

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SOFTWARE E HARDWARE PARA ANÁLISE DE
ENSAIOS DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS
EM EQUIPAMENTOS PARA MÉDIA TENSÃO**

Marcel Antonionni de Andrade Romano

Itajubá, Maio de 2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Marcel Antonionni de Andrade Romano

**SOFTWARE E HARDWARE PARA ANÁLISE
DE ENSAIOS DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS
EM EQUIPAMENTOS PARA MÉDIA TENSÃO**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Ciências em
Engenharia Elétrica**

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez

Maio de 2014

Itajubá - MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Marcel Antonionni de Andrade Romano

**SOFTWARE E HARDWARE PARA ANÁLISE DE
ENSAIOS DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS
EM EQUIPAMENTOS PARA MÉDIA TENSÃO**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 22 de maio de 2014, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Feliciano Adami

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto

Prof. Dr. Credson de Salles

Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez

Itajubá, 2014

A minha família.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez pela oportunidade e confiança no meu trabalho, apoio e orientação.

Aos amigos Jorge Luiz de Franco e Ângelo Rocha de Oliveira pelo incentivo e contribuições ao presente trabalho.

Ao amigo Sanderson Rocha de Abreu pelo suporte, incentivo e confiança depositada.

Aos amigos do LEAT-ENERGISA, pelo apoio nos ensaios, e paciência.

Aos amigos do LAT-EFEI, pelo apoio e companhia ao longo desse valioso período na minha formação.

À Universidade Federal de Itajubá e ao LAT-EFEI por me acolher como aluno e disponibilizar a sua infraestrutura.

À minha esposa, Maria Lita e minha filha Ana Luíza pelo amor, carinho e dedicação incondicionais.

A toda a minha família, por acreditar e me incentivar em cada etapa da minha jornada.

Ao Grupo Energisa pela oportunidade e suporte financeiro.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

E, finalmente, a todos que deram alguma contribuição e que não estão incluídos de forma individual nesse pequeno espaço. A contribuição de todas essas pessoas foi fundamental para a realização desse trabalho e eu serei sempre agradecido a todos vocês.

Resumo

A análise dos resultados do ensaio de impulso atmosférico em transformadores é de característica comparativa e manual, demandando grande experiência do examinador. O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia – hardware e software – que promova um melhor desempenho na obtenção e análise das formas impulsivas, por meio de técnicas digitais que promovam objetividade ao processo de avaliação das unidades. São abordados diversos aspectos do processo, como a escolha adequada dos divisores de tensão e medidores de corrente, o uso e escolha de atenuadores, a identificação de falhas nos componentes do gerador de impulso, assim como as características e seleção de um dispositivo digitalizador. Foram desenvolvidas rotinas de captura de dados, armazenamento eficiente das formas obtidas, diversas técnicas de filtragem digital, determinação dos parâmetros característicos como tempos de subida e descida, amplitude e análise comparativa das formas de onda, conforme a norma brasileira ABNT NBR 5356-4. Uma interface gráfica foi desenvolvida, consolidando as diversas técnicas desenvolvidas para o ensaio em transformadores. Algumas partes da metodologia foram utilizadas com sucesso em ensaios de isoladores e demais equipamentos de alta-tensão.

Palavras-chave: ensaio de impulso; divisor de tensão; bobina de rogowski; filtros; wavelet; tempo de subida; tempo de descida; NBR 5356-4.

Abstract

The analysis of transformer impulse test is manual and comparative by nature, demanding a great expertise in people involved. This discussion has the purpose to develop a methodology – hardware and software – to promote a better performance in obtaining and analyzing the impulsive waveforms, by means of digital techniques that provide more efficiency to the process. Many aspects of the process are discussed, as appropriate choice of the voltage dividers and current transducers, the use and selection of attenuators, identification of faulty impulse generator components as well as the characteristics and selection of digitizing device. Routines to capture data, efficient storage of waveforms by compression, several digital filtering techniques, determination of the characteristic parameters such as front and tail times and amplitude, as well as comparative analysis of waveforms have been developed under Brazilian Standard ABNT NBR 5356-4. A graphical user interface was developed by consolidating the various developed techniques for evaluating transformers under impulse test. Some parts of the methodology have been used successfully in insulators tests and other activities at High Voltage Lab.

Keywords: impulse test; voltage divider; Rogowski coil; filters; wavelet; front time; fall time.

Sumário

Resumo	3
Abstract.....	4
Sumário.....	5
Lista de Figuras	6
1 Introdução	11
1.1 Generalidades	11
1.2 Objetivos.....	15
2 O ensaio de impulso atmosférico em transformadores	16
2.1 Histórico e objetivo	16
2.2 Procedimento de ensaio.....	18
2.3 Análise e interpretação dos resultados	21
2.4 O ensaio de impulso atmosférico escalonado.....	25
2.5 Geração de tensões impulsivas.....	27
3 Detalhes do equipamento de ensaio	32
3.1 Comunicação com o osciloscópio	50
4 Resultados e detalhes da implementação do programa de análise	54
4.1 Pré-processamento das informações dos impulsos	55
4.1.1 Filtragem e decimação.....	55
4.1.2 Determinação da amplitude, tempo de frente e cauda do impulso.....	57
4.2 Ajuste das formas de tensão e corrente.....	61
4.3 Detecção de pequenas não conformidades nas formas de tensão e/ou corrente	64
5 Considerações finais.....	69
6 Perspectivas futuras.....	72
Bibliografia.....	73
ANEXO A – Detalhes do software desenvolvido	77

Lista de Figuras

Figura 1 - Forma de onda característica do impulso atmosférico pleno e as definições para os tempos de frente e cauda.....	19
Figura 2 - Forma utilizada para ensaios de impulso atmosférico com forma cortada.	20
Figura 3 - Resultado do ensaio de impulso escalonado para um transformador de distribuição sem indicativo de falhas.....	26
Figura 4 - Comportamento da tensão de uma amostra defeituosa.	27
Figura 5 - Circuitos para a obtenção das formas impulsivas requeridas para os ensaios.....	28
Figura 6 - Gerador de impulsos de seis estágios (Adaptado de [13]).	29
Figura 7 - Ensaio de resposta em frequência em um divisor de tensão resistivo de 100 kV/10 M Ω	33
Figura 8 – Circuito equivalente simplificado de um divisor capacitivo amortecido.	33
Figura 9 - Atenuadores Pi/T.	37
Figura 10 - Ensaio de impulso atmosférico escalonado para um transformador de distribuição defeituoso.	42
Figura 11 - Resultado falho de um EIAE, em virtude de oxidação nos contatos do shunt.	43
Figura 12 - Ensaio no equipamento após a remoção da oxidação nos contatos do shunt.	44
Figura 13 - Possíveis descargas parciais evidenciadas por meio da escolha inadequada de valor de shunt e escala de corrente.	45
Figura 14 - Ajuste de escala para saturar o canal durante a componente capacitiva.	46
Figura 15 - Comportamento de recuperação devido à saturação excessiva do canal de um osciloscópio Tektronix DPO4034.	47
Figura 16 - Fluxograma geral do sistema desenvolvido.	54
Figura 17 - Resposta em frequência do filtro de média para diferentes tamanhos de janela, adaptado de [40]. ...	56
Figura 18 - Diversos tipos de filtros e seus efeitos em uma forma de corrente.	57
Figura 19 - Utilização de suavização polinomial para a determinação da amplitude, tempo de frente e tempo de cauda,.....	59
Figura 20 - Resultado de um EIAE, evidenciando diferentes referências de tempo durante o ensaio.....	61
Figura 21 - Aplicação do método dos mínimos quadrados para o ajuste das formas de tensão.	63
Figura 22 - Superposição das ondas de tensão e corrente e suas funções de diferença.	65
Figura 23 - Sumário para a curva de diferenças de tensão mostrada anteriormente.	66
Figura 24 - Decomposição do sinal de diferenças por Wavelet, evidenciando o comportamento da oscilação. ...	67
Figura 25 - Histograma da decomposição Wavelet de um sinal que segue distribuição normal em 5 níveis.	67
Figura 26 - Versão de ensaio do software, com destaque ao algoritmo de detecção de oscilações.	68
Figura 27 - Tela Inicial do Software de Análise de Ensaio de Impulso Atmosférico.....	77
Figura 28 - Função Cadastro	77
Figura 29 - Cadastro de Transformadores	78
Figura 30 - Cadastro de Empresa solicitante do serviço.....	78
Figura 31 - Cadastro de Fabricante de Transformadores.....	79
Figura 32 - Função Cadastro de Osciloscópio	79
Figura 33 - Configurações do Osciloscópio	80
Figura 34 - Menu Arquivo.....	80
Figura 35 - Cadastro de Ensaio	81

Figura 36 - Opção de cadastro de ensaio a partir do osciloscópio.....	81
Figura 37 - Características geradas a partir dos dados do ensaio	82
Figura 38 - Função Zoom.....	83
Figura 39 - Resultado da visualização de uma área específica da característica.	83
Figura 40 - Botão “Analisar” dentro da visualização das características de ensaio.....	84
Figura 41 - Relatório de Análise do ensaio.	85
Figura 42 - Características geradas a partir das curvas de ensaio.....	86
Figura 43 - Versão para impressão do relatório de ensaio.....	86
Figura 44 - Menu “Análise”.	87
Figura 45 - Menu Ajuda.	87
Figura 46 - Botão “Ajuda”.	87

1 Introdução

1.1 Generalidades

As falhas em transformadores de distribuição são responsáveis por parcelas significativas no custo de operação das concessionárias de energia, trazendo impactos negativos como a aquisição de novas unidades para a substituição das danificadas, ou sua reforma, além de piora nos índices de confiabilidade. As falhas normalmente associadas às sobretensões de origem atmosférica compõem uma parte importante das falhas de isolamento e devem ser mitigadas. A adequada coordenação de isolamentos, por meio do dimensionamento dos níveis de suportabilidade dielétrica dos equipamentos da rede e a utilização de dispositivos de proteção de surtos como para-raios, é um mecanismo para minimizar as falhas por descargas atmosféricas, garantindo que a sobretensão máxima a qual o equipamento venha a estar submetido não ultrapasse limites tolerados.

É necessário, portanto, que os transformadores a serem utilizados suportem as solicitações de sobretensão máximas esperadas, como a tensão residual dos para-raios que os protegem, sem que sofram danos de origem dielétrica. O ensaio de impulso atmosférico é normalmente utilizado para essa finalidade e, de forma resumida, consiste da aplicação de solicitações impulsivas de tensão com forma normalizada, e de níveis compatíveis com a tensão suportável de nominal de impulso atmosférico (TSNIA) plenos e cortados e a comparação com as mesmas solicitações em um nível reduzido. Técnicas de alta frequência que envolva o uso de solicitações de baixa amplitude não são suficientes para ensaiar adequadamente o equipamento sob esse aspecto, mas pode identificar problemas grosseiros de montagem, de acordo com [1] e [2]. As técnicas, contudo, possuem conexão com os ensaios de impulso atmosférico, conforme pode ser visto em [3]

A avaliação das formas dos impulsos por meio de comparação gráfica dos oscilogramas de ensaios, método usual de análise, exige experiência do examinador para a discriminação de comportamentos anormais de características inerentes ao circuito de ensaio. Por ser uma avaliação subjetiva, pode ser influenciada por diversos fatores nem sempre necessariamente de ordem técnica e, algumas vezes sendo determinante para decisões de compra que podem envolver grandes valores monetários.

O risco do erro ao se adquirir unidades com baixa suportabilidade dielétrica nem sempre se traduz imediatamente em perdas financeiras para a empresa contratante. Um equipamento nessas condições pode vir a trabalhar normalmente até que seja submetido a uma solicitação que eventualmente o coloque em condição de falha. Eventualmente, essas solicitações podem ocorrer após o tempo de garantia oferecido pelos fabricantes do equipamento.

Isso pode ser justificado com base nas características probabilísticas da ocorrência da solicitação de origem atmosférica. Dessa forma, um equívoco na avaliação de ensaios de impulso atmosférico pode ocasionar a inserção no sistema de lotes de unidades propensas a falhas prematuras, com impactos nos custos de manutenção por diversos anos, enquanto esses equipamentos permanecerem em operação.

A escolha do uso de osciloscópios de 8 bits para a aquisição de sinais dessa natureza, em detrimento a placas dedicadas de aquisição de dados, que na maior parte das vezes podem oferecer maior resolução vertical, é justificável em função dos custos dos equipamentos envolvidos e das características dos circuitos de proteção embutidos e integrados aos osciloscópios.

No caso da placa, os custos envolvidos para a aquisição de um equipamento adequado à análise das formas dos impulsos oriundas dos ensaios podem alcançar facilmente a cifra de várias dezenas de milhares de dólares, inferior ao custo típico de um osciloscópio para essa finalidade que ainda oferece em seus estágios de entrada, de forma integrada, circuitos de proteção que dão maior confiabilidade e segurança ao equipamento para a medição de solicitações de maior amplitude.

A inclusão dos mesmos em digitalizadores de forma externa deve ser cuidadosamente considerada em função da possível alteração das características de resposta do equipamento. Existe também uma forte limitação em termos de valores de pico, principalmente dos impulsos de corrente, o que limita aplicação de boa parte dos digitalizadores, podendo-se ocultar, intencionalmente ou não, defeitos quando da escolha de escalas. Isto compromete fortemente a avaliação do estado das unidades ensaiadas. O sistema a ser proposto faz uso de facilidades existentes nos hardwares dos osciloscópios para contornar este fato, o que possibilita uma análise mais coerente dos resultados.

A desvantagem dessa escolha é que a perda de resolução vertical pode comprometer o discernimento entre oscilações de alta frequência e baixa amplitude e os ruídos inerentes ao processo de amostragem. Tal particularidade do equipamento pode ser utilizada inadvertidamente e, às vezes propositalmente, para desprezar tais oscilações e possibilitar que

amostras com defeitos incipientes possam ser avaliadas como adequadas apenas com o ajuste de alguns parâmetros no equipamento de aquisição, como o uso do modo de “alta resolução” intrínseco ao equipamento.

Nesse modo, o circuito digitalizador trabalha a velocidade máxima e o equipamento internamente efetua uma média móvel das amostras que chegam por meio do conversor analógico digital (AD), para aumentar a resolução vertical da resposta à custa de menor largura de banda. Um equipamento com memória restrita que faça uso dessa técnica, somente armazenará o resultado do processamento, sendo boa parte das informações contidas nas altas frequências perdida ao longo do processo.

Há osciloscópios com uma quantidade maior de memória de armazenamento a preços acessíveis, permitindo simplesmente armazenar os valores brutos que chegam do conversor, possibilitando o controle do ganho de resolução e perda de informação nas altas frequências. Técnicas alternativas de aumento de resolução podem ser utilizadas ou associadas à média móvel centrada e aplicadas após a aquisição, permitindo desenvolver uma infinidade de modelos para auxiliar a escolher melhor os parâmetros de filtragem adequados para extrair o máximo de informação útil em cada aplicação impulsiva.

Torna-se desejável, portanto, que se possa avaliar um ensaio de impulso atmosférico de transformadores de média tensão por meio de técnicas computacionais objetivas e seguindo critérios e ajustes nos equipamentos padronizados, de modo a evitar a parcialidade no resultado final, extraindo e selecionando as informações relevantes de oscilações dos ruídos inerentes à aquisição digital.

Pesquisadores ao redor do mundo propuseram técnicas para a análise digital das formas resultantes de um ensaio de impulso atmosférico onde se pode citar, sem a preocupação de referenciar todas as abordagens, o uso de funções de transferência [4], funções de coerência [5] e transformadas integrais [6] e [7]. Entretanto, a aplicação prática na análise dos resultados de um ensaio real, conforme procedimentos aceitos pela indústria como os descritos na Norma ABNT NBR 6939 [8] são dificultados por uma série de fatores, sendo alguns detalhados ao longo do texto.

