Tabela 18 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M4 sem *overshoot* e com variação no tempo de corte.

0% Overshoot	Parâmetros	Método Normalizado	Método Alternativo	Diferença
T_c = a	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,253	1,293	3,19%
	Tempo de corte T _c (μs)	2,862	2,884	0,77%
	Tensão de ensaio U _t (V)	47,99	48,56	1,19%
T_c = b	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,307	1,333	1,99%
	Tempo de corte T _c (μs)	3,521	3,528	0,20%
	Tensão de ensaio U _t (V)	48,59	48,76	0,35%
T_c = c	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,333	1,333	0%
	Tempo de corte T _c (μs)	4,502	4,5	-0,04%
	Tensão de ensaio U _t (V)	48,74	48,77	0,06%
T_c = d	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,320	1,320	0%
	Tempo de corte T _c (μs)	5,333	5,360	0,51%
	Tensão de ensaio U _t (V)	48,73	48,75	0,04%
T_c = e	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,333	1,333	0%
	Tempo de corte T _c (μs)	6,116	6,145	0,47%
	Tensão de ensaio U _t (V)	48,74	48,75	0,02%

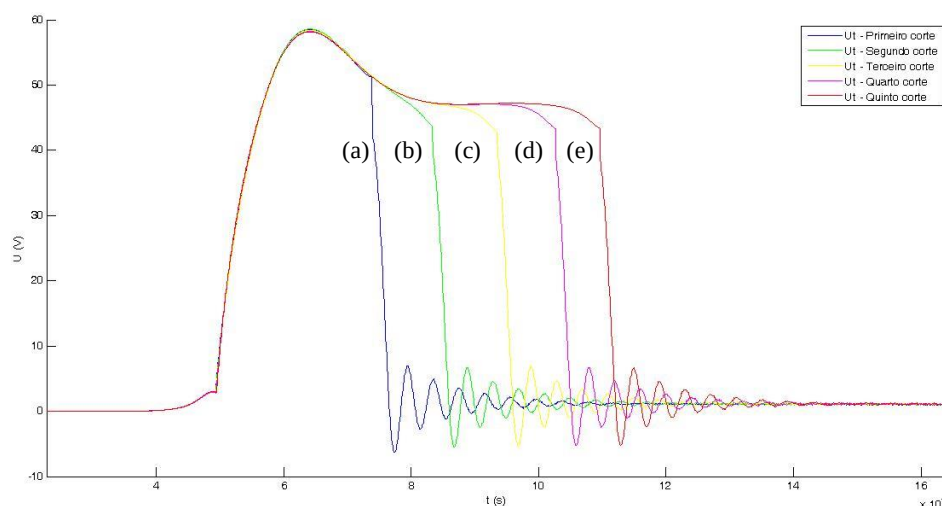


Figura 47 – Formas de onda obtidas por meio de ensaios de IACC baseados na forma de onda padrão LIC-M4, com *overshoot* e com variação no tempo de corte.

Tabela 19 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M4 com *overshoot* e com variação no tempo de corte.

16% Overshoot	Parâmetros	Método Normalizado	Método Alternativo	Diferença
T_c = a	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,307	1,333	1,99%
	Tempo de corte T _c (μs)	2,648	2,702	2,04%
	Tensão de ensaio U _t (V)	57,58	58,13	0,96%
T_c = b	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,307	1,333	1,99%
	Tempo de corte T _c (μs)	3,503	3,650	4,20%
	Tensão de ensaio U _t (V)	57,83	58,73	1,56%
T_c = c	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,320	1,307	-0,98%
	Tempo de corte T _c (μs)	4,508	4,654	3,24%
	Tensão de ensaio U _t (V)	57,83	58,40	0,99%
T_c = d	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,320	1,307	-0,98%
	Tempo de corte T _c (μs)	5,428	5,569	2,60%
	Tensão de ensaio U _t (V)	57,83	58,23	0,69%
T_c = e	Tempo de frente T ₁ (μs)	1,320	1,307	-0,98%
	Tempo de corte T _c (μs)	6,112	6,262	2,45%
	Tensão de ensaio U _t (V)	57,83	58,17	0,59%

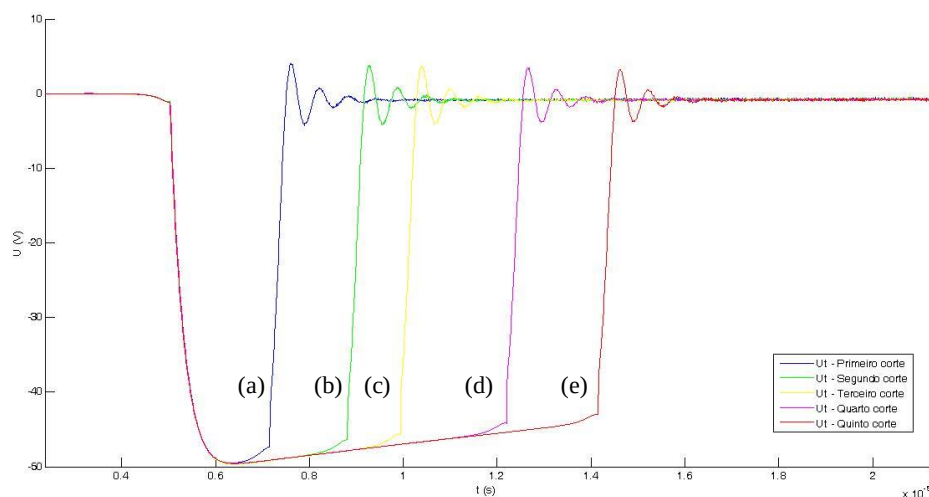


Figura 48 – Formas de onda obtidas por meio de ensaios de IACC baseados na forma de onda padrão LIC-M5, sem *overshoot* e com variação no tempo de corte.

Tabela 20 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M5 sem *overshoot* e com variação no tempo de corte.

0% Overshoot	Parâmetros	Método Normalizado	Método Alternativo	Diferença
T_c = a	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,813	0,853	4,92%
	Tempo de corte T _c (μs)	2,272	2,279	0,31%
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 49,10	- 49,70	1,22%
T_c = b	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,827	0,840	1,57%
	Tempo de corte T _c (μs)	3,915	3,941	0,66%
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 49,53	- 49,62	0,18%
T_c = c	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,827	0,840	1,57%
	Tempo de corte T _c (μs)	5,030	5,067	0,74%
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 49,55	- 49,60	0,10%
T_c = d	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,839	0,827	-1,43%
	Tempo de corte T _c (μs)	7,274	7,326	0,71%
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 49,52	- 49,55	0,06%
T_c = e	Tempo de frente T ₁ (μs)	0,839	0,840	0,01%
	Tempo de corte T _c (μs)	9,222	9,285	0,68%
	Tensão de ensaio U _t (V)	- 49,54	- 49,57	0,06%

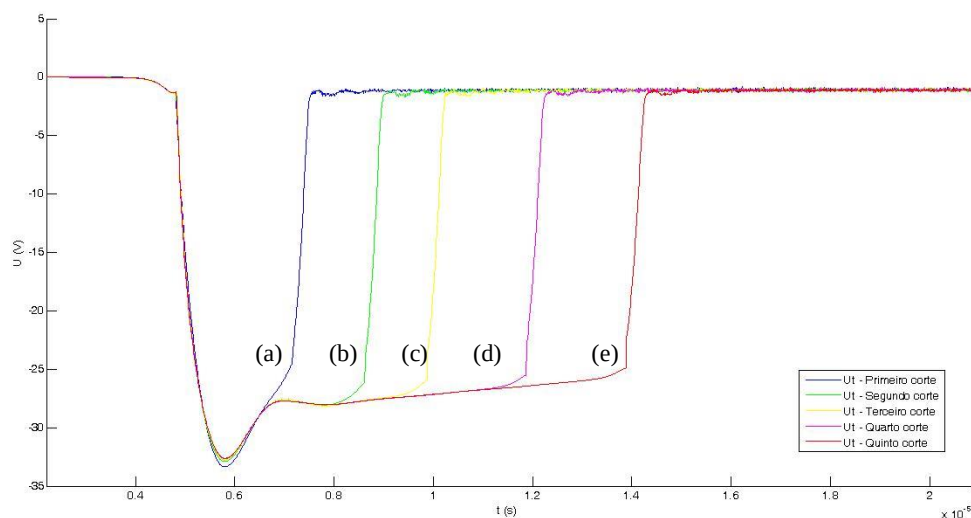


Figura 49 – Formas de onda obtidas por meio de ensaios de IACC baseados na forma de onda padrão LIC-M5, com overshoot e com variação no tempo de corte.