Uma característica comum a todos esses trabalhos é a falta de definição de critérios de tomada de decisão que independam da natureza da amostra a ser ensaiada. Diversos aspectos construtivos e de projeto tanto do transformador quanto do circuito de ensaio influenciam na forma e característica dos impulsos de tensão e corrente obtidos, que podem ser facilmente comparados a uma “impressão digital” pela forma singular.

Também se pode destacar a dificuldade de implementação de muitas técnicas em razão da complexidade da formulação, o que inviabilizaria a reprodutibilidade dos critérios de análise em diferentes amostras, lotes ou por laboratórios independentes já que as formulações complexas estão atreladas normalmente a diversos parâmetros de ajustes, cuja escolha pode diferir inclusive em diferentes amostras de um mesmo fabricante e projeto construtivo.

Apesar do presente trabalho não considerar essas solicitações, outra preocupação que pode surgir é a da possibilidade de extensão das técnicas para impulsos cortados, utilizados em vários procedimentos presentes nas normas técnicas utilizadas para a avaliação das amostras. Tais solicitações ocorrem naturalmente nos equipamentos quando protegidos por centelhadores, ou quando há uma disrupção externa de um ponto do isolamento da linha.

A experiência mostra que a aplicação de tensão com essa característica ajuda a evidenciar potenciais falhas incipientes ou levar efetivamente à falha amostras que apresentem problemas facilmente identificados em oscilogramas com forma plena, de modo que a possibilidade de uma metodologia de análise contemplar tais solicitações é extremamente desejável sob a ótica de sua aplicabilidade.

As técnicas até então sugeridas pela literatura para a análise das formas de onda cortada no domínio do tempo têm dificuldade de se adequar aos ensaios de natureza comparativa feitos por laboratórios, em virtude de limitações práticas na obtenção de tempos de corte iguais entre sucessivas aplicações. São utilizados normalmente nesses ensaios dispositivos de corte constituídos por dois eletrodos metálicos com espaçamento em ar entre si e um dispositivo que, controladamente, provoca a disrupção no instante solicitado.

A aleatoriedade do fenômeno de disrupção, associado à falta de exatidão temporal do dispositivo que inicia o processo de ruptura faz com que seja possível controlar o tempo dentro de uma margem não estreita o bastante para que os impulsos de corrente resultantes sejam analisados pelos métodos propostos.

A proposta trabalha com filtros numéricos, algoritmos de decimação e avaliação estatística para supressão de ruídos brancos, buscando discernir somente, ruídos associados às falhas em desenvolvimento. O sistema completo, que integra a metodologia, a aquisição e a posterior análise na forma de indicadores visuais, para subsidiar a decisão humana, não foi contemplado em nenhum dos trabalhos referenciados.

1.2 Objetivos

O objetivo principal da dissertação é fornecer subsídios para auxiliar a decisão sobre a suportabilidade dielétrica de amostras de transformadores de média tensão submetidas a ensaios de impulso atmosférico através do desenvolvimento de uma metodologia – hardware e software – que trabalhe com a aquisição e análise das formas de tensão e corrente para ressaltar possíveis não conformidades.

Tem-se por objetivo também a adequação de técnicas de filtragem do sinal que possibilitem o aumento da resolução vertical do equipamento, diminuindo o ruído de quantização sem, entretanto afetar a discriminação de pequenas oscilações de alta frequência associada a falhas. Para tanto, faz-se uso de filtros digitais cujas características aproximem a resposta obtida da correta.

Por ser baseada na utilização de osciloscópio para a aquisição dos dados, e não em digitalizadores de maior resolução e custo, a técnica é acessível e incorpora a tecnologia e experiência dos fabricantes de osciloscópios na proteção dos seus equipamentos. O uso de regras e processos matemáticos permite aumentar o desempenho do osciloscópio, comparando-o em resolução vertical, a um digitalizador especializado para essa aplicação.

Além do custo elevado, a inclusão de equipamentos de proteção em digitalizadores deve ser cuidadosamente avaliada, como possível causa de surgimento de características indesejadas na resposta do instrumento a uma solicitação.

Em resumo, objetiva-se uma metodologia que seja capaz de auxiliar a análise das formas de impulso, e que seja ao mesmo tempo simples, de fácil implementação, tenha pouca sensibilidade a ruídos intrínsecos e comportamentos característicos do circuito de medição, que utilize primordialmente um osciloscópio como instrumento de aquisição de dados e que possivelmente seja extensível a análise de impulsos de forma cortada.

2 O ensaio de impulso atmosférico em transformadores

2.1 Histórico e objetivo

No passado, quando um transformador sofria uma falha por uma causa que não fosse imediatamente óbvia, era prática atribuí-la a algum “surto elétrico”, um fenômeno então considerado próximo a uma calamidade de “origem divina”.

Os projetos executados para suportarem tais fenômenos imprevisíveis eram relativamente raros e se baseavam em pouca experiência prática. Como consequência, os transformadores assim projetados e fabricados eram desnecessariamente volumosos e desproporcionais, mas funcionavam adequadamente durante a sua vida útil pelo fato de não encontrarem uma combinação de condições realmente severas.

A sistematização do ensaio de impulso em transformadores de média tensão iniciou-se em 1930, com a compreensão de que os ensaios em baixa frequência até então realizados não representavam um indicador confiável dos reais esforços dielétricos que poderiam ocorrer durante a operação de um transformador. Foi percebido que muitos dos defeitos ocorridos entre espiras e entre camadas dos enrolamentos em suas zonas terminais apareciam durante a ocorrência de fenômenos transitórios.

O ensaio de impulso em transformadores foi idealizado para aplicar esforços ao dielétrico que correspondessem aproximadamente aos esforços experimentados quando da ação de transitórios de tensão, devidos às descargas atmosféricas ou a manobras nos sistemas elétricos. Os esforços provenientes de fenômenos associados às descargas atmosféricas têm sido considerados, na maioria das aplicações, como de maior relevância pelo fato de serem mais destrutivos (especialmente em sistemas classe de tensão até 242 kV) e serem facilmente reproduzidos nos laboratórios de alta tensão.

Desde então, muito se aprendeu ao submeter os transformadores a este ensaio. Neste contexto, é possível afirmar que os projetos de transformadores foram aperfeiçoados juntamente com a técnica do ensaio de impulso.

Desenvolvimentos teóricos e práticos no estudo de fenômenos transitórios, bem como a evolução dos equipamentos e sistemas de medição necessários para a realização do ensaio de impulso permitiram um melhor entendimento dos fenômenos transitórios que ocorriam em

operação, sua constatação em laboratório e aplicação no projeto de transformadores, objetivando a sua otimização.

Com a rápida evolução destas técnicas, independentemente desenvolvidas em diferentes regiões geográficas, era natural um diferente número de interpretações quanto à filosofia e finalidade do ensaio de impulso em transformadores. Durante anos existiram três correntes que dividiam a opinião dos fabricantes e usuários quanto à filosofia, utilidade e finalidade do ensaio de impulso em transformadores.

Na primeira, àqueles que consideravam o ensaio de impulso como meramente destinado à verificação dielétrica do projeto e da graduação dos níveis de isolamento no transformador. Neste caso, o objetivo principal era o equacionamento destes fatores com habilidade das unidades produzidas em suportar aos esforços elétricos padronizados dentro de limites econômicos.

Já na segunda, buscava-se a padronização o ensaio de impulso principalmente como uma verificação contra erros grosseiros de fabricação defendendo, desta forma, a necessidade de se realizar o ensaio de impulso em cada unidade produzida.

A terceira definia ser praticamente impossível submeter uma unidade de transformador ao ensaio de impulso sem algum enfraquecimento do seu dielétrico e optou por sua eliminação como ensaio de recebimento, deixando a sua utilização aos engenheiros e projetistas, como ferramenta de laboratório para o desenvolvimento de protótipos de bobinas e enrolamentos. Esta opção se baseava na dificuldade de uma medição meticulosa do impulso aplicado bem como a complexidade na detecção precisa dos defeitos “invisíveis” ocasionados durante o ensaio de impulso.

Tanto a primeira quanto a terceira escolas defendiam que a utilização de dispositivos de proteção contra sobretensões, nos transformadores instalados em campo, limitavam a magnitude dos esforços elétricos possíveis a um valor não superior a 80% do nível de isolamento do transformador. Dessa forma, supõe-se fornecer suficiente garantia de operação em nível econômico sem requerer a sistematização do ensaio de impulso como ensaio de recebimento para fins de aceitação comercial. Cabe aqui ressaltar que essas três filosofias são ainda hoje discutidas por alguns especialistas.

2.2 Procedimento de ensaio

Durante a realização do ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico o transformador sob ensaio deverá ser submetido a uma série de aplicações de impulsos, conforme sequência descrita a seguir:

- Aplicação de um impulso com forma plena reduzida, com valor de crista entre 50% e 75% do valor da forma plena normalizada;
- Aplicação de três impulsos com forma plena normalizada, com valor de crista a igual ao da tensão suportável nominal, definida em função da classe de tensão do transformador sob ensaio [9].

Ao se ensaiar um transformador é possível prever a existência de defeitos em maior ou em menor escala no isolamento. Uma forma plena, com um valor de crista entre 50% a 75% do valor estabelecido para a classe de tensão a ser ensaiada, é inicialmente aplicada ao transformador sob ensaio, com o propósito de não danificar totalmente o transformador em caso da existência de defeitos bastante grosseiros. Esta aplicação não solicita tanto o transformador sob ensaio, no entanto, defeitos acentuados no isolamento podem ser evidenciados.

Os valores de crista de tensão a serem aplicados nos ensaios são definidos na ABNT NBR 6939 [8], e têm por base a classe de tensão do equipamento sob análise. As formas típicas, bem como o modo de se estimar os tempos característicos e as tolerâncias admissíveis estão presentes na ABNT NBR 6936 [10] e podem ser vistas na Figura 1. De acordo com a ABNT NBR 5356-3 [11], para transformadores imersos em óleo isolante a tensão de ensaio tem normalmente polaridade negativa, de modo a reduzir o risco de descargas externas no circuito de ensaio.

Esses valores geralmente estão na faixa de 20% a 40% acima das tensões transitórias que podem realmente atingir os transformadores, considerando a existência de dispositivos de proteção contra sobretensões. Desta forma, o ensaio de impulso considera uma margem de segurança acima dos esforços que se espera que um transformador possa ser realmente solicitado em serviço.

As tolerâncias para os tempos até a crista e de meia amplitude são definidos na Norma ABNT NBR 6936 [10]. De acordo com a ABNT NBR 5356-4 [9], a fim de se obter o tempo virtual de frente normalizado dentro das tolerâncias estabelecidas, pode ser necessário admitir oscilações ou sobrelevações fora da tolerância de $\pm 5\%$ fixada pela ABNT NBR 6936 [10],

até um limite de $\pm 10\%$. Para que este limite não seja ultrapassado, pode ser necessário admitir-se um tempo virtual de frente que exceda as tolerâncias estabelecidas pela Norma ABNT NBR 6936 [10].

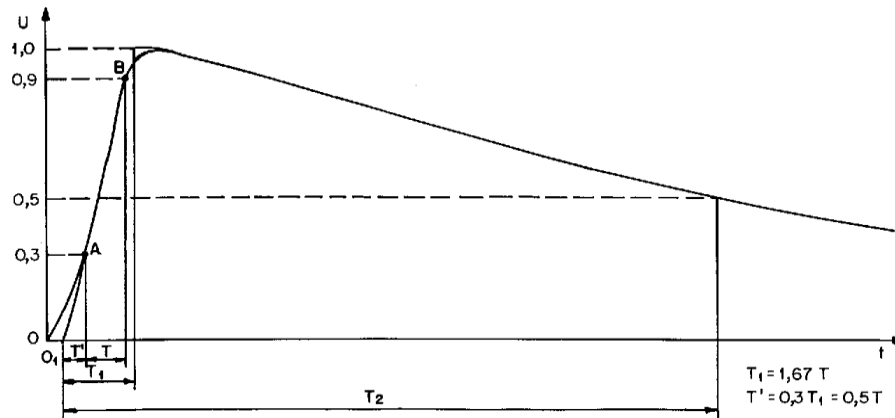


Figura 1 - Forma de onda característica do impulso atmosférico pleno e as definições para os tempos de frente e cauda.

Em caso da realização do ensaio de tensão suportável sob impulso atmosférico com forma cortada, este pode ser combinado com o ensaio de impulso de tensão suportável de impulso pleno, conforme sequência abaixo:

- Aplicação de um impulso com forma plena reduzida, com valor de crista entre 50% e 75% da forma plena especificada;
- Aplicação de um impulso com forma plena normalizada, com valor de crista definido em função da classe de tensão do transformador sob ensaio [8];
- Aplicação de um ou mais impulsos com forma cortada com valor de crista reduzido;
- Aplicação de dois impulsos com forma cortada com valor de crista pleno;
- Aplicação de dois impulsos com forma plena normalizada, com valor de crista definido em função da classe de tensão do transformador sob ensaio [8].

A aplicação de impulsos com forma cortada tem por objetivo avaliar o comportamento da isolamento do transformador quando submetido a variações bruscas na tensão, como por exemplo, quando da ocorrência de uma descarga atmosférica próxima ao transformador de distribuição, da atuação de centelhadores isolados a ar, atuação de para-raios com centelhadores, ou mesmo descarga nos isoladores ou em buchas do transformador. A forma resultante, cujo aspecto é indicado na Figura 2, em muito solicita a isolamento do transformador e apresenta duas características importantes:

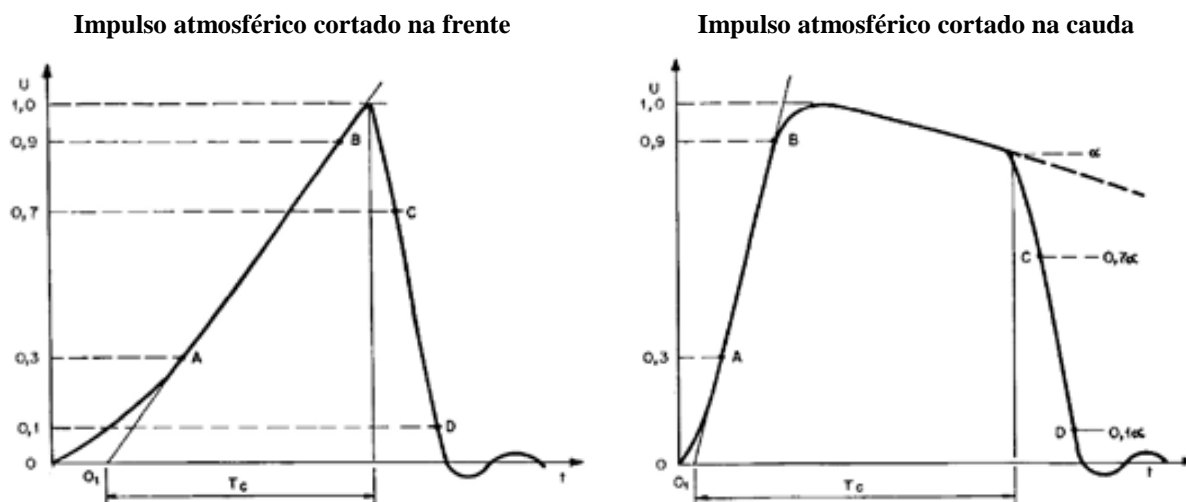


Figura 2 - Forma utilizada para ensaios de impulso atmosférico com forma cortada.

A forma cortada é proveniente de um impulso típico normal que apresenta um valor de crista de 110% (Normas ABNT NBR e IEC) ou de 115% (Normas ANSI) do valor estabelecido para o impulso pleno normalizado.

De acordo com a ABNT NBR 5356-4 [9], o circuito de corte consiste em um centelhador apropriado que é conectado entre o terminal do transformador a ser ensaiado e o terra. Somente a utilização do centelhador com disparo controlado permite um ajuste de tempo de corte com precisão suficiente para obtenção de tempos até o corte razoavelmente idênticos, que possibilitem a constatação de falhas por comparação de oscilogramas [9].