Tabela 21 – Resultado da comparação entre os dois métodos, para ensaios de IACC baseados na forma de onda LIC-M5 com overshoot e com variação no tempo de corte.

16% Overshoot	Parâmetros	Método Normalizado	Método Alternativo	Diferença
$T_c = a$	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	0,853	0,867	1,64%
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	2,347	2,510	6,95%
	Tensão de ensaio $U_t (V)$	- 32,52	- 33,43	2,79%
$T_c = b$	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	0,839	0,840	0,01%
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	3,828	3,968	3,66%
	Tensão de ensaio $U_t (V)$	- 32,58	-32,88	0,92%
$T_c = c$	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	0,853	0,840	-1,52%
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	5,065	5,219	3,04%
	Tensão de ensaio $U_t (V)$	- 32,55	-32,76	0,65%
$T_c = d$	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	0,853	0,853	0%
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	7,044	7,211	2,37%
	Tensão de ensaio $U_t (V)$	- 32,53	-32,65	0,37%
$T_c = e$	Tempo de frente $T_1(\mu s)$	0,866	0,853	-1,61%
	Tempo de corte $T_c (\mu s)$	9,017	9,235	2,42%
	Tensão de ensaio $U_t (V)$	- 32,51	-32,62	0,34%

4.3.1.2.1.

Análise dos resultados para IACC com variação no T_c

Para a variação no tempo de corte, observa-se uma maior diferença quando o corte ocorre mais próximo da crista, tanto para o tempo de frente T_1 quanto para o tempo de corte T_c .

4.3.2.

Resultados em alta tensão (AT)

4.3.2.1.

Transformador de distribuição

As tabelas 22 e 23 apresentam os resultados da comparação entre os parâmetros estimados pelos dois métodos (definido por norma e alternativo), para as formas de onda obtidas no ensaio de tensão suportável em dois transformadores de distribuição, apresentados na seção 4.2. Por sua vez, as figuras 50 e 51 apresentam as formas de onda correspondentes obtidas.

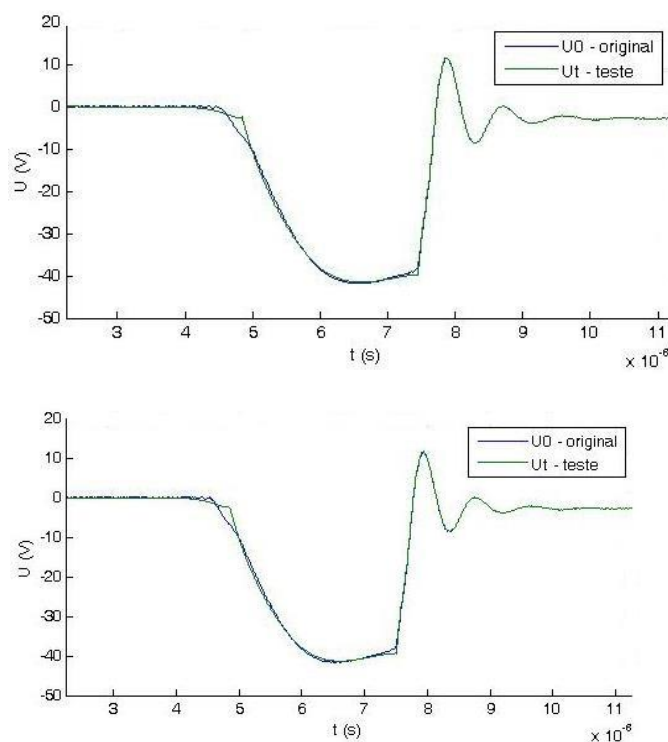


Figura 50 – Formas de onda referente aos ensaios de IACC realizados com o Trafo 1, apresentando a curva original e a tensão de ensaio cortadas no instante do colapso de tensão.

Tabela 22 – Resultado da comparação entre os parâmetros estimados pelos dois métodos, a partir das formas de onda apresentadas na figura 48.

Formas de Onda	Parâmetros	Método Normalizado	Método Alternativo	Diferença
Figura 48 (a)	Tempo de frente T_1 (μ s)	1,453	1,520	4,61%
	Tempo de corte T_c (μ s)	2,839	2,876	1,30%
	Valor da tensão de ensaio U_t (kV)	-163,2	- 165,1	1,17%
Figura 48 (b)	Tempo de frente T_1 (μ s)	1,467	1,520	3,61%
	Tempo de corte T_c (μ s)	2,878	2,933	1,91%
	Valor da tensão de ensaio U_t (kV)	-162,8	- 164,4	0,96%

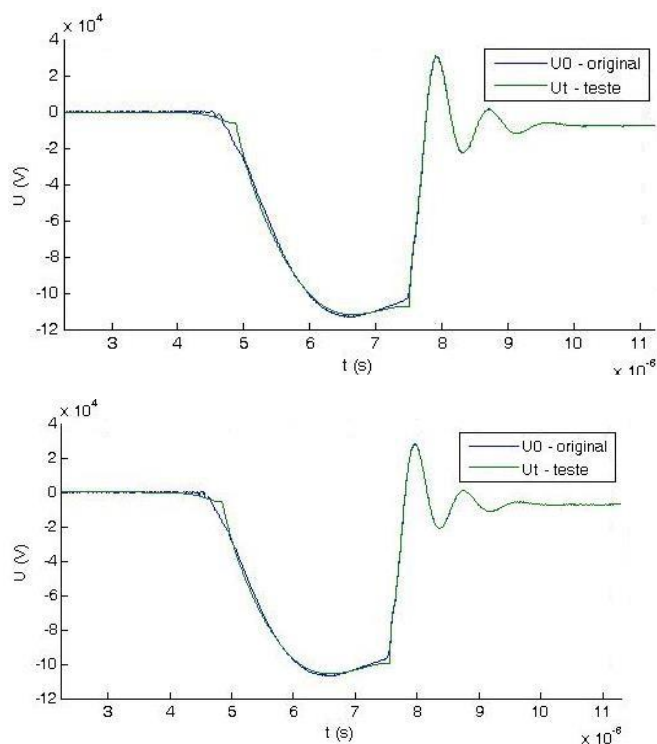


Figura 51 – Formas de onda referente aos ensaios de IACC realizados com o Trafo 2, apresentando a curva original e a tensão de ensaio cortadas no instante do colapso de tensão.

Tabela 23 – Resultado da comparação entre os parâmetros estimados pelos dois métodos, a partir das formas de onda apresentadas na figura 49.

Formas de onda	Parâmetros	Método Normalizado	Método Alternativo	Diferença
Figura 49 (a)	Tempo de frente T_1 (μs)	1,507	1,560	3,52%
	Tempo de corte T_c (μs)	2,842	2,903	2,15%
	Valor da tensão de ensaio U_t (kV)	-110,4	- 111,66	1,14%
Figura 49 (b)	Tempo de frente T_1 (μs)	1,493	1,533	2,68%
	Tempo de corte T_c (μs)	2,920	2,971	1,75%
	Valor da tensão de ensaio U_t (kV)	-104,5	- 105,35	0,81%

4.3.2.1.1.

Análise dos resultados para ensaio de tensão suportável sob impulso

Em ensaios de tensão suportável sob impulso em transformadores, a forma resultante do impulso é frequentemente oscilatória. Consequentemente, a comparação entre os dois métodos apresentou uma maior diferença em relação ao tempo de frente T_1 . Por outro lado, para o tempo de corte T_c , houve pequena diferença entre os resultados.

Os transitórios elétricos resultam de uma variedade enorme de causas e são de fundamental importância no que diz respeito à elaboração de especificações de equipamentos, bem como no dimensionamento do isolamento das linhas de transmissão e subestações. Esses transitórios dão origem a diferentes tipos de sobretensões na rede de transmissão, sendo elas de origem externa (impulsos atmosféricos) ou interna (impulsos de manobra), conforme descrito no Capítulo 2 desta dissertação. Esses dois tipos de sobretensões são reproduzidas e simuladas nos laboratórios de alta tensão do Cepel por meio de ensaios elétricos para a verificação das condições de suportabilidade do isolamento de equipamentos elétricos, quando estes são submetidos a esforços dielétricos padronizados descritos na norma IEC 60060-1:2010 [7].

Neste contexto, esta dissertação focou em ensaios referentes a sobretensões de origem externa (impulsos atmosféricos), principalmente em ensaios de Impulso Atmosférico Cortados na Cauda (IACC). Por meio dos conceitos teóricos apresentados nos Capítulos 2 e 3, foram abordados e detalhados com clareza todos os aspectos relevantes para um melhor entendimento do processo experimental apresentado no capítulo 4, a fim de propiciar uma melhor compreensão dos resultados.

Esta dissertação de mestrado, desenvolvida dentro do programa de Pós-graduação em Metrologia (PósMQI) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) apresentou um método alternativo para o processamento das formas de onda de Impulsos Atmosféricos Cortados na Cauda (IACC), que tem potencial para simplificar os procedimentos demandados por este tipo de ensaio, além de influenciar diretamente o algoritmo dos *softwares* atualmente utilizados para este tipo de medição.

O método atualmente normalizado para processamento desse tipo de impulso requer a aquisição prévia de uma forma de Impulso Atmosférico Pleno (IAP) de referência, além da forma de onda cortada na cauda ambas utilizando-se da mesma instalação experimental. A amplitude de um IAP pode, em alguns casos, ser menor do que a do IACC, porém, ainda assim, existe a necessidade de aplicá-lo separadamente, adquirir a forma de onda, calcular um fator de escala para corrigir a diferença de

amplitudes e alinhar as duas formas de onda no tempo, sendo este um procedimento que pode ser difícil em certas situações [15].

O método foi testado inicialmente nas duas formas de onda de IACC disponíveis na norma IEC 61083-2:2013 [17]. Para uma validação preliminar do método, foram utilizadas formas de onda com parâmetros de amplitude e tempo dentro do intervalo de aceitação. Em seguida, a fim de testar e validar a robustez do método, ele foi testado com diversos tipos de formas de onda, tanto em baixa tensão (BT), com auxílio de um gerador de impulsos de bancada, variando os níveis de *overshoot* e os tempos de corte, quanto em alta tensão (AT), por meio de ensaios de tensão suportável sob impulso atmosférico em transformadores de distribuição, e os resultados obtidos pelo método normalizado foram então comparados com os resultados do novo método alternativo.

Com relação ao ajuste da dupla exponencial, todos os casos analisados renderam bons resultados com pequenos RMSEs entre a onda original e a ajustada. Os piores RMSEs obtidos para os casos analisados foram: $RMSE = 1,68\%$ para variação no *overshoot* (6 casos), $RMSE = 1,29\%$ para variação no tempo de corte (20 casos) e $RMSE = 0,94\%$ para os resultados dos ensaios de tensão suportável sob impulso (4 casos).

Analisando os resultados da comparação entre os dois métodos aqui discutidos (definido por norma e alternativo), pode-se concluir que a variação percentual entre os parâmetros estimados por meio dos dois métodos é satisfatoriamente pequena, com os parâmetros de amplitude e tempo dentro dos limites de aceitação.

Como proposta para trabalhos futuros, indica-se a necessidade de mais estudos a fim de verificar eventuais restrições de aplicabilidade do método alternativo. Por exemplo, a exatidão do tempo de corte T_c estimado pelo novo método deve ser minuciosamente avaliada, no caso de uma forma de onda cortada muito perto do valor de pico, pois pode haver dificuldades para o ajuste da exponencial dupla.

O Cepel é uma sociedade civil sem fins lucrativos mantido pela Eletrobrás, sendo o maior centro de pesquisas em energia elétrica do Hemisfério Sul e possuindo uma grande preocupação com a qualidade e confiabilidade dos resultados fornecidos por seus diversos laboratórios de ensaios, sendo por isso importante ressaltar que estes estudos visam contribuir para a capacitação e adequação dos laboratórios de alta tensão (AT) e ultra alta tensão (UAT), auxiliando nas técnicas de ensaios e medições realizados com impulsos.

Referências bibliográficas

- [1] ABNT NBR ISO IEC 17025 – “Requisitos Gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração”, 2005.
- [2] IEC 60060 “High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements”, 1989
- [3] IEC 60060 “High-voltage test techniques, Part 2: Measuring systems”, 1994
- [4] BARBOSA, C. R. H.; SILVA, M. T. F.; AZEVEDO; FERREIRA, L. S., “Effect of the overshoot level in an alternative method for processing of tail chopped lightning impulses,” in Proc. CBM - Semetro, 2015.
- [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] ABNT NBR IEC 62271-102 “Equipamentos de alta tensão - parte 102: seccionadores e chaves de aterramento”, 2006.
- [7] IEC 60060 “High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements”, 2010.
- [8] IEC 60071 “Insulation co-ordination, Part 1: Definitions, principles and rules”, 2006.
- [9] DE MELLO, D. R. Curso sobre técnicas de medição e de ensaios de alta tensão 1- Centro de pesquisas de energia elétrica, 1987.
- [10] ATALLAH, M. C. M. Apostila Geradores de Impulso Haefely Ensaios com Impulso Atmosférico e Manobra - Noções básicas, Eletrobras CEPEL, 2013.
- [11] ABNT NBR IEC 60060 “Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão, Parte 1: definições gerais e requisitos de ensaio”, 2013.
- [12] FILHO, O. B. O. ; SILVA, M. T. F. Técnicas de medição em ensaios de alta tensão. Rio de Janeiro, Eletrobras CEPEL, 1996, 110p. Relatório Técnico.
- [13] MELLO, D. R. Técnicas alta tensão - Rio de Janeiro, Eletrobras CEPEL, 1987, 250p. Relatório Técnico.
- [14] IEC 60060 “High-voltage test techniques, Part 2: Measuring systems”, 2010.