É recomendável, para este ensaio, a utilização de um sistema capaz de permitir a realização do corte em um tempo qualquer desejado. De acordo com a NBR 5356-3 [11] o tempo de corte deve ficar dentro dos limites de 2 a 6 μ s.

De modo geral, o ensaio de impulso atmosférico deve ser realizado em todos os enrolamentos de um transformador, sendo que ao se aplicar um impulso a um dos terminais recomenda-se que os demais sejam aterrados diretamente ou através de uma resistência para protegê-los contra sobretensões que podem ser induzidas nesses enrolamentos durante o ensaio de impulso. O enrolamento sob ensaio também deverá ter um dos seus terminais aterrado, estando o outro conectado ao circuito de geração do impulso.

A sequência de impulsos deve ser aplicada sucessivamente a cada um dos terminais de linha do enrolamento sob ensaio. No caso de transformadores trifásicos, os outros terminais de linha do enrolamento devem ser aterrados diretamente ou através de impedância de baixo valor, inferior ao valor da impedância da linha. Se o enrolamento tiver um terminal de neutro, este terminal deve ser aterrado diretamente ou através de impedância de baixo valor, como um

derivador (shunt) para medição da corrente. O tanque do transformador sob ensaio também deve ser aterrado.

Detalhes das ligações dos terminais do objeto sob ensaio e da montagem do circuito e são apresentados na ABNT NBR 5356-4 [9], e no Anexo E da ABNT NBR 5356-1 [12], assim como na literatura técnica [13].

Alguns laboratórios realizam, ao final da sequência de aplicações de impulso, a aplicação adicional de um impulso pleno reduzido com valor de crista entre 50% e 75% do impulso pleno normalizado, com objetivo de comparar as formas de tensão e de corrente obtidas nesta última aplicação com as formas de tensão e de corrente obtidas durante a primeira aplicação de impulso com forma plena reduzida. Isso é particularmente importante para o caso de transformadores a seco, bem como equipamentos que fazem uso de dispositivos internos de proteção contra surto não lineares.

Os requisitos desse ensaio são satisfeitos se não for obtida durante a aplicação dos impulsos plenos nenhuma indicação de falha.

2.3 Análise e interpretação dos resultados

Estando os enrolamentos de um transformador submetidos à solicitação de impulso de tensão, é possível, em caso de problemas de projeto, de fabricação ou de outras origens, a ocorrência do rompimento da isolação entre espiras de uma bobina ou entre espiras do enrolamento de alta tensão e da baixa tensão, que, em geral se encontram enrolados superpostos um ao outro na mesma “perna” do núcleo dos transformadores.

O principal objetivo do ensaio de impulso em transformadores é a detecção de possíveis falhas na isolação. Diversas técnicas de detecção de falhas foram desenvolvidas e avaliadas ao longo dos anos, sendo atualmente utilizadas de forma exaustiva nos laboratórios de alta tensão. Essas técnicas permitem detectar com precisão defeitos como: curtos-circuitos entre espiras; curtos-circuitos entre bobinas; curtos-circuitos entre camadas de enrolamentos; defeitos na blindagem; descargas para a terra; etc.

Para a análise e interpretação dos resultados de um ensaio de impulso em transformadores, a ABNT NBR 5356-1 [12] estabelece a necessidade de medição e registro da tensão de ensaio aplicada e de pelo menos outro transitório característico. Isto significa que são necessários pelo menos dois canais de registros independentes.

Enquanto que o registro da tensão aplicada é definido de forma mandatória, a definição do outro transitório característico a ser registrado depende da escolha do método de detecção de falha. De acordo com a NBR 5356-4 [9], podem ser obtidos os seguintes registros:

- Corrente de neutro, em caso de transformadores com neutros que possam ser aterrados durante o ensaio;
- Corrente do enrolamento sob ensaio, em caso de transformadores trifásicos com enrolamentos ligados em triângulo e para transformadores com enrolamentos ligados em estrela ou zigue-zague, cujo neutro não possa ser aterrado durante o ensaio;
- Corrente transferida a um enrolamento adjacente;
- Corrente no tanque;
- Tensão transferida a um enrolamento não ensaiado;
- Corrente de linha. Neste caso, todos os terminais que normalmente devem ser aterrados são conectados ao tanque, medindo-se a corrente do tanque para o terra.

A corrente de impulso normalmente é o transitório mais sensível para a detecção de falhas em um transformador durante o ensaio de impulso. Por esta razão, a análise das correntes transitórias consiste na principal forma de avaliação dos resultados de um ensaio e, deste modo, é o admitido como o método de utilizado ao longo do trabalho.

Normalmente faz-se a medição e o registro da corrente de neutro, que é aplicável a transformadores com neutro acessível, e consiste em conectar uma resistência shunt de medição de corrente entre o terminal aterrado do enrolamento sob ensaio e o terra, como o mostrado em [14], e registrar a forma de corrente resultante durante a aplicação da primeira forma plena reduzida e das formas plenas normalizadas. No entanto, se esta corrente não puder ser medida, a corrente nos enrolamentos ou de linha pode ser considerada.

A interpretação dos oscilogramas se baseia na comparação dos registros das formas de impulsos de tensão e de corrente, considerando: a comparação entre registros de valor reduzido com o valor suportável nominal (pleno); e entre registros sucessivos de valor suportável nominal.

A ausência de diferenças significativas entre os transitórios de corrente e de tensão registrados com o impulso de valor reduzido e aqueles registrados com impulsos plenos constitui uma evidência de que o isolamento suportou o ensaio. Neste caso, os oscilogramas devem ser idênticos, exceto pelas variações nas amplitudes entre o impulso com tensão reduzida e o impulso com valor suportável nominal.

Por outro lado, qualquer evidência de diferença entre as formas dos impulsos reduzidos e plenos detectada por comparação de dois oscilogramas pode ser um indicativo de defeito. No entanto, neste caso, deve-se examinar também com muito cuidado o circuito de impulso, pois em muitos dos casos o “defeito” pode se localizar no circuito de ensaios e não no transformador sob ensaio. De modo geral, todos os possíveis desvios entre as formas plena reduzida e a plena normalizada devem ser investigado.

A análise de defeitos mais grosseiros ou de falhas de maior porte na isolação, como por exemplo, uma descarga no enrolamento ou curto-circuito entre camadas, pode ser verificada a partir das discrepâncias observadas nas ondas de tensão ao passo que uma análise mais científica e refinada pode ser realizada mediante comparação dos sinais das formas de corrente.

Menores diferenças entre os oscilogramas de corrente indicam, em geral, defeitos nos enrolamentos do transformador. Se a divergência nos oscilogramas de corrente coincide com uma queda de tensão nos oscilogramas de tensão plena normalizada, o defeito é evidente e indica, em geral, curto-circuito entre enrolamentos. A referência [15] tenta justificar algumas dessas afirmações.

No entanto, é frequente aparecerem nos oscilogramas de corrente perturbações de alta frequência, conhecidas como “hash” e que são de difícil análise. Dentre as condições possíveis, pode-se listar, de forma resumida:

- Mau aterramento do núcleo do transformador;
- Mau contato no terminal da bucha do transformador;
- Corona na bucha do transformador;
- Defeitos no circuito de impulso;
- Nível de óleo baixo do transformador;
- Falha no transformador;
- Bolhas de ar.

A investigação mais detalhada destas condições exige cautela, porém, antes de se tomar qualquer decisão em relação a possíveis reparos no circuito de ensaios ou no transformador, devem-se aplicar no máximo três impulsos plenos normalizados de modo a verificar uma possível degeneração progressiva. Não havendo esta degeneração, o melhor oscilograma pode vir a ser aceito como representativo.

Para impulsos cortados, as falhas observadas durante o ensaio são detectáveis, por meio das diferenças nas oscilações, tanto no oscilograma de tensão quanto no de corrente, desde que o tempo até o corte seja razoavelmente idêntico entre as aplicações de tensão.

Uma interpretação detalhada dos registros oscilográficos, bem como a distinção entre perturbações não significativas e registros de falhas, requer experiência e perícia por parte de quem está realizando a avaliação dos resultados. O Anexo B da NBR 5356-4 [9] ilustra algumas condições de falha e de inexistência de falha a partir da análise dos oscilogramas.

O uso de equipamentos digitais associados à oferta de maior capacidade de memória e processamento dos computadores digitais tem permitido aplicação de técnicas digitais para a análise dos registros oscilográficos. As técnicas digitais também podem trazer limitações em virtude do processo de discretização, necessitando o equipamento ser corretamente especificado [16] e suas limitações entendidas [17]. Diversas alternativas de técnicas para a avaliação foram propostas nos últimos anos e algumas já fazem parte dos softwares que acompanham os equipamentos digitalizadores do estado de arte.

O uso da Transformada Discreta de Fourier é comum em processamento de sinais, e propostas de uso de suas variações na análise de formas impulsivas podem ser encontradas. A análise por meio de Transformada em Tempo Curto de Fourier (STFT), que pode ser vista em [6] e [18], trata da aplicação sucessiva da Transformada Discreta de Fourier na forma de janelas justapostas percorrendo todo o sinal de tensão e/ou corrente. Os dados são apresentados de forma gráfica e há a tentativa de se estabelecer inter-relações entre o comportamento de algumas regiões apresentadas nos gráficos e os defeitos típicos.

Com base nos oscilogramas de tensão e corrente, a Transformada Discreta de Fourier pode ser utilizada também como método do cálculo de uma “função de transferência” [4], que na verdade é a admitância no domínio da frequência. Técnicas utilizando a função de coerência podem ser utilizadas para se determinar o nível de confiabilidade da técnica [19], [5] e [20], nas diferentes frequências.

Os resultados podem ser comparados com os ensaios de resposta em frequência, como observado em [3], ou servirem para a comparação entre formas plena e cortada dos ensaios de impulso [21]. A função de coerência também pode ser utilizada de forma efetiva para o ensaio da reprodutibilidade do gerador de impulsos, ajudando a diagnosticar falhas como resistores queimados, oxidação dos contatos e qualquer outro problema ligado ao gerador de impulsos.

A Transformada Wavelet pode ser vista como uma generalização da Transformada de Fourier em alguns aspectos, com aplicações em detecção de faltas em um ensaio de impulso

atmosférico, como em [7] e [22]. Nos trabalhos citados, a técnica é utilizada em um contexto diferente do proposto no presente trabalho.

As formas cortadas impõem maior dificuldade na análise no domínio do tempo, em virtude da dificuldade de controle exato do tempo de corte dos centelhadores, por exemplo pela característica probabilística da ruptura dielétrica do equipamento. Como resultado, os tempos de corte variam numa determinada faixa, tipicamente de centenas de nanosegundos a alguns microssegundos, o que inviabiliza a comparação direta. Existe uma proposta de compensação [23], que se adequa aos métodos de análise sugeridos nesse trabalho, desde que se trabalhe em critérios automáticos para a definição de limites de confiabilidade para os impulsos ajustados.

A definição quanto ao desempenho satisfatório ou não do corpo-de-prova submetido ao ensaio também pode ser realizada por comparação dos resultados obtidos com outros transformadores já ensaiados e considerados com resultados satisfatórios, buscando-se dessa forma identificar padrões característicos de comportamentos semelhantes ao observados.

Os circuitos para detecção de falhas não necessitam ser calibrados. No entanto, faz-se importante realizar uma verificação de modo a conferir se as leituras são suficientemente reprodutíveis. Para tal, podem ser consideradas várias aplicações de impulsos com tensão inferior a tensão de impulso reduzido.

Além da análise do defeito, a utilização de técnicas modernas também permite a identificação do(s) ponto(s) de defeito(s). As técnicas de localização dos defeitos durante um ensaio de impulso são incipientes e necessitam de processos de validação. Como exemplo, é possível citar [24] e [25].

2.4 O ensaio de impulso atmosférico escalonado

Um procedimento alternativo de ensaio está sendo avaliado no LAT-EFEI, consistindo na aplicação de diversos impulsos de forma plena, cuja amplitude parte de um valor inicial considerado baixo e com pequena probabilidade de avarias, aumentando-se gradativamente o nível por meio de passos fixos até se obter uma solicitação com a TSNIA ou ocorrer falha do equipamento. De forma análoga ao procedimento normativo, devem-se efetuar aplicações de tensões impulsivas em cada enrolamento, sendo registrados os oscilogramas da tensão e corrente impulsiva a cada aplicação, normalmente por meio de um osciloscópio digital ou digitalizador.

O fato de não serem necessários os impulsos com forma cortada nesse procedimento simplifica a exigência de equipamentos para a realização do ensaio, que normalmente inclui o centelhador de corte, bem como de seu sistema de disparo, que deve ser meticulosamente sincronizado ao disparo inicial para possibilitar cortes reprodutíveis para comparação, sob o aspecto prático [9]. Também evita as discussões associadas à interpretação dos oscilogramas resultantes dos cortes, onde é natural atribuir possíveis discordâncias entre os oscilogramas de níveis pleno e reduzidos a variações no tempo de corte.

O resultado deve ser apresentado por meio de uma figura que permita a fácil comparação dos oscilogramas coletados. Pode-se, por exemplo, por meio de técnicas de tratamento de sinal normalizar as amplitudes e os tempos de referência, gerando um resultado semelhante ao observado na Figura 3, para uma amostra sem qualquer problema aparente.

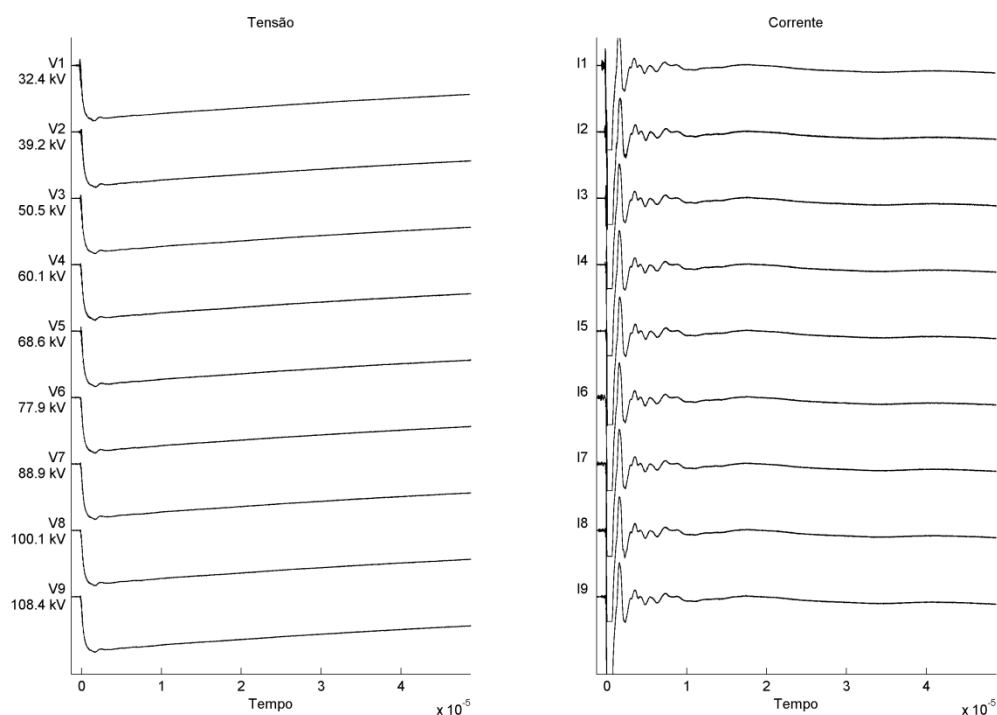


Figura 3 - Resultado do ensaio de impulso escalonado para um transformador de distribuição sem indicativo de falhas.

Alternativamente, podem-se manter as escalas, gerando um resultado semelhante ao mostrado na Figura 4, que mostra o comportamento da tensão de um transformador submetido ao ensaio de impulso escalonado, com destaque para pequenas perturbações que têm a sua posição relativa alterada na medida em que se eleva a amplitude.