- [15] BARBOSA, C. R. H.; HÄLLSTRÖM, J.; SILVA, M. T. F.; AZEVEDO, L. C.; FERREIRA, L. S., “Alternative Method for Processing Tail Chopped Lightning Impulse Waveforms”, IMEKO, Prague, Czech Republic, 2015.
- [16] IEC 61083-1 “Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 1: Requirements for instruments”, 2001.
- [17] IEC 61083-2 “Digital records for measurements in high-voltage impulse test – Part 2: Evaluation of software used for determination of the parameters of impulse waveforms” -2013.
- [18] SCHON, K High impulse voltage and current measurement techniques, Fundamentals measuring instruments measuring methods, New York, 2013, 264p.
- [19] ISO GUM / 2003 – Guia para expressão da incerteza de medição – Terceira edição.
- [20] SILVA, M. T. F.; AZEVEDO L. C.; BARBOSA, C. R. H.; SILVA, E. C.; FARIA, L. C. Implementação dos novos requisitos da norma IEC 60060-1:2010 nos laboratórios de ensaios e calibração em alta tensão do CEPEL. Rio de Janeiro, Eletrobras CEPEL, 2013, 110p. Relatório Técnico.
- [21] BARBOSA, C. R. H.; HÄLLSTRÖM, J.; SILVA, M. T. F.; L.C. AZEVEDO; FARIA, L. C., “Validation of a system for evaluation of high voltage impulses according to IEC 60060:2010,” in Proc. CPEM, 2014.
- [22] BARBOSA, C. R. H.; HÄLLSTRÖM, J.; SILVA, M. T. F.; L.C. AZEVEDO; FARIA, L. C., “Estimation of Time Parameters of Tail Chopped Lightning Impulses – Clarification of the Standard IEC 60060-1:2010,” in Proc. CPEM, 2014.
- [23] ABNT NBR 6939 “Coordenação do Isolamento - Procedimento”, 2000.
- [24] ABNT NBR 5356-3 “Transformadores de potência Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar”, 2007.
- [25] ABNT NBR 6936 “Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão”, 1992.

Anexo 1 – Artigo XXI World Congress “Measurement in Research and Industry” (IMEKO)

XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”
August 30 – September 4, 2015, Prague, Czech Republic

ALTERNATIVE METHOD FOR PROCESSING TAIL CHOPPED LIGHTNING IMPULSE WAVEFORMS

*Carlos R. Hall Barbosa*¹, *Jari Hällström*², *Lilian S. Ferreira*^{1,3}, *Marcio T. Silva*³, *Luiz C. Azevedo*³

¹ Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Posgraduate Programme in Metrology, Rio de Janeiro, Brazil,
hall@puc-rio.br

² Centre for Metrology and Accreditation (MIKES), Espoo, Finland

³ Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Rio de Janeiro, Brazil

Abstract – The International Electrotechnical Commission issued in 2010 a revision of the standards IEC 60060, describing how to calculate amplitude and time parameters used to evaluate high voltage tail chopped lightning impulse waveforms. However, the need for a full reference lightning impulse, in addition to the tail chopped impulse, creates difficulties for the tests and processing of the waveforms. This paper proposes an alternative method that precludes the need for the reference impulse and tests it with standard and experimental waveforms.

Keywords: high voltage, impulse testing, measurement standards, measurement techniques, software.

1. INTRODUCTION

The International Electrotechnical Commission (IEC) issued in 2010 the third revision of standards IEC 60060-1 “High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements” [1] and IEC 60060-2 “High Voltage Test Techniques - Part 2: Measuring Systems” [2]. These standards are the basis for the calibration and tests of high voltage equipment to be performed by industrial labs, power companies and high voltage research labs.

The previous standard IEC 60060-1:1989 [3] classified lightning-impulses in two types: “smooth” and “with damped oscillations”. The latter case demanded the user to manually draw a mean curve through the oscillations, and the distinction between the two cases was based on the frequency of the oscillations, being 0.5 MHz the transition value.

This new standard IEC 60060-1:2010, based on experimental points from European experiments, defined the smooth function $k(f)$, which represents the response of the equipment insulation to impulses with overshoot and is called test voltage function, in replacement of the previous abrupt transition:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2.2f^2}, \quad (1)$$

f being the frequency in MHz. The digital filter defined by $k(f)$ is essentially a low-pass filter, as shown in Fig. 1.

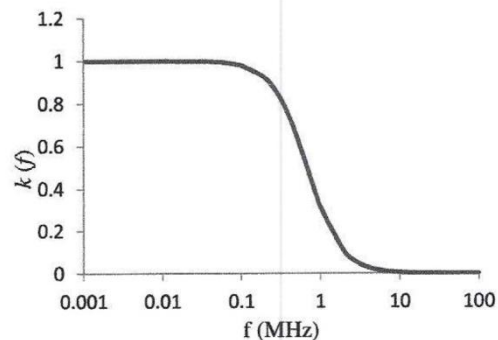


Fig. 1. Test voltage function $k(f)$.

The signal processing necessary to estimate the time and amplitude parameters that characterize the high voltage impulses is described in the standards for full lightning impulses, and involves:

- (a) fitting a double exponential curve to the recorded curve $U_0(t)$, in order to obtain the so-called base curve $U_m(t)$;
- (b) calculating a residual curve $R(t)$ (which basically consists on the overshoot information) by subtracting the base curve $U_m(t)$ from the recorded curve $U_0(t)$;
- (c) filtering this residual curve by a digital filter based on the test voltage function (1); and
- (d) adding the filtered residual $R_f(t)$ to the base curve $U_m(t)$, thus obtaining the test voltage curve $U_t(t)$, from which the relevant amplitude and time parameters are estimated [4,5].

This processing also needs to be applied to tail chopped lightning impulses, but there are additional difficulties such as the need to acquire a full lightning impulse and a more complicated processing of the waveforms.

The next section briefly describes tail chopped lightning impulses and the relevant parameters, followed by an example of processing following literally the description of the IEC standard. Section 4 then describes in details the alternative processing herein proposed, followed by an experimental validation in Section 5 and a brief conclusion.

2. TAIL CHOPPED LIGHTNING IMPULSES

Tail chopped lightning impulses (LIC) are based on a standard full lightning impulse, which rises to its peak value in (typically) 2 μs and slowly falls to zero. A chopping gap is used in the field and collapses the waveform after some preset time, subjecting the test object to an enormous stress.

If the chopping occurs before the peak value is reached (typically between 0.5 μs and 0.9 μs), the impulse is *chopped on the front*, otherwise it is *tail chopped* [6].

According to IEC 60060-1 standard, the two time parameters that need to be calculated in order to evaluate the tail chopped waveform are the front time T_1 and the time to chopping T_c , shown in Fig. 2. There is also one amplitude parameter, which is called the value of the test voltage (U_t) and is essentially the extreme value of the waveform.

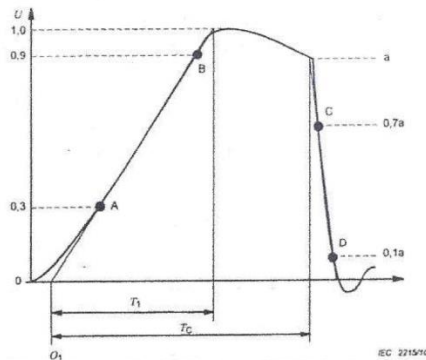


Fig. 2. Typical normalized tail chopped lightning impulse showing the relevant time parameters T_1 and T_c .

Referring to Fig. 2, initially it is necessary to find the virtual origin O_1 , which is the intersection with the time axis of the line through points A (30% of peak value) and B (90% of peak value). The front time T_1 is then calculated as $(t_B - t_A)/0.6$. The time to chopping T_c is the time interval between the virtual origin O_1 and the instant of chopping t_c , which is the extrapolation of the line between the 70% and 10% points (C and D) on the voltage collapse.