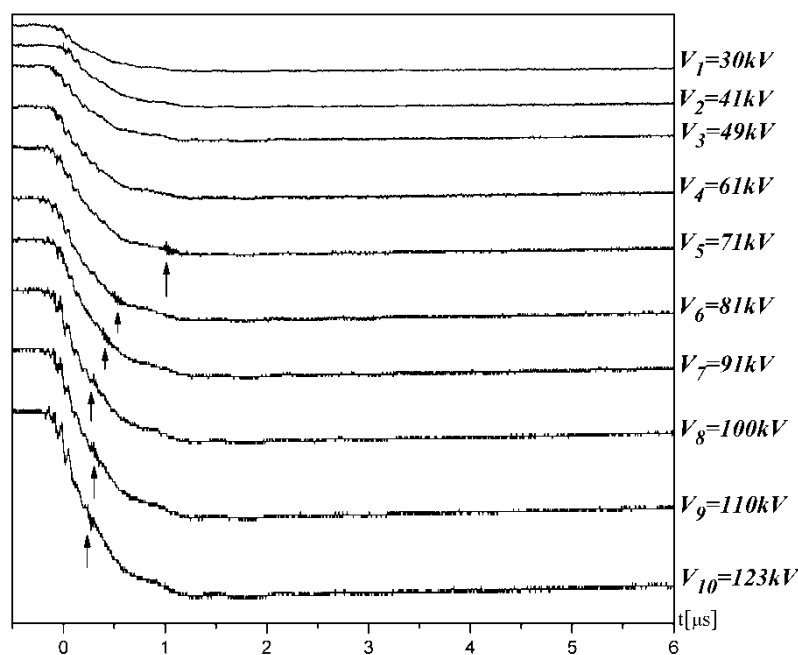


Figura 4 - Comportamento da tensão de uma amostra defeituosa.

2.5 Geração de tensões impulsivas

Dois circuitos básicos para a obtenção das formas impulsivas necessárias ao ensaio são mostrados na Figura 5. Uma carga inicial é fornecida ao capacitor C_1 , que estabelece uma tensão inicial U_0 neste. Após o estabelecimento do nível desejado, a chave G , que representa a operação de um centelhador de esferas é fechada, fazendo com que o capacitor se descarregue no circuito formado por R_1 , R_2 e C_2 , que é responsável por dar o formato característico ao impulso resultante.

Ao equacionar ambos os circuitos obtém-se a mesma expressão característica, diferenciando apenas pelo impacto dos valores dos elementos nos tempos característicos e na eficiência, expressa pela relação entre a amplitude de $U(t)$, entregue ao objeto sob ensaio e a tensão inicial U_0 do capacitor.

Os efeitos indutivos que invariavelmente aparecem em qualquer circuito real foram ignorados para maior simplicidade e a capacitância C_2 representa tanto a capacitância do equipamento a ser ensaiado como qualquer outra capacitância inerente ao circuito de ensaio. A expressão da tensão de saída é mostrada em (1) e o seu equacionamento detalhado pode ser conferido em [13].

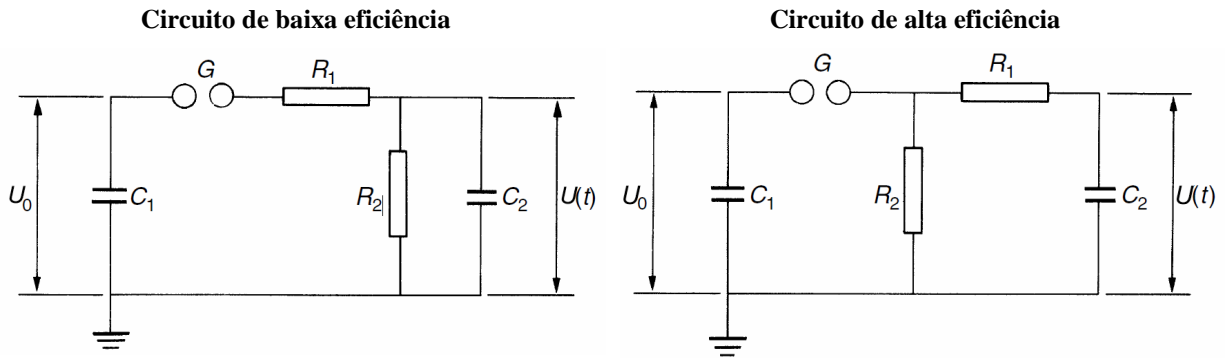


Figura 5 - Circuitos para a obtenção das formas impulsivas requeridas para os ensaios.

$$U(t) = \frac{U_0}{k} \frac{e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (1)$$

As constantes k , α_1 , α_2 são funções dos elementos do circuito. O resistor R_1 tem grande influência sobre a constante atrelada à exponencial positiva que influi significativamente no tempo de frente da onda e recebe por isso a denominação de resistor de frente. De forma análoga, o resistor R_2 recebe o nome de resistor de cauda. Os valores α_1 e α_2 são determinados de modo a se obter os valores normativos de $1,2 \mu\text{s}$ para o tempo de frente $50 \mu\text{s}$ para o tempo de cauda.

Como o objeto sob ensaio faz parte do circuito, o seu efeito capacitivo apresenta grande influência sobre o tempo de frente e o indutivo sobre o tempo de cauda, torna-se necessário variar os elementos do circuito a cada mudança de objeto, visando à obtenção dos tempos característicos. Tolerâncias são necessárias nos tempos especificados [10] para que se possam graduar elementos para contemplar todas as amostras a serem ensaiadas de forma econômica.

O critério econômico também faz com que geralmente os valores dos capacitores do circuito de ensaio sejam fixos, de forma que a variação dos tempos de frente e cauda sejam feitos por meio da substituição dos resistores R_1 e R_2 . No projeto e construção de um equipamento gerador de impulsos, deve-se contemplar a fácil remoção e substituição desses elementos para adequação às amostras a serem ensaiadas.

O circuito mostrado ainda possui algumas dificuldades práticas/econômicas, como a geração de tensões contínuas para o carregamento dos capacitores, que precisa ter um nível maior que a amplitude do impulso que se deseja aplicar, que pode chegar em alguns casos a milhares de quilovolts, dependendo da TSNIA do equipamento a ser ensaiado.

Os tamanhos e custos associados à centelhadores, capacitores e resistores que cumpram todos os requisitos técnicos nesses níveis de tensão, fizeram que em 1923, Marx sugerisse um arranjo alternativo modular. No mesmo uma única fonte de tensão contínua carrega os capacitores dos diversos módulos em paralelo reduzindo a tensão necessária para o carregamento e um conjunto de centelhadores ao serem disparados essem reconfigurar os módulos para os capacitores se rearranjassem na configuração série.

A Figura 6 mostra um arranjo de seis estágios, equivalente ao encontrado no equipamento disponível no LAT-EFEI. O equipamento disponível possui a possibilidade de ligações alternativas, que permitem configurações mistas série - paralelo com os mesmos componentes, aumentando a flexibilidade na obtenção de diferentes formas de impulso. Detalhes das diversas ligações podem ser obtidos por meio de [26].

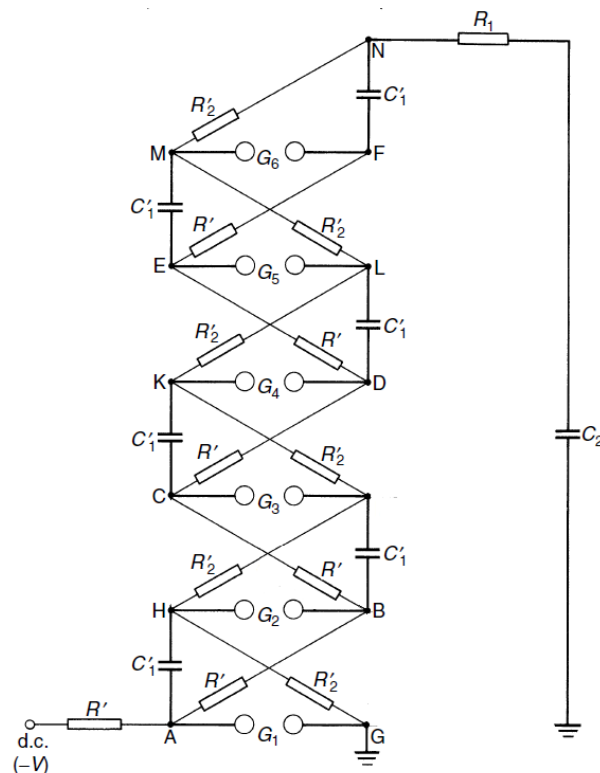


Figura 6 - Gerador de impulsos de seis estágios (Adaptado de [13]).

A tensão contínua fornecida tem de ser elevada de forma lenta, para permitir que a carga nos capacitores se equilibre e eles tenham tensões semelhantes. Também é necessária a variação da tensão ou o disparo programado ao se atingir um determinado nível de tensão, para possibilitar a variação da amplitude da forma resultante.

A variação da tensão também impõe que se possa variar a distância entre os centelhadores, de modo que se possa controlar o momento da disrupção do centelhador G_1 por meio de uma centelha. Essa disrupção faz com que os outros centelhadores também se

rompam, em função do acoplamento capacitivo e o surgimento de tensões críticas em cadeia, para cada isolador.

Normalmente, para o carregamento se faz o uso de um autotransformador variável acoplado a um transformador elevador de relação fixa. Uma retificação em meia onda é feita por meio de um diodo de alta tensão e a corrente de carregamento é limitada por meio de um resistor de alta tensão.

Esse arranjo simples, barato e eficaz pode deixar de vir a ser utilizado na maior parte das aplicações em detrimento de arranjos especiais de dispositivos eletrônicos de modo a se formar um conversor DC-DC com a requerida tensão para carregamento do grupo de capacitores, como mostrado em [27] e [28].

Existem diversas pesquisas acerca do uso de elementos de chaveamento constituído por semicondutores, que podem vir a ter grande utilidade com o surgimento de mecanismos automatizados para a análise do ensaio e da possível aceitação do ensaio de impulso atmosférico como ensaio de rotina em transformadores de distribuição.

A disrupção sucessiva dos centelhadores de forma espontânea permite o surgimento de discussões acerca da natureza das não conformidades nos instantes iniciais na onda aplicada a transformadores. Oscilações podem surgir em função das ressonâncias naturais entre as indutâncias série não representadas e os elementos do circuito.

Diferenças nos modos de oscilação entre aplicações nos instantes iniciais são atribuídas normalmente ao fato de os centelhadores não se romperem exatamente no mesmo instante, muito embora também possam estar ligados ao comportamento da amostra. Isso pode, por exemplo, ser consequência do aparecimento de arcos ao longo de pequenos trechos de enrolamento submetidos a um excessivo gradiente de campo, que são algumas vezes pouco energéticos e geram pequenas oscilações nas formas de tensão e corrente. Tal fato será discutido com mais detalhes nas seções seguintes.

Nos primeiros projetos de geradores, o capacitor C_2 necessário para a operação do circuito e que deve estar dimensionado para a tensão total do arranjo é usualmente realizado por uma unidade independente feita de lâminas metálicas isoladas por papel imerso em óleo. Um divisor de tensão, normalmente resistivo era necessário nesses equipamentos para efetuar a medição da amplitude da tensão impulsiva e capturar a forma do impulso com o mínimo de distorção possível.

Recentemente, entretanto, é comum incorporar também a função de medição ao capacitor C_2 , incluindo um elemento de alta capacitância e alguns resistores para amortecer as

ressonâncias naturais do conjunto e casar impedância, formando um divisor de tensão misto¹. O assunto trabalhado com maior detalhamento na próxima seção.

Vale ressaltar que o conjunto deve possuir a menor indutância possível, impedindo a formação de um circuito ressonante que impacte negativamente a forma resultante como, por exemplo, sobre-elevações de tensão (Overshoot) na região da crista, trazendo dificuldades na determinação da real solicitação a que o equipamento está sendo submetido. Desse modo, tanto os capacitores quanto os resistores devem ser de construção especial.

Os capacitores do circuito são carregados lentamente e operam praticamente em curto-circuito no disparo do gerador, devendo dessa forma ser cuidadosamente construídos para suportarem os esforços eletromecânicos avindos da solicitação de corrente demandada, além de evitar os efeitos indutivos que possam atrasar o tempo de resposta dos mesmos à solicitação de curto-circuito. Os resistores são normalmente construídos a partir de fios enrolados, de modo a evitar o efeito indutivo ou, mais recentemente, por meio de um filme metálico depositado em um substrato.

A Norma Europeia IEC6060-1/2010 [29] fornece um método prático para efetuar a compensação das possíveis sobre-elevações de tensão e determinar um valor de crista equivalente à solicitação sem o fenômeno. O método pode ser feito de forma manual ou automática, e a mesma referida norma fornece guias de implementação numérica do procedimento. A norma brasileira não prevê este procedimento, de modo que o ensaio de impulso atmosférico em transformadores deve ser realizado em condições em que o efeito não seja significativo.

¹ No inglês damped voltage divider ou divisor de tensão amortecido, ressalta a característica amortecida que vai ser tratada nas seções subsequentes.

3 Detalhes do equipamento de ensaio

Acoplado ao mecanismo de geração de tensões impulsivas, tem-se pontos de medição de tensão e corrente, essenciais à correta avaliação de um ensaio de impulso. Os dispositivos de medição no campo de alta tensão têm em geral uma natureza passiva, constituindo uma rede sujeita à teoria clássica dos sistemas lineares, de modo que se têm, como importantes instrumentos de projeto e avaliação de desempenho, as avaliações por meio das funções de transferência, das respostas em frequência e das respostas ao impulso.

No barramento de tensão contínua para o carregamento dos capacitores é necessário o monitoramento da tensão entregue aos capacitores, de modo a comandar o disparo da primeira esfera ao se atingir a tensão de carregamento desejada. Para tanto, normalmente se faz uso de um simples divisor resistivo, consistindo de dois resistores em série, um de maior e um de menor valor.

Nesse caso específico, é conveniente assumir valores elevados para a resistência total do conjunto, na casa de dezenas a centenas de megaohms, de modo a garantir que o conjunto não descarregue rapidamente os capacitores, limitando-se a fornecer um sinal de tensão proporcional à tensão de carregamento. Para o braço de maior resistência e conseqüentemente maior tensão, pode-se fazer uso da associação em série de resistores comerciais possuindo menor tensão nominal, assegurando a correta divisão de tensão entre os elementos e um nível de suportabilidade do conjunto compatível com a máxima tensão de carregamento.

Um modelo mais completo desse arranjo inclui as capacitâncias devidas aos diversos elementos e a terra e entre si, e pode ser encontrado em [30], [31] e [32]. A necessidade de uma resistência elevada faz com que conjunto seja útil apenas nas medições em baixa frequência, vindo a apresentar distorções significativas de fase mesmo em frequências próximas à industrial, como pode ser observado na Figura 7, que mostra a resposta em frequência real de um divisor de tensão resistivo de 100 kV/10 M Ω .

Existem alternativas para estender a resposta de um divisor resistivo para altas frequências. As principais são reduzir as dimensões do conjunto e, com isso, a discrepância entre os valores das capacitâncias em paralelo ou reduzir a impedância geral do conjunto, diminuindo o impacto relativo do desequilíbrio, mas impondo um maior carregamento ao circuito adjacente.

A primeira solução é muitas vezes inviável, assim não é comum obter divisores resistivos de alta impedância e bom comportamento em altas frequências. A segunda solução

é a mais adotada. Também é usual encontrarmos resistores com tempo de resposta na casa de dezenas de nanosegundos e dezenas de quiloohms de impedância total, o que os torna adequados a impulso, mas impróprios para o uso em frequência industrial devido à grande dissipação térmica demandada nesse caso.

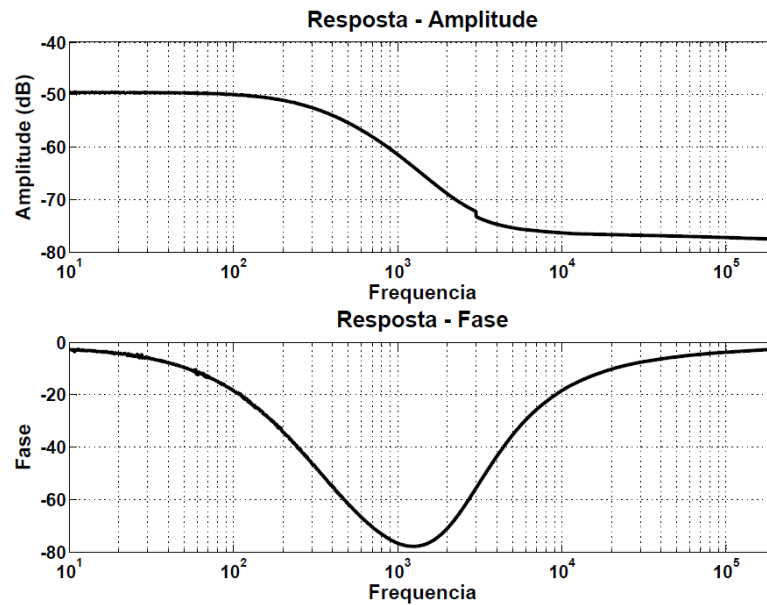


Figura 7 - Ensaio de resposta em frequência em um divisor de tensão resistivo de 100 kV/10 M Ω .

Uma abordagem interessante para ensaios de impulso é uso de divisores capacitivos compensados, semelhante ao que pode ser conferido na Figura 8, que mostra o princípio de funcionamento de uma unidade de fabricação da High Volt.

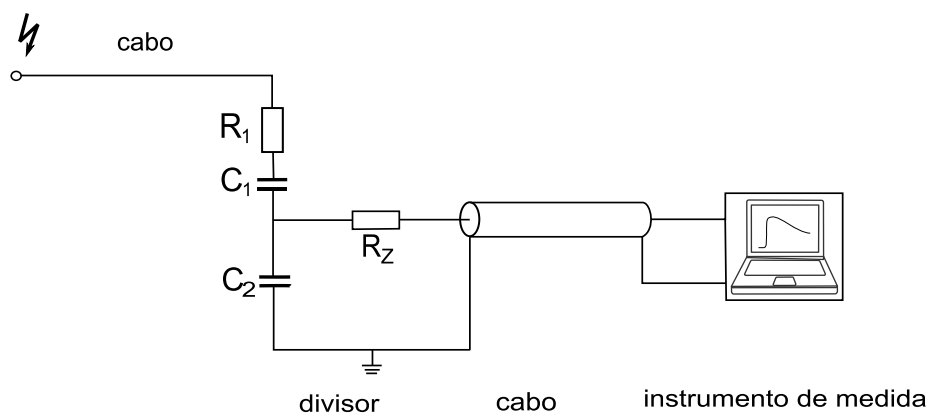


Figura 8 – Circuito equivalente simplificado de um divisor capacitivo amortecido.

Nesse caso, tem-se um capacitor de alta tensão e pequeno valor relativo C_1 que é responsável de forma majoritária pelo comportamento equivalente do conjunto. Tem-se um resistor R_1 que serve para amortecer as possíveis oscilações formadas pela interação entre os

elementos resultantes do arranjo físico e o instrumento de medição e um resistor de casamento de impedância R_Z , além de um capacitor C_2 , de alto valor relativo que é responsável pela divisão de tensão.

Com a impedância majoritariamente capacitiva, o conjunto consegue cumprir a função de um dos capacitores necessários para a formação das formas impulsivas, como descrito na seção anterior, ficando em paralelo com o equipamento sob ensaio além de permitir a medição da tensão aplicada por meio de um instrumento de medição como um osciloscópio ou uma placa de aquisição de dados.

Um instrumento prático tem tempos de resposta na região de centenas de nanosegundos, que culmina em uma largura de banda inferior a um divisor resistivo de baixa impedância com a mesma finalidade.

Mesmo com essa característica, o uso desse tipo de divisor encontra grande aplicação, em face do seu custo-benefício e o relativo consenso que o mesmo oferece largura de banda suficiente para a aplicação em ensaios de impulso atmosférico.

Essa afirmação fundamenta-se normalmente em análises harmônicas da forma do impulso de tensão normalizado, permitindo concluir que esta forma possui pouca energia acima de frequências superiores a 100 kHz, o que demandaria um divisor com frequência de corte poucas vezes superior a esse valor.

A medição de corrente em ensaios de impulso também exige cuidados e equipamentos especiais em função da possibilidade de danos ao instrumento de medição. Essa preocupação leva à preferência de transdutores que possuam algum nível de isolamento da corrente impulsiva, de modo a evitar eventuais problemas de queima de instrumentos registradores, com um custo elevado. Em outras aplicações, a solução normalmente adotada quando se demanda uma medição de corrente com isolamento é o uso de transformadores de corrente ou transdutores baseados no efeito Hall.

Transformadores de corrente convencionais não são normalmente adequados às medições de correntes provenientes do ensaio de impulso atmosférico, principalmente por dois aspectos práticos: a limitação da faixa linear de resposta em frequência, que torna difícil especificar um transformador de corrente convencional para a aplicação e a possibilidade de saturação em função dos níveis de corrente, que variam bastante de amostra para amostra e em função do projeto construtivo. Sensores de efeito Hall não têm velocidade suficiente para acompanhar as mudanças de corrente, possuindo forte limitação em largura de banda, o que também os torna inadequados para a tarefa.

Como alternativa, pode-se fazer uso de shunts de corrente, que são resistores de pequeno valor responsáveis por converter o sinal de corrente em uma tensão diretamente proporcional a este, desde que o sinal esteja limitado em banda próximo à sua frequência de corte.

Possuem geralmente ampla banda passante e tempo de resposta na casa de poucos nanosegundos e impedância de poucos ohms, adequada à condução do sinal por meio de um cabo coaxial de medição terminado nas impedâncias padrão de 50 ou 75 ohms ou pelo uso de atenuadores ou medição direta por meio de uma ponta de prova. A desvantagem é a ausência de isolamento do sinal, que exige cuidados quanto ao aterramento e eventuais laços de terra.

Algumas referências, por exemplo, a IEEE Std C57.138-1998 [33], que apresenta práticas recomendadas para ensaios de impulso atmosférico de rotina, recomendam a inserção de uma capacitância em paralelo ao shunt resistivo, para limitar a amplitude da corrente capacitiva inicial, de modo a compatibilizá-la com a componente indutiva, auxiliando na proteção do equipamento de medição e uso de uma escala que melhor aproveite a excursão da onda.

No entanto, tal método reduz a sensibilidade na detecção de pequenas oscilações, como mencionado em [34]. O uso desse capacitor é justificado em situações de ensaios de rotina, haja vista que o ensaio de tensão induzida pode ser utilizado para a detecção de falhas entre espiras.

Uma alternativa de transdutor de corrente que permite a isolação entre a corrente a ser medida e o sinal direcionado à instrumentação é o uso da Bobina de Rogowski. Trata-se de um toróide, constituído de um enrolamento uniformemente distribuído em um núcleo não magnético, que ao envolver um condutor, induz uma diferença de potencial proporcional à variação da corrente do condutor envolvido.

Tendo um sinal proporcional à derivada da tensão, torna-se necessário um dispositivo de integração que pode ser tanto eletrônico como passivo. Para os dispositivos típicos utilizados em ensaios de impulso, normalmente são utilizados capacitores passivos para a integração e o sinal é conduzido em uma linha de transmissão terminada em 50 ou 75 ohms para o instrumento registrador.

Como consequência, o dispositivo acaba por possuir duas frequências de corte determinadas pelos parâmetros construtivos: uma inferior e uma superior, tendo a banda passante entre o intervalo delimitado pelas duas frequências. Apesar disso, os limites são geralmente adequados ao uso na medição das correntes impulsivas, existindo dispositivos que

possuem limite inferior na casa das dezenas de quilo-hertz e limite superior acima de diversas dezenas de mega-hertz.

A experiência prática de laboratório mostra que com um dispositivo de fabricação da Pearson Electronics – Modelo 110, com 0.1 V/A, 5000 A de tensão máxima admissível e tempo de resposta utilizável de 20 ns há uma dificuldade na captura de oscilações de alta frequência associadas a fenômenos incipientes relacionados aos impulsos de corrente.

No entanto, como este dispositivo não impacta de forma significativa o circuito de ensaio é possível utilizar em conjunto um shunt, possibilitando a captura simultânea das formas advindas de ambos os instrumentos. Um dispositivo similar ao mencionado acaba sendo útil com o ajuste de escala mais ampla, com o uso de instrumentos de digitalização de resolução vertical de 8 bits.

Um dispositivo registrador capta os sinais de tensão e corrente vindos do divisor de tensão ou transdutor de corrente e faz sua digitalização ou os apresenta na forma de oscilogramas. Osciloscópios especiais para impulso eram utilizados para esta tarefa antes da tecnologia digital atualmente encontrada nos instrumentos para registros de ocorrência de transitórios.

As principais diferenças dos osciloscópios para impulso em relação a um osciloscópio comum estão relacionadas com a velocidade do feixe de raios catódicos, bem como o fato de que o feixe ilumina a tela com a presença de um sinal que ocorre apenas uma vez, haja vista que o ensaio de impulso atmosférico não é um evento repetitivo. Uma câmera fotográfica era normalmente acoplada à tela do instrumento para o registro permanente da forma de onda.

Os sinais chegam ao instrumento normalmente por meio de cabos coaxiais que possuem estágio de entrada com duas opções de terminação, com diferentes níveis máximos de tensão máxima admissível: 50/75 Ω ou 1 M Ω . A entrada de alta impedância é ideal para a utilização de pontas de prova, o que acaba por aumentar a tensão máxima admissível no estágio de entrada.

A terminação de 50/75 Ω é conveniente para fazer o casamento de cabos com a mesma especificação, mas que em geral possuem limites inferiores de tensão máxima admissível. As terminações de baixa impedância também são utilizadas para realizar o casamento de impedância em ambos terminais do cabo de conexão, dependendo do modo de acoplamento utilizado, evitando deste modo que oscilações internas deformem a forma dos impulsos.

Mesmo com grandes fatores de atenuação dos sinais vindos dos divisores de tensão ou transdutores de corrente, em alguns casos acaba por ser necessário o uso de arranjos especiais para uma maior atenuação, vide [35], de modo a compatibilizar os níveis dos sinais com o

estágio de entrada do instrumento. Para cabos coaxiais terminados em $50/75 \Omega$, pode-se fazer uso de redes de atenuação ou até mesmo fazer uso de um terminador de potência acoplado a uma ponta de prova, por exemplo.

Os atenuadores são normalmente um ou vários circuitos PI ou T, conforme mostrado na Figura 9, que permitem uma atenuação do sinal sem interferência na impedância de casamento e, conseqüentemente o aparecimento de distorções por reflexão. Também permitem o uso de instrumentos terminados em 50Ω em equipamentos/cabos com impedância característica de 75Ω e vice versa e, se adequadamente construídos, podem possuir ampla largura de banda, reduzindo a possibilidade de distorções à forma original do impulso. De qualquer forma, todo o conjunto deve ser avaliado quanto a essa possibilidade.

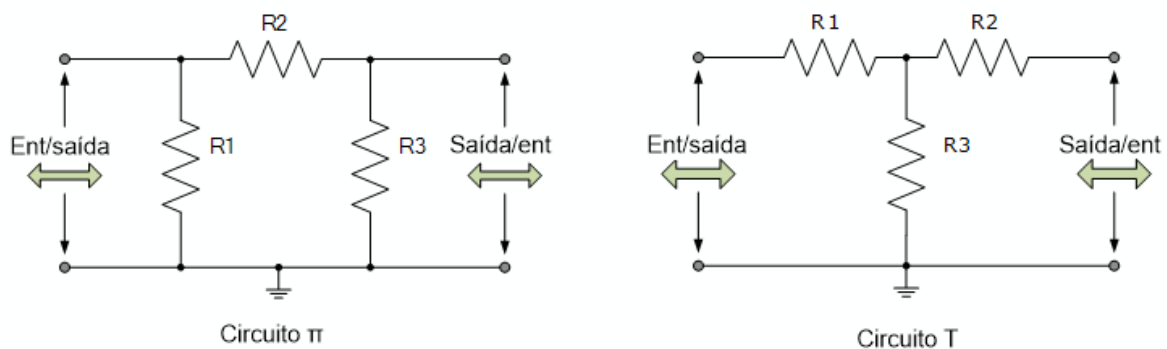


Figura 9 - Atenuadores Pi/T.

Em instrumentos digitais, como osciloscópios ou placas de aquisição de dados, sucessivas conversões analógico-digitais são feitas logo após o estágio de entrada, sendo os valores das conversões armazenados em uma memória de alta velocidade, formando um buffer circular. Após a tomada de decisão sobre o início da aquisição (Trigger), é coletada uma quantidade definida de conversões, interrompendo o processo. Com esse arranjo, pode-se ter acesso a informações anteriores ao disparo de início da aquisição, que se baseia normalmente na comparação do valor de tensão com um nível preestabelecido para ensaios de impulso atmosférico. Os valores armazenados são processados para formar um oscilograma e mostrados ao usuário assim como podem ser coletados na forma de sucessivos pontos e entregue ao usuário por meio de um arquivo de planilha.

Diversas especificações do equipamento podem impactar de sobremaneira o uso e a capacidade de identificação de potenciais defeitos em ensaios de impulso atmosférico. No estágio de aquisição, pode-se citar a banda passante do amplificador de entrada do equipamento que define a frequência de corte analógica, ou largura de banda analógica do instrumento. Ela apenas se refere ao estágio de entrada do instrumento e, para ser totalmente

utilizada, demanda que todos os estágios anteriores possam ser compatibilizados com a largura de banda desejada, que inclui no caso de um ensaio de impulso as pontas de prova, caso sejam utilizadas, casadores de impedância de potência, cabos, divisores de tensão, etc.

A experiência tem mostrado que uma largura de banda do conjunto instrumento/ponta de prova ou atenuador entre 100 e 350 MHz é mais do que suficiente para o trabalho, e é facilmente atingível pela maioria dos equipamentos de diversos fabricantes de instrumentos.

Na realidade o uso de equipamentos com uma banda passante analógica maior pode trazer mais malefícios que benefícios, na medida em que a mesma pode aumentar a captação de ruídos inerentes ao circuito de medição e dificultar o diagnóstico de eventuais problemas reais. Instrumentos mais capacitados normalmente oferecem uma opção para a limitação da largura de banda nesses níveis e podem ser utilizados sem qualquer problema.

Ao contrário do que normalmente acontece com as especificações analógicas, que não restringe a gama de instrumentos a serem utilizados, as especificações de desempenho digitais são mais restritivas na escolha do equipamento adequado. Normalmente é necessária uma solução de compromisso para a escolha do equipamento que possua uma boa relação técnico-econômica, haja vista que a demanda de um ensaio de impulso atmosférico pode aproximar o desempenho de um equipamento ao encontrado no estado de arte no que se refere à aquisição analógico-digital.

É importante considerar a taxa máxima de amostragem digital, o número de bits do conversor analógico digital, que impacta na resolução vertical do instrumento, assim como o tamanho da memória de armazenamento dos valores, que impacta no comprimento máximo de gravação.

A taxa máxima de amostragem digital define a frequência de operação máxima do digitalizador e é dada em valores de amostras/segundo. O ensaio de impulso atmosférico demanda uma taxa de amostragem superior a 500 MSps, ou 500 milhões de amostras por segundo em instrumento de 8 bits. A teoria clássica da amostragem de Nyquist/Shannon impõe que a mesma deve ser superior ao dobro da largura de banda analógica, porém em alguns casos é necessário uma sobreamostragem, como visto adiante.

O número de bits do conversor analógico digital é o parâmetro que estipula o tamanho da palavra binária resultante de uma conversão A/D. Uma palavra binária de 8 bits implica, por exemplo, que a faixa de sensibilidade do conversor, que engloba o limite linear de operação está discretizado em $2^8 = 256$ níveis.

Em uma representação positiva, isso indica que o menor valor reconhecível recebe o valor 0 e o maior valor reconhecível recebe o número 256, de modo que os valores situados dentro do intervalo delimitado por esses números é aproximado pelo código mais próximo.