IEC 61083-2:2013 [7] sets requirements for software for impulse voltage measurements, and provides standardized waveforms that can be used to test the processing algorithms, together with reference values and acceptance intervals for each amplitude and time parameter. Two tail chopped impulses, together with their full reference lightning impulses, are available, entitled “LIC-M4” and “LIC-M5”, shown in Fig. 3 and Fig. 4, with the acceptance intervals shown in Table 1. The reference value for each case is the center of the respective acceptance interval.

Table 1. Acceptance intervals for 61083-2 LIC waveforms.

Waveform	Parameter	Acceptance Interval
LIC-M4	Front time T_1 (μs)	1.279 to 1.331
	Time to chopping T_c (μs)	5.877 to 6.117
	Value of test voltage U_t (kV)	0.146 to 0.149
LIC-M5	Front time T_1 (μs)	0.840 to 0.874
	Time to chopping T_c (μs)	9.055 to 9.425
	Value of test voltage U_t (kV)	-393.8 to -386.0

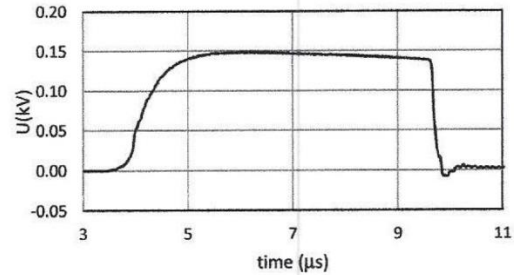


Fig. 3. Waveform LIC-M4 from standard 61083-2:2013.

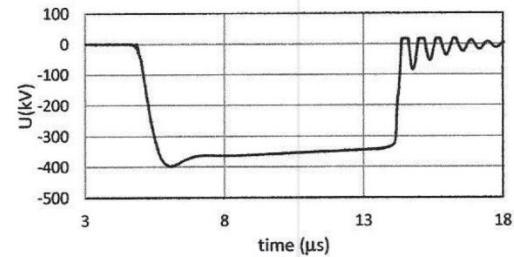


Fig. 4. Waveform LIC-M5 from standard 61083-2:2013.

3. STANDARD PROCESSING

The overshoot processing demands the fitting of a double exponential to the recorded curve, based on (2), whereas the nonlinear fitting algorithm aims at finding the parameters U , t_d , τ_1 and τ_2 .

$$u_d(t) = U \left(e^{\frac{-(t-t_d)}{\tau_1}} - e^{\frac{-(t-t_d)}{\tau_2}} \right) \quad (2)$$

However, this fitting in principle is not possible for a chopped waveform such as the one shown in Fig. 2. Thus, IEC 60060-1 indicates the need of two records for each test:

- the tail chopped lightning impulse $U_0(t)$; and
- a full reference lightning impulse $U_F(t)$, recorded using the same experimental setup, which allows the fitting of a standard double exponential, from which the base curve $U_m(t)$ is obtained.

For LIC impulses, IEC standard [1] defines that the test voltage curve $U_t(t)$ is to be calculated only up to the instant of chopping t_c . However, the time to chopping T_c is defined as the interval between the virtual origin O_1 and the instant of chopping t_c , and the latter is based on the extrapolation of the line between the points C and D. Thus, a test voltage curve defined as described in [1] would not allow these calculations. This issue has been dealt with [8,9] with good results, and Table 2 presents the time parameters obtained with the standard processing.

Table 2. Results of the standard processing.

Waveform	Parameter	Value	Error
LIC-M4	Front time T_1 (μs)	1.306	0.08%
	Time to chopping T_c (μs)	5.977	0.33%
	Value of test voltage U_t (kV)	0.148	0.34%
LIC-M5	Front time T_1 (μs)	0.865	0.93%
	Time to chopping T_c (μs)	9.231	0.10%
	Value of test voltage U_t (kV)	-389.7	0.05%

Table 3 presents the results of the double exponential fit using the full reference lightning impulses provided by standard IEC 61083-2:2013 along with the tail chopped waveforms.

Table 3. Double exponential best fit parameters for the full reference lightning impulse.

Waveform	τ_1 (μ s)	τ_2 (μ s)	t_d (μ s)	U (kV)
LIC-M4	54.74	0.46	3.79	0.153
LIC-M5	90.79	0.26	4.99	-360.36

4. ALTERNATIVE PROCESSING

The need for a full reference lightning impulse is dictated by IEC 60060-1 due to the fact that a tail chopped waveform does not follow the smooth double exponential shape described by (2), and this would preclude a proper fitting.

However, as the test voltage curve $U_t(t)$ needs to be calculated only up to the instant of chopping t_c , the fitting of the double exponential also needs to be done only for this period. That is, if the recorded curve $U_0(t)$ is truncated at the instant of the voltage collapse, it should be possible to fit a double exponential and then proceed with the overshoot processing without the need of the full lightning impulse.

This approach has been tested in this work for both tail chopped waveforms from IEC 61083-2:2013 standard. Initially, Fig. 5 and Fig. 6 present the result of the double exponential fitting.

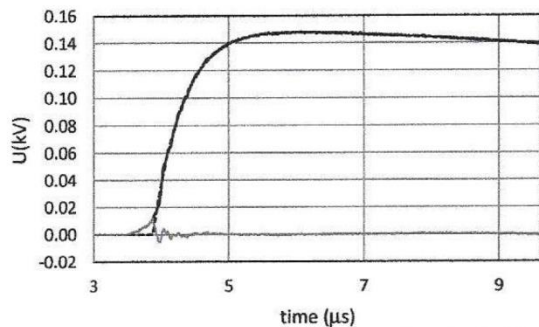


Fig. 5. Fitting of a double exponential to waveform LIC-M4 from standard 61083-2:2013 truncated at the instant of voltage collapse. The solid line is the tail chopped waveform, the dashed line is the fitted double exponential, and the gray line is the residual.

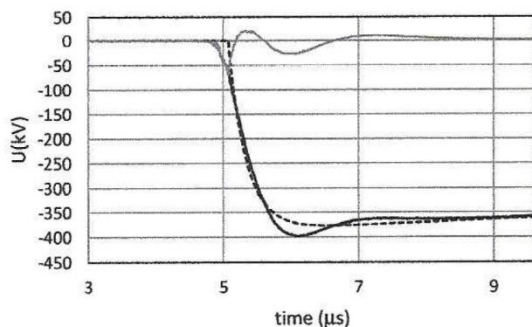


Fig. 6. Fitting of a double exponential to waveform LIC-M5 from standard 61083-2:2013 truncated at the instant of voltage collapse. The solid line is the tail chopped waveform, the dashed line is the fitted double exponential, and the gray line is the residual.

Both cases yielded good results with small residuals (RMSE = 0.28% for LIC-M4 and RMSE = 0.79% for LIC-M5). The larger residual near the wavefront is expected, as the double exponential needs to be truncated and filled with zeroes before the instant t_d . Also, LIC-M5 presents a larger overshoot than LIC-M4, and this affects the fit. Table 4 presents the results of the double exponential fit using the truncated tail chopped lightning impulses provided by standard IEC 61083-2:2013.

Table 4. Double exponential best fit parameters for the truncated tail chopped lightning impulse waveform.

Waveform	τ_1 (μ s)	τ_2 (μ s)	t_d (μ s)	U (kV)
LIC-M4	52.98	0.45	3.87	0.155
LIC-M5	64.07	0.27	5.07	-386.9

By comparing the results presented in Table 4 with Table 3, it can be noticed a good agreement between the results, with the exception of a larger discrepancy for the parameter τ_1 in the case of LIC-M5 waveform. This parameter τ_1 controls the rate of fall in the wavetail, while the parameter τ_2 controls the rate of rise in the wavefront. In both cases, the smaller the parameter, the steeper is the wave variation.