Isto também tem impacto no tipo/tamanho de memória necessária ao armazenamento dos dados, ao se projetar um instrumento. As referências [9] e [36] estipulam que é necessário um instrumento com pelo menos 9 bits para o uso em ensaios de impulso atmosférico, muito embora os instrumentos no estado de arte para ensaios de impulso atmosférico atualmente possuem 12 ou 14 bits.

O comprimento máximo de gravação tem relação direta com a memória disponível, sendo definida pelo número máximo de amostras que podem ser armazenadas durante a aquisição de uma forma de impulso. Há alguns anos, era comum encontrar instrumentos com comprimento máximo de gravação de dez mil ou cinquenta mil pontos, porém hoje com a maior oferta e acessibilidade de memória, é comum obter instrumentos com um, cinco, dez ou até mesmo cinquenta milhões de pontos de comprimento de gravação.

Associada à taxa máxima de amostragem define-se o intervalo máximo de gravação sob maior resolução horizontal. Em uma forma normalizada de $1,2 \times 50 \mu\text{s}$, para a captação de toda a dinâmica associada à sua aplicação, normalmente é necessário um tempo de aquisição superior a $80 \mu\text{s}$.

As normas referentes ao ensaio de impulso atmosférico não são claras a respeito do impacto dessas especificações na análise dos dados, limitando-se a estabelecer parâmetros mínimos para a resolução vertical e o tempo de aquisição.

É prática comum não se levar em consideração fenômenos situados nos primeiros centésimos de nanosegundos da onda, limitando a análise a oscilogramas ajustados para mostrar algumas dezenas de microssegundos de tempo, inclusive com a recomendação em [36], para evitar a utilização de zoom nos equipamentos que dispõe desse recurso.

Trata-se de uma herança da análise dos oscilogramas por meio de fotografias de instrumentos analógicos, talvez necessitando de uma adequação aos novos instrumentos disponíveis no mercado.

Uma característica interessante dos novos instrumentos, principalmente em se tratando de uma ampla capacidade de memória é a possibilidade de, com a aquisição de um único evento, a montagem de oscilogramas com resolução horizontal suficiente para cobrir tanto fenômenos relacionados à frente de onda quanto a fenômenos relacionados à cauda.

Basta ajustar a aquisição para a velocidade máxima permitida e o armazenamento máximo (em um equipamento de 8 bits em torno de $2,5 \text{ GSps}/1 \text{ MPontos}$), de modo que se

obtenha oscilogramas tanto com a excursão de 100 μs , mostrando o comportamento completo do impulso, quanto oscilogramas com excursão de 5 ou 10 μs , que evidenciam o comportamento na frente do impulso. Isso seria impossível com apenas uma aplicação em equipamentos analógicos, sem fazer uso de misturadores e equipamentos independentes para a captura, por exemplo.

Ao abrir o leque de possibilidades de análise, talvez seja necessário o uso de divisores com maior largura de banda para aproveitar essa capacidade, de modo que os divisores mistos atuais, com tempo de resposta na casa de centenas de nanosegundos podem se mostrar insuficientes para captar esses fenômenos.

O fechamento de um arco elétrico nos instantes iniciais do impulso que possua pouco impacto no seu formato geral pode passar despercebido nas análises da frente do impulso, pelo uso de divisores com tempo de resposta insuficiente para a sua visualização, aliado à montagem de gráficos de pouca resolução horizontal. O arco ainda pode ser detectado em sua extinção, mas o pequeno impacto no impulso de tensão pode levantar dúvidas quanto à origem dessa perturbação.

Para a medição das correntes impulsivas, tem-se à disposição basicamente dois tipos de equipamentos. Shunts de corrente resistivos e as Bobinas de Rogowski.

Ao se utilizar a teoria de sistemas lineares supondo-se uma excitação com a forma de um degrau unitário e a resposta Gaussiana, com o tempo de subida (t_r) estabelecido como o tempo para se cruzar os limites definidos com o 10% e 90% da amplitude do sinal, tem-se uma relação simples entre o tempo de resposta do sistema com a largura de banda (BW), mostrada em (2).

Cálculos baseados nessa relação sugerem que um divisor com tempo de resposta de 100 ns tem uma frequência de corte de aproximadamente 3,4 MHz, que o tornaria adequado ao uso em ensaios de impulso atmosférico ao se levar em conta o conteúdo harmônico da forma de onda normalizada.

$$t_r \cong \frac{0.34}{BW} \quad (2)$$

Vale ressaltar que o critério exposto não leva em consideração o conteúdo harmônico de qualquer potencial não conformidade que possa acometer os equipamentos sob ensaio. Diversos problemas mais evidentes, como a ruptura dielétrica entre camadas ou descarga disruptiva em grandes seções forçam um afundamento de tensão simultâneo com o

comportamento anômalo nos oscilogramas de corrente, de modo que o uso de divisores de tensão capacitivos permitem a detecção desse tipo de ocorrência com uma certa facilidade.

Já no caso de faltas mais incipientes, como pequenas descargas disruptivas entre espiras com baixo conteúdo de energia, pode-se mostrar, por meio de técnicas de simulação, que a influência é restrita às pequenas oscilações de alta frequência e baixa amplitude relativa². Não é incomum que o período dessas oscilações esteja abaixo de alguns poucos nanosegundos, o que desloca a energia para uma faixa de frequência normalmente próxima ou fora da banda passante dos divisores de tensão ou dispositivos de medição de corrente.

O fato de estar próximo ou fora da banda passante do instrumento de medição ou instrumento de aquisição de dados não implica necessariamente na impossibilidade de detecção de tais eventos. É comum que os transdutores de tensão e corrente ou os instrumentos de registro da forma do impulso possuam uma resposta de primeira ou no máximo segunda ordem em um intervalo imediatamente superior à frequência de corte, o que significa na prática que essas oscilações sofrem uma atenuação em função dessa resposta de geralmente 20 ou 40 dB/década em função de cada elemento.

Em unidades defeituosas, é comum observar de forma facilitada, em relação ao procedimento normalizado, dois comportamentos: o primeiro de degeneração progressiva da isolamento, em alguns casos até mesmo com a eventual falha do equipamento antes mesmo de se atingir a sua TSNIA e o segundo do deslocamento relativo do ponto de possível falha ao longo do impulso. O último caso pode ser atribuído ao incremento da amplitude das solicitações e a manutenção do mesmo nível crítico de suportabilidade no trecho problemático e vai ser tratado em detalhes nas seções subsequentes.

Nesse caso, um possível ponto de falha, que é facilmente detectável em níveis reduzidos de amplitude, pode ser de difícil detecção ao se aumentar o nível de tensão aplicada, em função de se alojar em uma região de excessiva variação de tensão ou corrente e, em um ensaio normalizado isto pode significar a aprovação da unidade sob falha.

A Figura 10 mostra a evolução de uma falha ao longo de um ensaio de impulso escalonado, por meio de oscilogramas de tensão e corrente normalizados em amplitude e posicionados de forma adequada a uma fácil comparação entre as aplicações. Os ensaios foram feitos partindo de um nível desejado de 30 kV, com incrementos de 10 kV, visando atingir a TSNIA do equipamento (150 kV). O defeito é detectável nos oscilogramas de tensão a partir da aplicação de 50 kV e torna-se de detecção mais difícil na medida em que o

² Comparando-se à amplitude da tensão aplicada ou o indicador de falta, normalmente a corrente de neutro

aumento do nível de tensão desloca o comportamento para regiões de maior variação de tensão.

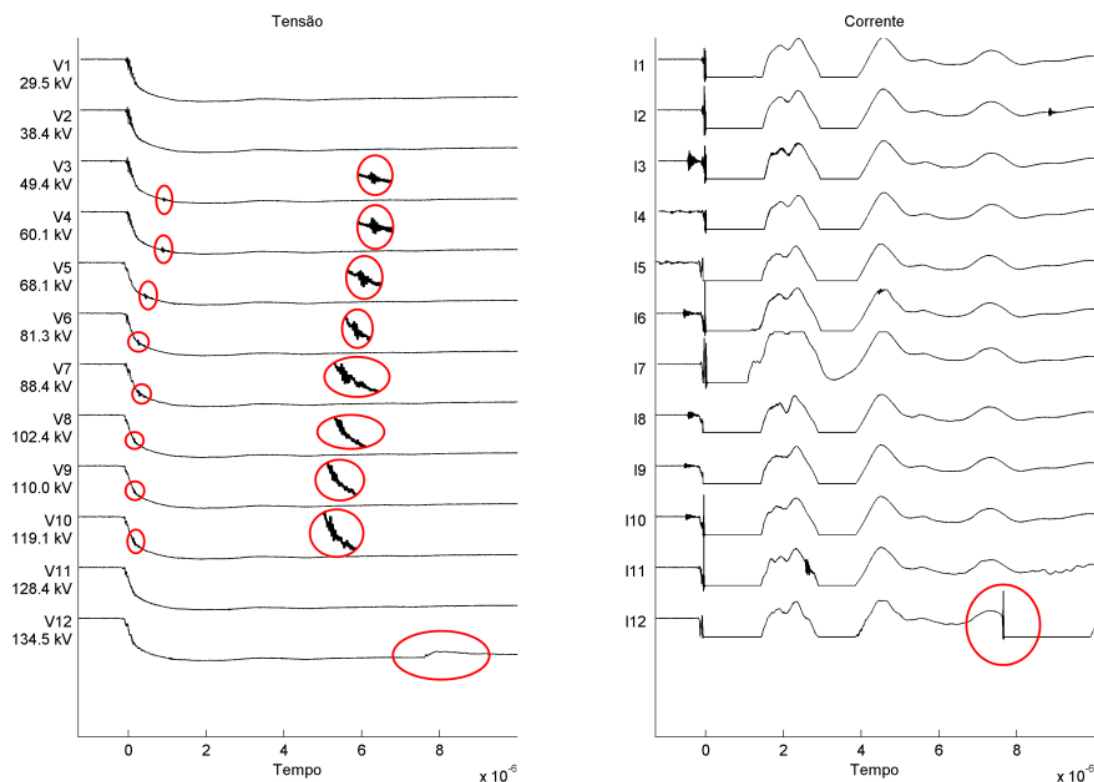


Figura 10 - Ensaio de impulso atmosférico escalonado para um transformador de distribuição defeituoso.

Existem comportamentos que apesar de se assemelharem a defeitos, podem indicar problemas inerentes ao circuito de ensaio. Apesar de essencialmente simples na sua concepção, diversos elementos do circuito podem apresentar dificuldades para a detecção de eventuais problemas. Diversos problemas mais comuns podem ser detectados ao se investigar se a tensão de ensaio é reproduzível, retirando-se a amostra do circuito e fazendo-se uma série de aplicações de tensão.

Com esse procedimento, e em busca de diferenças entre as sucessivas aplicações nas formas de tensão, pode-se verificar a integridade de diversos componentes presentes no circuito. A presença de não conformidades exige uma identificação mais criteriosa nos componentes pertencentes ao circuito.

Algumas falhas em capacitores podem ser detectadas por meio de ensaios de tangente de delta ou de descargas parciais, no entanto estas não são muito frequentes. Os resistores de forma devem ser periodicamente verificados por meio de um ohmmetro e, em geral, costumam apresentar algum ponto de rompimento ao longo de seu enrolamento, no caso de resistores a fio ou alterações significativas dos valores nominais de resistência no caso de

resistores a filme. Também se deve verificar de forma detalhada o circuito em torno de possíveis problemas por meio da oxidação de contatos.

A Figura 11 mostra o resultado de um ensaio de impulso atmosférico escalonado em que as conexões elétricas do shunt responsável pela medição de corrente estavam oxidadas. Note que, logo nas primeiras aplicações, é possível identificar diversas não conformidades e que as mesmas não possuem qualquer correspondência nas formas de tensão, parecendo possuir um comportamento aleatório. O problema foi sanado e o equipamento sob ensaio não apresentou nenhum indicativo de não conformidade após a remoção mecânica da oxidação dos contatos no shunt, como pode ser observado na Figura 12.

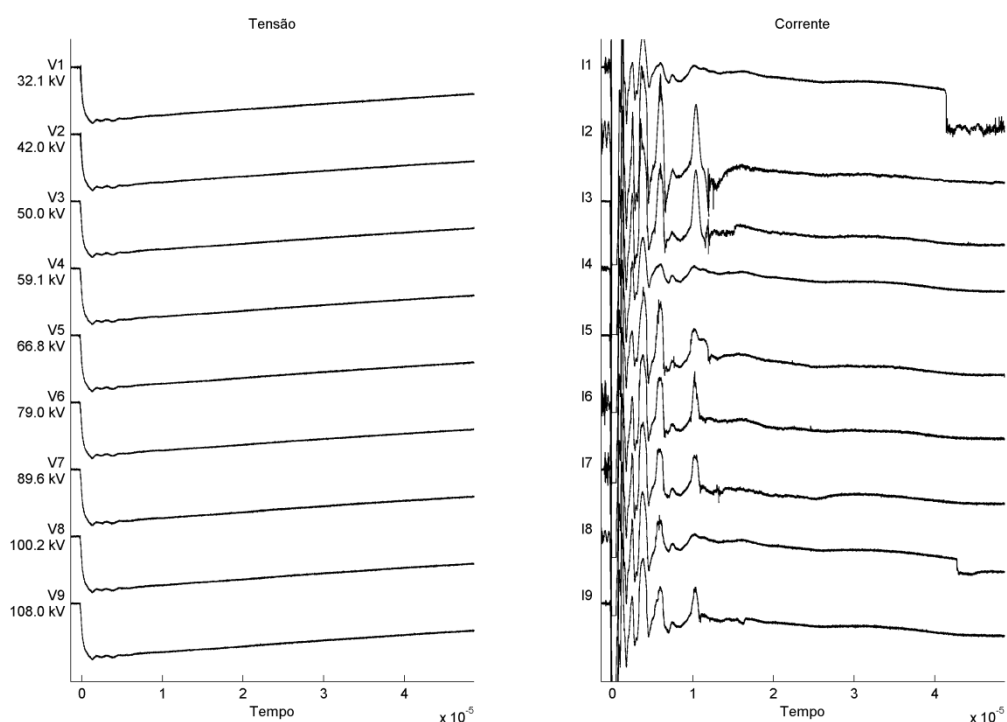


Figura 11 - Resultado falho de um EIAE, em virtude de oxidação nos contatos do shunt.

Nos transformadores de distribuição é comum a incorporação de chaves seletoras de tensão que podem ser operadas de modo a se alterar ligeiramente a relação de tensão de saída do equipamento. Também estão propensas aos mesmos efeitos elucidados, devendo ser manobradas por diversas vezes com o circuito desenergizado nos casos em que há uma suspeita de comportamento semelhante à mostrada pela Figura 11, assumindo que as conexões com o shunt estiverem íntegras. Na Figura 12 podemos conferir o ensaio realizado no mesmo equipamento, após diversas manobras na chave.

É importante também a verificação do circuito quanto a possíveis violações nos níveis nominais de tensão nos estágios de entrada da placa de aquisição de dados ou osciloscópio ou das pontas de prova, caso venham a ser utilizadas. Para o circuito de tensão, é necessária essa

verificação no instante do projeto da etapa atenuadora, haja vista que os níveis demandados são conhecidos de antemão.