Nevertheless, the double exponential fitting is an auxiliary procedure employed in order to allow the test voltage function $k(f)$ to be applied on the overshoot information, separate from the smooth lightning impulse. Should the lowpass digital filter be applied directly to the high voltage impulse, full lightning or tail chopped, it would smooth the entire waveform and distort especially the time parameters, which depend heavily on the frequency content of the waveforms. Thus, the quality of the processing needs not to be assessed based on the double exponential fit parameters, but instead on the amplitude and time parameters that are defined by IEC 60060:2010 standards and which reference values and acceptance intervals are defined by IEC 61083-2:2013 standard for each waveform.

Table 5 presents the time and amplitude parameters calculated using the alternative processing above described for both waveforms LIC-M4 and LIC-M5.

Table 5. Results of the alternative processing.

Waveform	Parameter	Value	Error
LIC-M4	Front time T_1 (μ s)	1.306	0.08%
	Time to chopping T_c (μ s)	5.953	0.73%
	Value of test voltage U_t (kV)	0.148	0.34%
LIC-M5	Front time T_1 (μ s)	0.869	1.40%
	Time to chopping T_c (μ s)	9.228	0.13%
	Value of test voltage U_t (kV)	-390.5	0.15%

By comparing Table 5 with Table 1, it can be seen that all amplitude and time parameters fall within the respective acceptance intervals, which is a good indicative of the feasibility of this alternative processing.

Also, by comparing Table 5 with Table 2, the differences between the parameters are quite small for the two methods. Some of the percent errors in relation to the reference values for the alternative processing are larger than the standard processing, but the parameters still fall within their acceptance intervals.

5. EXPERIMENTAL RESULTS

The experimental data has been measured by the system IMPREAL 2.0 (acronym for Impulse Response Analysis), developed in LabVIEW 2011, which acquires, analyses and calculates the relevant time parameters for the six types of high-voltage impulse waveforms [10].

In order to have a better control of the waveform parameters, a lab bench recurrent surge generator RSG 482 from Haefely has been used to generate a full reference lightning impulse and a corresponding tail chopped lightning, shown in Fig. 7 and Fig. 8, respectively.

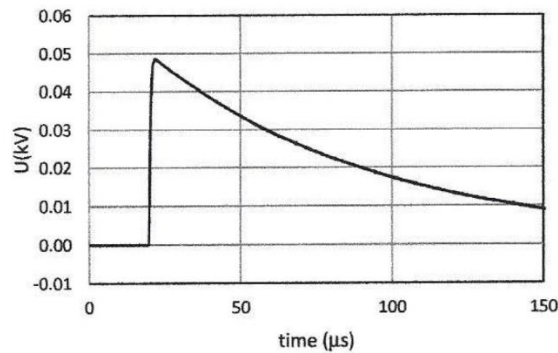


Fig. 7. Experimental full reference lightning impulse waveform generated by recurrent surge generator RSG 482 from Haefely and measured by IMPREAL 2.0.

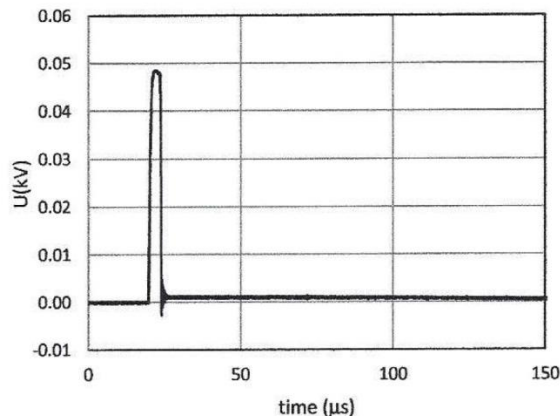


Fig. 8. Experimental tail chopped lightning impulse waveform generated by recurrent surge generator RSG 482 from Haefely and measured by IMPREAL 2.0.

IMPREAL 2.0, which follows the processing defined in the standard IEC 60060-1:2010, yielded the parameters indicated in Table 6. Fig. 9 shows a zoom on the tail chopped lightning impulse together with the relevant points identified by the software.

Table 6. Results of the standard processing for the experimental waveform.

Parameter	Value
Front time T_f (μ s)	1.280
Time to chopping T_c (μ s)	4.074
Value of test voltage U_t (kV)	0.049

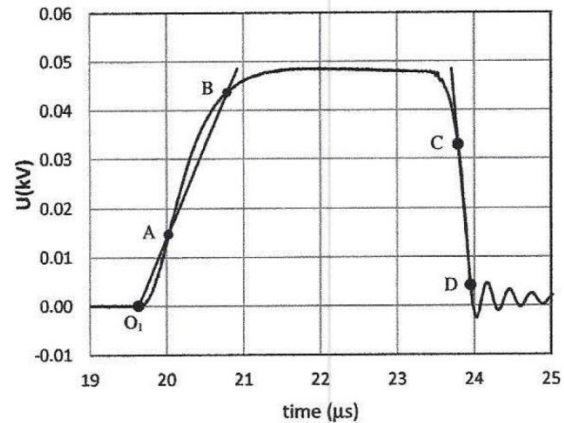


Fig. 9. Results of the standard processing of the tail chopped lightning impulse shown in Fig. 8. O1 is the virtual origin, A is the 30% point, B is the 90% point, C is the 70% point and D is the 10% point.

Considering now the alternative processing described in section 4, Fig. 10 presents the result of the double exponential fitting, which again yields a small residual, with an RMSE of 0.25%, while Table 7 presents the parameters of the double exponential fit.

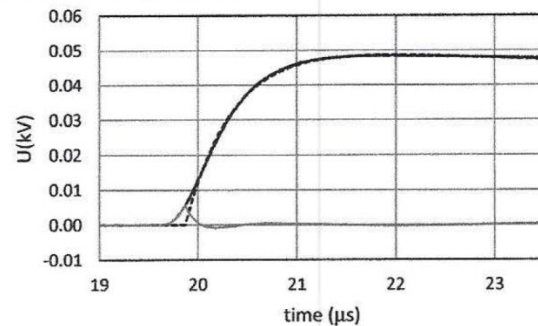


Fig. 10. Fitting of a double exponential to the waveform shown in Fig. 8 truncated at the instant of voltage collapse. The solid line is the tail chopped waveform, the dashed line is the fitted double exponential, and the gray line is the residual.

Table 7. Double exponential best fit parameters for the experimental truncated tail chopped lightning impulse waveform shown in Fig. 10.

τ_1 (μ s)	τ_2 (μ s)	t_d (μ s)	U (kV)
37.95	0.38	19.87	0.052

Finally, Table 8 presents the time and amplitude parameters calculated using the alternative processing and the percent differences in relation to the results of standard processing shown in Table 6.

Table 8. Results of the alternative processing for the experimental waveform.

Parameter	Value	Difference
Front time T_f (μ s)	1.293	1.02%
Time to chopping T_c (μ s)	4.088	0.34%
Value of test voltage U_t (kV)	0.049	0.0%

6. CONCLUSIONS

This manuscript presented an alternative method for processing of tail chopped lightning impulse waveforms that has the potential to simplify the procedures for this type of high voltage testing.