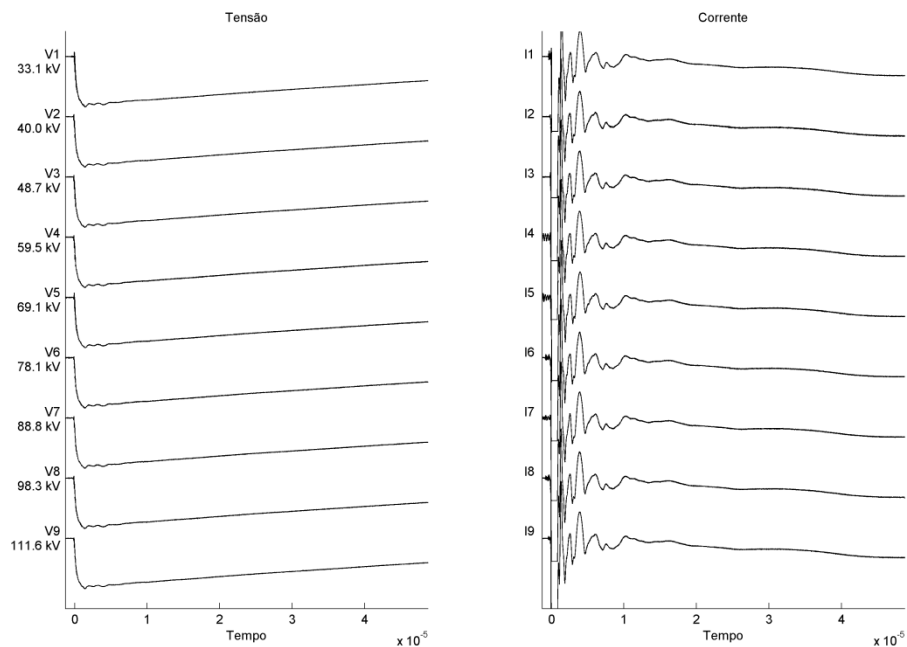


Figura 12 - Ensaio no equipamento após a remoção da oxidação nos contatos do shunt.

Já para o circuito de corrente, os níveis não são conhecidos previamente, porque a forma do impulso resultante está fortemente atrelada ao projeto construtivo do transformador sob ensaio. Uma solução prática para a utilização de shunts de corrente é a verificação dos níveis durante o processo de ajuste da forma do impulso, com níveis reduzidos de aplicação de tensão.

A escolha de resistências de baixo valor, associadas ao uso de escalas de pequeno valor de corrente podem impactar negativamente nas formas obtidas ao evidenciar os fenômenos de possíveis descargas parciais no enrolamento que podem ser toleradas sem qualquer problema ao seu desempenho dielétrico, o que é ilustrado na Figura 13.

Note que apesar de as oscilações de alta frequência capturadas possuírem grande amplitude e estarem presentes durante diversos instantes de tempo, não há qualquer correspondência dessas oscilações nas formas de tensão, com a resolução de captura. Ao se observar uma ocorrência semelhante, deve-se verificar uma possível degeneração progressiva nas demais aplicações e, principalmente, verificar a escolha das escalas e valores de resistência de shunt.

Outra possível fonte de interpretação errônea dos oscilogramas é específica da utilização de osciloscópios com baixa resolução vertical, de 8 ou 9 bits, como é o padrão de

mercado, associado ao uso de pequenas escalas verticais para a onda de corrente. A análise por meio de circuito equivalente do enrolamento permite identificar duas componentes predominantes em uma forma de corrente impulsiva.

A primeira tem pequena duração e alta amplitude e é normalmente associada ao comportamento capacitivo do equipamento, enquanto a segunda mais lenta é associada ao comportamento indutivo. Um equipamento com pouca resolução dificilmente consegue identificar pequenas oscilações em ambas as faixas de corrente.

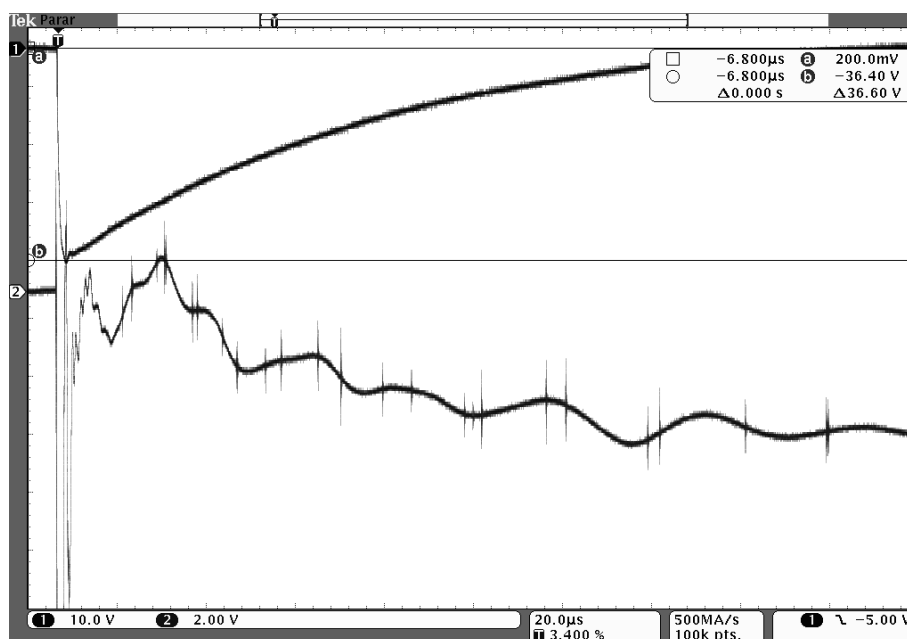


Figura 13 - Possíveis descargas parciais evidenciadas por meio da escolha inadequada de valor de shunt e escala de corrente.

Ao se ajustar a escala vertical de corrente, de modo a não saturar analógica e numericamente o canal, consegue-se obter toda a amplitude de oscilação do impulso e as não conformidades associadas à componente capacitiva podem ser evidenciadas. Em contrapartida, não é possível identificar as pequenas oscilações na parcela indutiva da corrente.

Uma forma de permitir a identificação dessas oscilações é o ajuste da escala, de modo a saturar numericamente o canal durante os instantes iniciais da corrente, que tem uma componente predominantemente capacitiva, restando apenas a informação dos instantes posteriores, de característica indutiva. Em equipamentos com 4 canais essa parcela pode ser capturada sem qualquer problema por meio de um outro canal com a escala devidamente ajustada para essa finalidade, caso necessário, com o uso de, por exemplo, uma Bobina de Rogowski.

Como a componente capacitiva cessa geralmente no primeiro microssegundo para diversos tipos de enrolamento, a informação perdida por meio da saturação numérica não atrapalha a análise da forma do impulso, como pode ser visto por meio da Figura 14, que mostra a corrente oriunda da aplicação de um impulso atmosférico com forma plena reduzida.

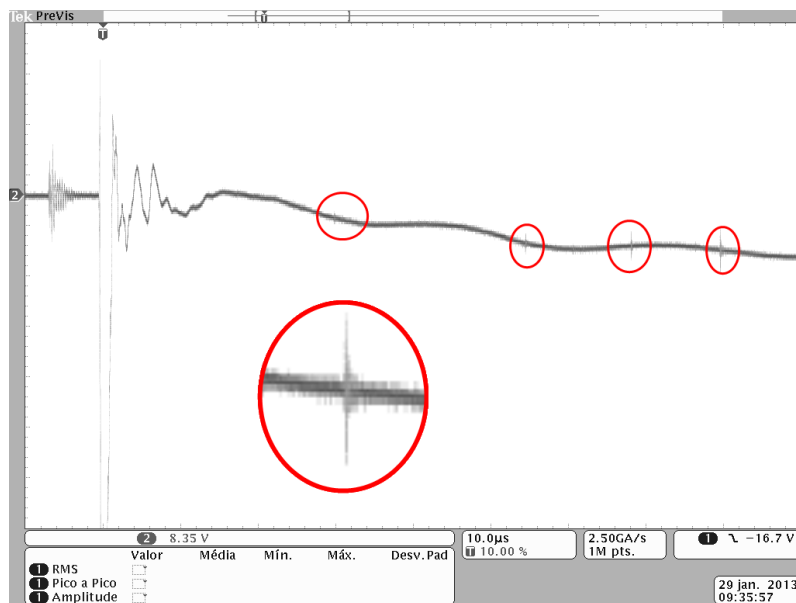


Figura 14 - Ajuste de escala para saturar o canal durante a componente capacitiva.

Os detalhes mostrados em vermelho dificilmente seriam percebidos com o uso de uma escala maior, bem como não é possível observar correspondência nas formas de tensão nos instantes destacados com o nível de resolução do equipamento de medição. Entretanto, neste ensaio, os danos evoluíram durante a aplicação de uma forma plena e puderam-se comprovar as falhas da amostra citada e associar esse comportamento a uma possível descarga entre espiras.

O uso de tal técnica, embora possa trazer benefícios para a análise precisa ser cuidadosamente verificado, haja vista que os instrumentos de aquisição de dados normalmente não são especificados para operação na região da saturação, especialmente analógica.

Mesmo quando o uso do mecanismo de saturação não imprima danos de ordem permanente aos circuitos de medição estes sistemas podem se comportar de maneira anômala enquanto o canal se recupera de longos instantes de saturação ou de saturação por níveis elevados. Durante esse trabalho foram utilizados diversos tipos de osciloscópio, com comportamentos distintos quanto à recuperação frente à saturação dos canais, inclusive em modelos distintos do mesmo fabricante.

Como exemplo, o equipamento de fabricação da Tektronix, modelo TDS3034B disponível no LAT-EFEI, não apresentou comportamento prejudicial à análise das formas durante os ensaios, em diversas escalas escolhidas. Já o equipamento mais recente, modelo DPO4034 do mesmo fabricante apresenta um ganho variável no tempo dezenas de microssegundos após excessivamente saturado. O comportamento é mostrado na Figura 15, com destaque para as formas de corrente de nível pleno e reduzido de uma amostra que não mostrou qualquer indício de falhas em ensaios posteriores.

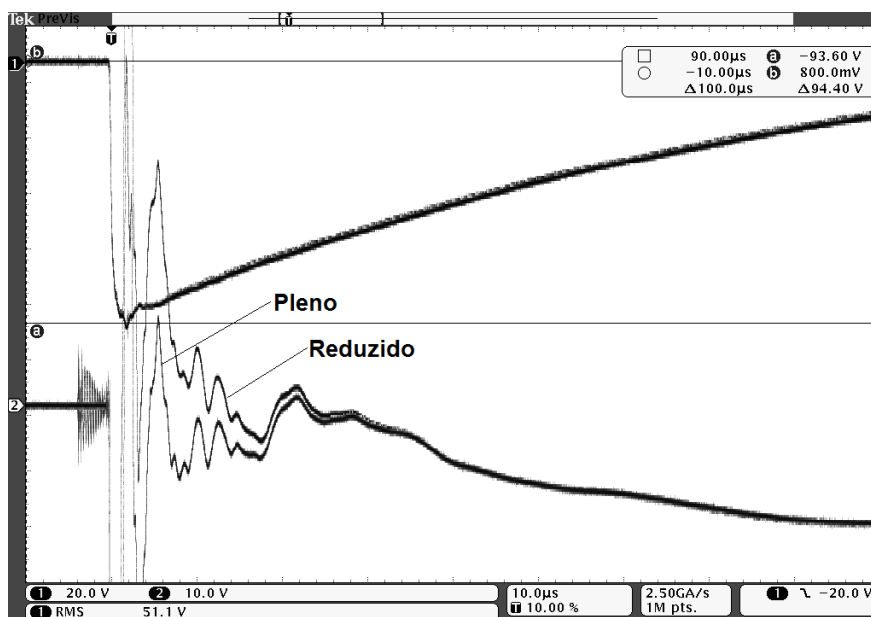


Figura 15 - Comportamento de recuperação devido à saturação excessiva do canal de um osciloscópio Tektronix DPO4034.

Em testes em um equipamento similar de fabricação da Agilent, foi possível observar a inversão de polaridade do sinal durante a fase de saturação do canal, o que permite afirmar que a unidade utilizada nestes ensaios não deve ser ajustada para permitir a saturação dos canais de leitura. Na ocasião, não houve registro do oscilograma.

Outro fator impactante na análise das formas dos impulsos é o uso dos métodos de filtragem digital embutidos nos equipamentos modernos, na forma de um método de amostragem conhecido por “High - Resolution”, ou método de alta resolução. Nesse método, em oposição ao tradicional, onde as amostras de um conversor analógico-digital são armazenadas em uma memória, sem qualquer tipo de processamento, as amostras oriundas do conversor são filtradas e decimadas, por meio de um filtro de média móvel. O método permite um incremento da resolução vertical, abrindo mão de uma taxa de amostragem maior.

Para o método funcionar, em um conversor analógico-digital típico é necessário que o sinal a ser amostrado possua um nível mínimo de ruído não correlacionado ao sinal demandado, que pode ser tanto inerente ao processo quanto adicionado de forma artificial.

Osciloscópios comerciais já fazem a adição do ruído necessário ao uso da técnica, independente da forma de amostragem escolhida, de modo que os dados oriundos da aquisição de um impulso por meio de um osciloscópio digital já estão prontos para o uso da técnica e oferece seu uso em seus menus de configuração.

Na maior parte dos equipamentos, entretanto, não se tem possibilidade de gradação do efeito, que vai estar em função da taxa de amostragem máxima do equipamento e do comprimento da memória demandada.

Como exemplo, o equipamento DPO4034 possui taxa máxima de amostragem de 2,5 bilhões de amostras por segundo e possibilidade de gravação e registro com comprimento de 10 milhões, 1 milhão, 100 mil e 10 mil amostras. A Tabela 1 fornece algumas configurações possíveis de serem utilizadas para ensaios de impulso. Para fins práticos, ficou definido que a configuração de 1 milhão de pontos e taxa de amostragem de 2,5 GSps é adequada aos objetivos do presente trabalho, sendo utilizada daqui em diante, embora tenham sido feitos diversos ensaios com diferentes configurações e equipamentos.

Tabela 1 - Configurações de amostragem e comprimento de gravação para ensaios de impulso atmosférico utilizando o equipamento DPO 4034

Comprimento de gravação	Tempo de Varredura	Taxa de amostragem	Resolução Horizontal	Aquisições para média
10 M	4 ms	2,5 GSps	0,4 ps	1
1 M	400 μ s	2,5 GSps	0,4 ps	1
100 k	80 μ s	1,25 GSps	0,8 ps	2
10 k	100 μ s	100 MSps	10 ns	20

O número de bits equivalentes de resolução (G_r) adicionados com o procedimento de média de uma determinada quantidade de pontos (N_{pm}) é dado por:

$$G_r = 0,5 \log_2 N_{pm} \quad (3)$$

Ao configurar o equipamento para um comprimento de gravação de cem mil amostras, há um ganho de meio bit na resolução vertical, ao custo de uma pequena queda na resolução

horizontal. Na configuração de dez mil amostras, temos um incremento de pouco mais de dois bits, que leva o osciloscópio ao patamar de um equipamento de dez bits ao custo de 20 vezes a queda na resolução horizontal, coerente com o mostrado em [37] e [38].

Esta aplicação faz com que a resolução horizontal fique acima do tempo de subida de um divisor de tensão resistivo, por exemplo, e, em muitos casos, pode impactar negativamente na detecção de pequenas oscilações advindas de possíveis descargas entre espiras.

Estudos sugerem que a frequência das oscilações geradas por uma descarga disruptiva entre espiras adjacentes de um transformador de extra alta tensão podem chegar a 2,5 MHz [4], sendo que, na medida em que a ruptura acomete um número maior de espiras ou seções, há uma queda na frequência das oscilações resultantes. É razoável supor um valor semelhante para um transformador de distribuição e, caso se considere a possibilidade de detecção de uma oscilação com frequência de 1 MHz, por exemplo, na última configuração mencionada, tem-se aproximadamente 10 pontos por período de oscilação.

Uma oscilação amortecida que dure, por exemplo, 5 períodos, teria uma duração aproximada de 50 pontos nessas condições, ou 0,5% do tempo de varredura. Ao se considerar que a amplitude dessas oscilações representa uma pequena fração da amplitude de um impulso de corrente, trata-se de um fenômeno de difícil detecção, em que uma ocorrência isolada dificilmente seria responsável pela rejeição de alguma unidade ou lote de equipamentos. Desse modo, espera-se que o dano ao dielétrico se intensifique, para que algum eventual problema possa ser devidamente diagnosticado.