The standard method requires, besides the tail chopped waveform, the acquisition of a full lightning waveform using the same experimental setup, to be used as a reference for the overshoot processing. The amplitude of this full lightning impulse waveform can be smaller than the tail chopped, but nevertheless it is still necessary to apply it separately, acquire the waveform, calculate a scale factor to correct the difference in amplitudes and align both waveforms in time, a procedure that might prove difficult in certain situations.

The alternative method relies solely on the tail chopped lightning impulse itself, and was tested in the two tail chopped waveforms included in the IEC 61083-2:2013 standard. The time and amplitude parameters were within the acceptance interval, providing a preliminary validation of the method. It was also tested with an experimental waveform by comparison with the standard method, with good results.

Further studies are needed in order to verify any restrictions on the applicability of the alternative method, especially regarding the chopping time, as a waveform that is chopped too close to the peak value might originate difficulties for the fitting of the double exponential function.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank CEPEL and the Brazilian funding agency CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) for their financial support.

REFERENCES

- [1] IEC 60060-1:2010 "High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements".
- [2] IEC 60060-2:2010 "High Voltage Test Techniques - Part 2: Measuring Systems".
- [3] IEC 60060-1:1989 "High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements".
- [4] A. Nilsson, A. Mannikoff, J. Hällström and Y. Li, "New Procedures for Determination of Parameters of Lightning Impulse Voltage Waveforms", *XVth Int. Symp. High Voltage Engineering*, Ljubljana, Slovenia, Sept. 2007.
- [5] J. Hällström, A. Bergman, Ding, F. Garnacho, R. Gobbo, T. Kato, Y. Li, A. Nilsson, G. Pesavento, S. Sato and A. X. Yu, "International comparison of software for calculation of lightning impulse parameters based on a new processing algorithm", *XVth Int. Symp. High Voltage Engineering*, Ljubljana, Slovenia, Sept. 2007.
- [6] K. Schon, *High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques: Fundamentals – Measuring Instruments – Measuring Methods*, Springer, Switzerland, 2013.
- [7] IEC 61083-2:2013, "Digital recorders for measurements in high voltage impulse tests – Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms".
- [8] C. R. H. Barbosa, J. Hällström, M. T. Silva, L. C. Azevedo and L. C. Faria, "Estimation of Time Parameters of Tail Chopped Lightning Impulses – Clarification of the Standard IEC 60060-1:2010", *Conf. Prec. Electromagnetic Meas.*, Rio de Janeiro, Brazil, 2014.
- [9] C. R. H. Barbosa, J. Hällström, M. T. Silva, L. C. Azevedo and L. C. Faria, "Tail Chopped Lightning Impulses Time Parameters Estimated According to Standard IEC 60060-1:2010", *IEEE Trans. Inst. Meas.*, vol. 64, n°. 6, pp. 1369–1372, June 2015.
- [10] C. R. H. Barbosa, M. T. Silva, L. C. Azevedo and L. C. Faria, "Validation of a System for Evaluation of High-Voltage Impulses According to IEC 60060-1:2010", *IEEE Trans. Inst. Meas.*, vol. 64, n°. 6, pp. 1378–1382, June 2015.

Anexo 2 – Artigo 8º Congresso Brasileiro de Metrologia (CBM) - XI Congresso Internacional de Metrologia Elétrica (Semetro)



Effect of the overshoot level in an alternative method for processing of tail chopped lightning impulses

Lilian S. Ferreira^{1,2}, Carlos R. Hall Barbosa¹, Márcio T. Silva², Luiz C. Azevedo²

¹ Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Posgraduate Programme in Metrology, Rio de Janeiro, Brazil; ² Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Rio de Janeiro, Brazil

E-mail: lilianf@cepel.br

Abstract: The construction of new Ultra High Voltage laboratories requires more studies about standards for equipment, as well as for testing and measurement techniques. Currently, the analysis of tail chopped lightning impulse waveforms is possible only by prior application of a full reference lightning impulse, creating difficulties for testing and processing of waveforms. A new method for evaluating the relevant parameters of tail chopped waveforms has been previously developed and this paper studies the effect of the overshoot in this alternative method.

Keywords: UHV, testing, calibration, tail chopped lightning impulse.

1. INTRODUCTION

The energy transmission perspectives in Ultra High Voltage (UHV), with 1200 kV AC and ± 1000 kV DC, requires a new laboratory infrastructure for testing equipment used in UHV. The current facilities at high voltage equipment suppliers and at research labs, for the most part, are limited to 765 kV AC and ± 600 kV DC. The construction of new laboratories to cater to UHV systems requires more studies about standards for equipment, as well as for testing and measurement techniques. Consequently, with the increase in the voltage levels for AC and DC transmission systems, some adaptations and changes to existing standards might become necessary.

The current version of the standard IEC 60060-1: "High-voltage test techniques, Part 1: General

definitions and test requirements" [1] issued in 2010 by the International Electrotechnical Commission (IEC) has as the main requirement, with regard to lightning impulse tests, the test voltage function, established based on experimental results of a European project. The test voltage function is frequency dependent and is the response of the equipment insulation to impulses with overshoot, being given by

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2.2f^2}, \quad (1)$$

f being the frequency in MHz.

The revision of IEC 60060-1 also includes a description of the assessment process to the test voltage, as currently all recording instruments are based on digital recorders.

In practice, the use of the test voltage function involves digitally filtering the original waveform and calculating the amplitude and time parameters from this filtered waveform. This processing, described in the standards for impulses, should be applied also to tail chopped lightning impulse waveforms.

The processing is briefly described with the help of figure 1, starting with the original data record $U_0(t)$, from which the base curve $U_m(t)$ is obtained by adjusting a double exponential. The difference between the base curve $U_m(t)$ and original curve $U_0(t)$ gives the superimposed oscillation $R(t)$ (basically the overshoot information), which is filtered by the test voltage function $k(f)$ according to equation 1. By summing the filtered oscillation to the base curve $U_m(t)$, one obtains the test voltage curve $U_t(t)$, from which the test voltage value U_t and the time parameters are determined. [2]

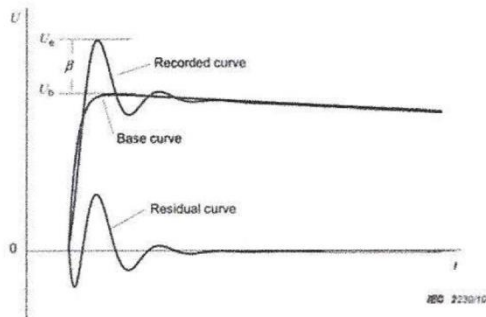


Figure 1. Recorded and base curve showing overshoot and residual curve.

Practically all tests involving high voltage equipment with large dimensions have the presence of overshoot, which is caused mainly by the inductance of the high voltage conductor, the capacitance of the object under test, as well as the intrinsic parasitic capacitances of the test arrangement. This LC circuit induces overshoot in the crest of the impulse waveform, being difficult to compensate it.

In the present paper, a study is performed on the effect of overshoot in tail chopped lightning

impulses, based on experimental results with various waveforms, calculating the relevant parameters (value of test voltage U_t , front time T_1 and time to chopping T_c). These results are compared with the results of an alternative method which excludes the need for a full lightning impulse as a reference waveform.

2. TAIL CHOPPED LIGHTNING IMPULSES

Tail chopped lightning impulses (LIC) are based on a standard full lightning impulse, which rises to its peak value in around 2 μ s a 5 μ s and slowly falls to zero. After the application of the full lightning impulse, using the same impulse generator settings, it is then inserted a chopping gap to cause disruption of the waveform.

Referring to figure 2, the parameters that need to be calculated to evaluate the tail chopped lightning impulse waveform, according to the IEC 60060-1 standard, are the time parameters T_1 (front time) and T_c (time to chopping), which is the time interval between the virtual origin O_1 and the instant of chopping t_c (extrapolation of the line between the 70% and 10% points on the voltage collapse) and the amplitude parameter U_t (value of the test voltage), which is essentially the extreme value of the waveform. O_1 is the intersection with the time axis of the line through points A (30% of peak) and B (90% of peak).

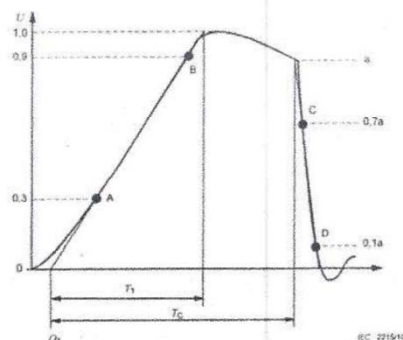


Figure 2. Typical normalized tail chopped lightning impulse showing the relevant time parameters T_1 and T_c .

A lab bench recurrent surge generator RSG 482 from Haefely has been used to generate full reference lightning impulses and corresponding tail chopped lightning impulses. Tail chopped waveforms with front time $T_1 = 1.280 \mu\text{s}$, time to chopping $T_c = 6 \mu\text{s}$ and test voltage $U_t = 49 \text{ V}$ have been generated, with 3 levels of overshoot (0%, 4% and 20%). The data has been acquired by the system IMPREAL 2.0 (acronym for Impulse Response Analysis), developed in LabVIEW 2011, which acquires, analyses and calculates the relevant time parameters for the six types of high-voltage impulse waveforms [2].

3. STANDARD PROCESSING ACCORDING TO IEC 60060-1

This processing is used for the test voltage curve, from which the impulse parameters are calculated. This processing is dealt with more details in [3] with good results.

Table 1 presents the time parameters described in the previous section defined in the standard IEC 61083-2:2010, for the tail chopped lightning impulse using the standard processing with the aid of system IMPREAL 2.0 with 3 levels of overshoot (0%, 4% and 20%) and figure 3 shows a zoom on the tail chopped lightning impulse with 20% overshoot, together with the relevant points identified by the software.

Table 1. Results of the standard processing of the LIC impulse with 3 levels of overshoot.

Overshoot	Parameter	Value
0%	Front time T_1 (μs)	1.280
	Time chopping T_c (μs)	6.144
	Test voltage U_t (V)	48.56
4%	Front time T_1 (μs)	1.280
	Time chopping T_c (μs)	5.967
	Test voltage U_t (V)	49.74
20%	Front time T_1 (μs)	1.293
	Time chopping T_c (μs)	5.727
	Test voltage U_t (V)	60.76

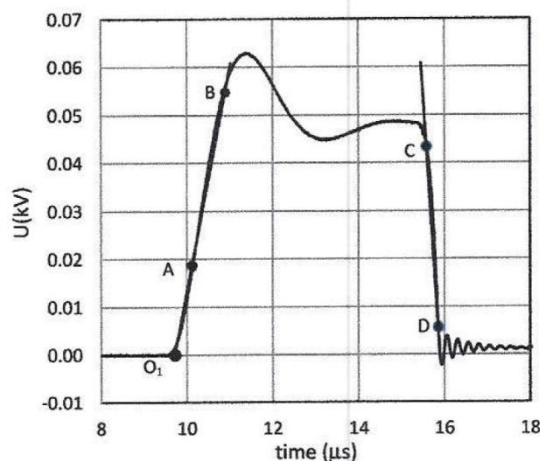


Figure 3. Results of the standard processing of the LIC with 20% overshoot. O1 is the virtual origin, A is the 30% point, B is the 90% point, C is the 70% point and D is the 10% point.

4. ALTERNATIVE PROCESSING

According with IEC standard, the need for a full reference lightning impulse is due to the fact that a tail chopped waveform does not follow the smooth double exponential shape, and this would preclude a proper fitting.

However, as the test voltage curve $U_t(t)$ needs to be calculated only up to the instant of chopping t_c , the fitting of the double exponential also needs to be done only for this period.

Thus, if the recorded curve $U_o(t)$ is truncated at t_c , it should be possible to fit a double exponential and proceed with the overshoot processing without the need of the full lightning impulse [4].

This alternative processing has been tested in this paper for the three different levels of overshoot shown in section 3 and the results are shown in table 2, together with a comparison with the standard method, by calculating the percent difference between the estimated parameters.

Figure 4 presents the result of the double exponential fitting described in [4], which yields an acceptable residual, with an RMSE of 1.66%.

Table 2. Results of the alternative processing of LIC impulse with 3 levels of overshoot.

Overshoot	Parameter	Value	Difference
0%	front time T_1 (μ s)	1.293	1.02%
	time to chopping T_c (μ s)	6.166	0.36%
	test voltage U_t (kV)	48.60	0.08%
4%	front time T_1 (μ s)	1.280	0.0%
	time to chopping T_c (μ s)	6.005	0.64%
	test voltage U_t (kV)	49.86	0.24%
20%	front time T_1 (μ s)	1.253	-3.09%
	time to chopping T_c (μ s)	5.879	2.65%
	test voltage U_t (kV)	61.18	0.69%

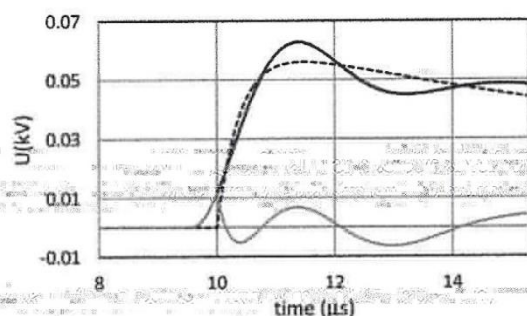


Figure 4. Fitting of a double exponential to the waveform shown in figure 4 truncated at the instant of voltage collapse. The solid line is the tail chopped waveform, the dashed line is the fitted double exponential, and the gray line is the residual.

5. CONCLUSIONS

This paper presented the effect of the overshoot level in an alternative method for processing of LIC impulses that has the potential to simplify the procedures for this type of high voltage testing. The method was tested with 3 levels of overshoot and compared with the standard method with good results.

For the largest overshoot there is a larger difference between the methods, especially regarding the front time T_1 , and the alternative method is presently being refined in order to

reduce this discrepancy. As expected, the difference in the time to chopping T_1 increases as the overshoot level increases.

Another aspect that needs to be further studied is the effect of the chopping time on the accuracy of the alternative method.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank CEPEL and the Brazilian funding agencies CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) and CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) for their financial support.

REFERENCES

- [1] IEC 60060-1:2010 "High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements".
- [2] C. R. H. Barbosa, M. T. Silva, L. C. Azevedo and L. C. Faria, "Validation of a System for Evaluation of High-Voltage Impulses According to IEC 60060-1:2010", *IEEE Trans. Inst. Meas.*, vol. 64, n°. 6, pp. 1378–1382, June 2015.
- [3] C. R. H. Barbosa, J. Hällström, M. T. Silva, L. C. Azevedo and L. C. Faria, "Tail-Chopped Lightning Impulses Time Parameters Estimated According to Standard IEC 60060-1:2010", *IEEE Trans. Inst. Meas.*, vol. 64, n°. 6, pp. 1369–1372, June 2015.
- [4] C. R. H. Barbosa, J. Hällström, M. T. Silva, L. C. Azevedo and L. S. Ferreira, "Alternative Method for Processing Tail-Chopped Lightning Impulses Waveforms", *IMEKO 2015 Proceedings, Prague, Czech Republic*, September 2015.