Ainda são necessários estudos para dizer se um evento em que o arco gerado cessa espontaneamente, como mencionado acima, e não evolui pode realmente acontecer em campo com uma solicitação real, em decorrência de uma descarga atmosférica, com o equipamento conectado à rede de distribuição.

O gerador de impulsos como concebido tem a energia limitada pela tensão de carregamento dos capacitores e o seus valores de capacitância, e está desacoplado de alguma outra eventual fonte. Em uma solicitação real, o circuito está acoplado a uma fonte de baixa impedância e, há uma probabilidade que uma eventual descarga disruptiva entre espiras adjacentes possa evoluir para uma falha permanente e ocasionar a queima do equipamento.

Uma forma de ensaiar essas condições é a aplicação de impulsos de tensão superpostos à aplicação da tensão nominal por meio de uma fonte de baixa impedância [39]. Outra forma indireta de ensaios pode ser por meio de tensão induzida, onde é aplicada uma

tensão maior que a nominal, com uma frequência também elevada, por um determinado instante de tempo.

Ainda são necessários estudos que correlacionem a detecção dessas pequenas oscilações durante o ensaio de impulso atmosférico à falha de uma unidade em condições de campo, fazendo-se uso das técnicas, equipamentos e metodologias descritas a uma eventual falha do equipamento.

3.1 Comunicação com o osciloscópio

Para a comunicação com o osciloscópio para a aquisição das formas de ensaio, diversas maneiras são possíveis, sendo que algumas não são muito práticas. Como primeira alternativa, pode-se fazer a transferência das formas oriundas dos ensaios por meio de unidades de armazenamento USB, onde, a cada aplicação, as formas são gravadas no dispositivo por meio de arquivos CSV (comma separated value).

Nesse formato, os dados são armazenados como texto, com cada linha do arquivo representando uma aquisição e as informações de tempo e dos valores de tensão dos diversos canais do equipamento inseridas em ordem e separadas. No caso do DPO4034, o formato numérico é o americano, com as casas decimais separadas por pontos e a notação de ponto flutuante. O separador utilizado é a vírgula.

Os dados podem ser abertos em um programa de planilha, como o Microsoft Excel®. Na versão em português, como as casas decimais são separadas por vírgula, o separador padrão de um arquivo em formato CSV é o ponto-e-vírgula. Para a abertura dos arquivos de dados no programa citado, é necessária uma conversão entre os formatos por meio da ferramenta de substituição de um editor de textos, como o bloco de notas, ou fazendo uso da ferramenta de conversão integrada no Microsoft Excel®.

Nas versões posteriores do programa de planilha, há um limite de 1.048.576 linhas, o que permite trabalhar com os principais dados numéricos obtidos por meio do equipamento, haja vista que a configuração de 10 milhões de pontos não é adequada à utilização, por causa da taxa máxima de amostragem de 2,5 GSps. Entretanto, nas versões anteriores, pouco mais de 64.000 linhas eram permitidas, o que não possibilitava a abertura de arquivos com grande volume de informações.

O método de transferência por USB traz o inconveniente de não permitir a aquisição durante o procedimento de ensaio e inserir uma etapa adicional, propensa a erros. Tal método

é inconveniente e o sistema desenvolvido, apesar de permitir a abertura dos arquivos de dados vindos de um dispositivo USB não pode oferecer apenas esse tipo de transferência de dados.

O equipamento possui uma página de controle via web, denominada e*Scope e acessível por qualquer navegador de internet. Os equipamentos de outros fabricantes e modelos avaliados possuem recurso similar. Basta configurar os endereços de rede do equipamento e, a partir do momento que o mesmo está conectado à rede, acessar a página do instrumento de qualquer navegador. Pode-se pela página adquirir a tela do equipamento ou os arquivos de dados numéricos armazenados na memória do equipamento.

Apesar de conveniente o uso da página para ter acesso às configurações, o desempenho da abordagem para a aquisição de uma forma de onda com um milhão de amostras não é adequada. Vários minutos são necessários para a transferência de mais de um canal por essa abordagem, o que torna o seu uso inadequado durante um ensaio de impulso atmosférico.

A solução utilizada foi o acesso direto à memória do instrumento por meio da biblioteca TekVisa®, fornecida pelo fabricante do equipamento. Esta biblioteca permite a comunicação com o instrumento por meio de mensagens de comando, que seguem o estilo da comunicação IEEE488.

Fisicamente é necessária a ligação do cabo Ethernet e a configuração do equipamento em uma rede TCP/IP padrão, como o requerido para a comunicação por meio da página do instrumento. A biblioteca fornece uma série de funções lógicas que emulam a comunicação via GPIB, como a procura por dispositivos, a abertura de um canal de comunicações e a decodificação de uma série de mensagens, comuns a dispositivos de diversos fabricantes.

Uma alternativa à aplicação direta da biblioteca TekVisa® é o uso de um instrumento virtual IVI, a partir do software da IVI Foundation™. Trata-se de uma biblioteca que tem a proposta de ser independente do fornecedor e permite a comunicação com o equipamento, mas foi descartada por motivos de desempenho.

Junto com o pacote TekVisa®, a Tektronix fornece documentação e código-fonte exemplo para a interface por meio de código C. Também está disponível uma interface ActiveX para a comunicação em alto nível com o instrumento em linguagens que suportam essa comunicação e uma barra de tarefas pronta para a comunicação direta do equipamento com o Microsoft Word® ou Microsoft Excel®.

A biblioteca de comunicação desenvolvida para a aquisição das formas de impulso teve com base os códigos-exemplo fornecidos com a biblioteca em C e a documentação. O procedimento é estabelecer um canal de comunicação e mandar uma série de comandos ao

dispositivo, adquirindo a cada solicitação os valores de tempo inicial, incremento de tempo, offset da tensão, multiplicador de tensão, o número de amostras e, por fim, um vetor com as informações dos valores de tensão com o comprimento especificado e os valores representados por um número inteiro codificado com sinal.

Com os dados brutos da memória, é necessária uma conversão para números em ponto-flutuante a serem utilizados pelo programa, com os dados adquiridos. A alocação de memória e as conversões devidas foram implementadas por meio da biblioteca elaborada. A mesma se apresenta como uma interface DLL, onde estão disponíveis funções pertinentes que podem ser chamadas para a aquisição dos dados, fornecendo-se o endereço do instrumento e o número do canal. A biblioteca desenvolvida pode ser chamada por meio da linguagem C# por meio do "*pinvoke*", que é a interface entre um código nativo, como o desenvolvido, com o restante do código do programa, desenvolvido para a plataforma .NET.

Com o desenvolvimento da biblioteca, houve um enorme ganho de desempenho na aquisição dos dados da memória do equipamento. Pode-se adquirir em poucos segundos as informações dos canais referentes à tensão e corrente em uma única etapa, sendo que a operação anteriormente levava cerca de 2 minutos e devia ser feita canal a canal, de forma trabalhosa.

Também permite a implementação futura do monitoramento do status do dispositivo e a aquisição automática das formas do impulso, bem como o ajuste das opções de configuração do dispositivo e o auxílio ao processo do ajuste de tempos de frente e cauda da onda.

Os arquivos CSV gerados pelo osciloscópio para o armazenamento das formas dos impulsos não são uma forma eficiente de armazenamento das informações provenientes do ensaio. Ao se utilizar os menus do equipamento para se armazenar os dados nesse formato, apenas é possível o armazenamento de um canal por arquivo.

Os valores sucessivos de tempo e tensão são escritos linha a linha, na forma de um número decimal, codificado em ASCII. Para um impulso de 1 milhão de pontos, tamanho definido como o necessário para o processamento das informações, o arquivo CSV tem o tamanho aproximado de 15 a 17 megabytes. O armazenamento de dois canais demandaria, portanto, o dobro do espaço em disco.

Considerando que são efetuadas diversas aplicações impulsivas em cada bucha do transformador, um ensaio completo demanda centenas de megabytes de armazenamento nesse formato. Um laboratório que efetue dezenas de ensaios por mês rapidamente esgotaria a capacidade de armazenamento de um disco rígido, o que traria problemas, demandando toda uma logística para se permitir auditar os dados regressos com confiabilidade.

A ineficiência dessa forma de armazenamento também se mostra nas operações de carregamento e salvamento dos impulsos, que demandam operações de leitura e escrita de grande volume de informações. Um formato compacto, mesmo que demande mais processamento para essas operações, traria mais velocidade.

Desse modo, em adição às rotinas de comunicação, foram implementadas rotinas de armazenamento e extração de dados de um formato mais compacto, que tem por base o formato de dados entregue pela biblioteca do equipamento.

Essas rotinas geram e recebem um formato binário de dados que contém o comprimento da gravação, os valores iniciais e incremento para os vetores de tempo, os valores iniciais e de incremento para os vetores de tensão, e os vetores de dados, de 8 bits tanto para o canal de tensão quanto para o canal de corrente.

Apenas com o armazenamento binário, em detrimento à codificação decimal em um arquivo ASCII já é possível um grande ganho de espaço de armazenamento e velocidade nas operações de leitura e escrita dos arquivos.

Para o código final, adicionalmente, o fluxo de dados binário é submetido a uma compressão com o uso da biblioteca "zlib", que é responsável por compactar o fluxo de dados sem a perda de informações. A biblioteca utilizada é de código aberto e de domínio público, sendo facilmente encontrada na internet e é incluída em diversos programas e formatos de arquivo.

Com todas essas modificações, um arquivo de 450 kb em média consegue armazenar tanto os impulsos de tensão quanto os de corrente referentes a um ensaio, possibilitando um ganho de espaço de mais de 70 vezes na maioria dos casos e viabilizando o armazenamento dos dados brutos, o que facilita a auditoria do sistema.

As ferramentas de conversão de/para o formato binário foram desenvolvidas em MATLAB® e em C, visando à incorporação no programa. No caso dos dados já estarem disponíveis em formato CSV, são feitas verificações para assegurar que todos os dados de entrada podem ser representados por meio de um valor inteiro de 8 bits, requisito para o processo de armazenamento/compressão.

4 Resultados e detalhes da implementação do programa de análise

A Figura 16 sintetiza, em linhas gerais, o procedimento de análise do software desenvolvido. Ele avalia basicamente dois tipos de não conformidades, aqui denominadas análise de amplitude e análise de frequência.

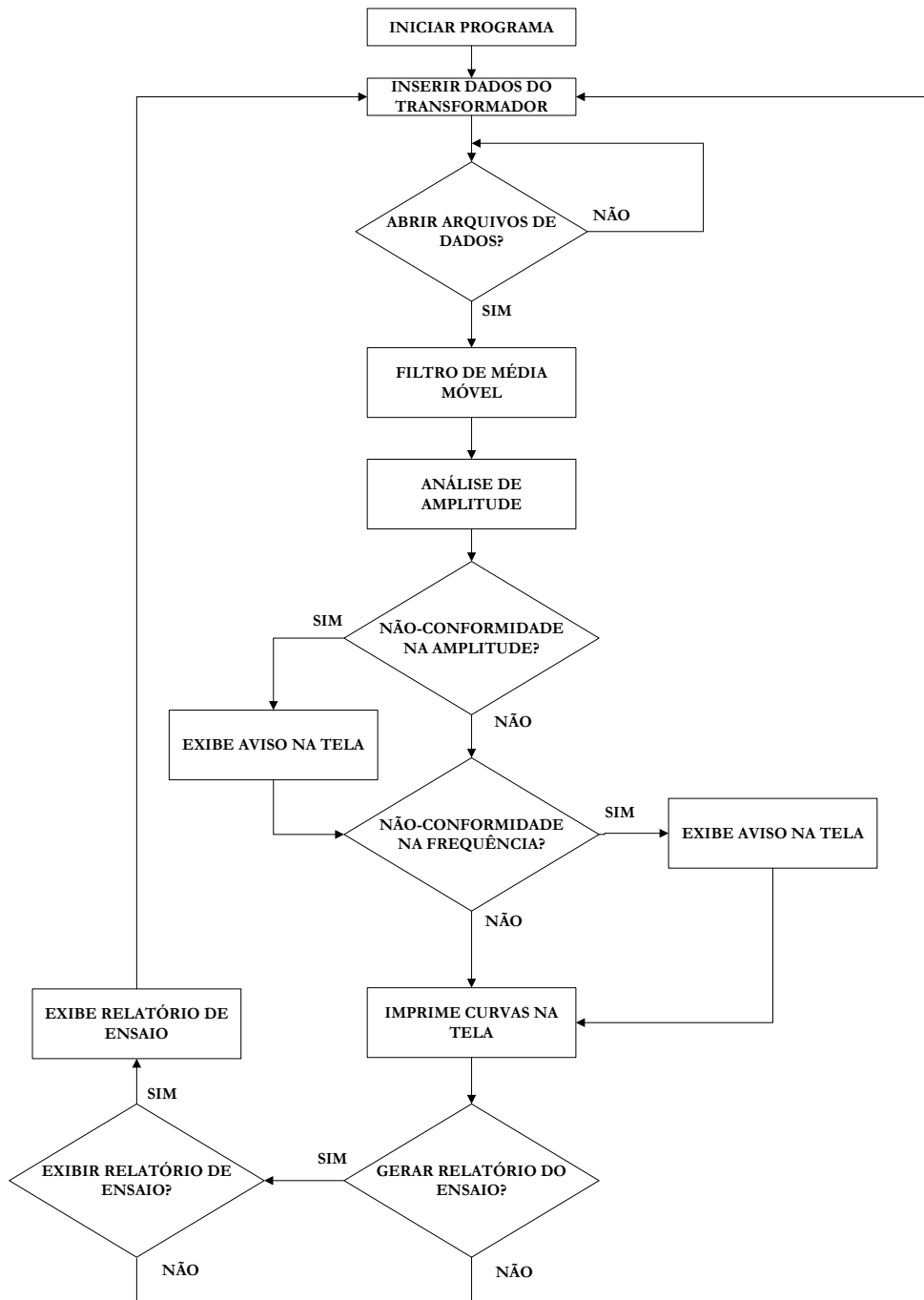


Figura 16 - Fluxograma geral do sistema desenvolvido.

O programa também contempla um cadastro de transformadores, onde os principais dados do equipamento podem ser inseridos, armazenados e consultados. Propicia maior organização das informações e facilidade de consulta/auditoria, haja vista que todos os resultados de ensaio estão associados ao cadastro do transformador.

Para o desenvolvimento, um esqueleto foi elaborado em MATLAB®, para agilizar a aplicação da metodologia, enquanto que o resultado final foi implementado por meio da linguagem C#, fazendo-se uso do Visual Studio e a plataforma .NET, da Microsoft©.

4.1 Pré-processamento das informações dos impulsos

A aquisição dos dados do osciloscópio deve ser seguida de uma sequência de operações, de modo a aumentar a resolução vertical, reduzir ruídos e fazer uma checagem dos principais parâmetros da forma de onda resultante.

4.1.1 Filtragem e decimação

Como descrito nas seções anteriores, um grande volume de dados provenientes do osciloscópio está disponível, no entanto, imerso em um determinado nível de ruído e carente de resolução vertical para a correta análise dos dados. Uma filtragem seguida de decimação é feita para a redução do ruído proveniente da forma dos impulsos, adequação da quantidade de pontos a serem analisados e aumento da resolução vertical.

O filtro escolhido deve possuir características passa-baixas e uma frequência de corte inferior à frequência de Nyquist para a taxa de amostragem desejada após a decimação. Desse modo evitam-se efeitos de vazamento espectral, ou "*aliasing*".

Uma análise harmônica com a aquisição de amostras durante um longo tempo mostrou que a maior parte da componente do ruído nos circuitos de medição de tensão e corrente, nas frequências demandadas, é o ruído branco introduzido no processo de medição pelo osciloscópio. Apresenta, portanto, uma distribuição de probabilidade aproximadamente Gaussiana, com desvio padrão próximo ao valor de um bit menos significativo.

O filtro considerado ótimo para a remoção de um Ruído Gaussiano é um filtro de médias, cujo comportamento no domínio da frequência regido pela expressão em (4), onde M é o tamanho da janela do filtro, mostrada em [40] que também traz a resposta em frequência da Figura 17:

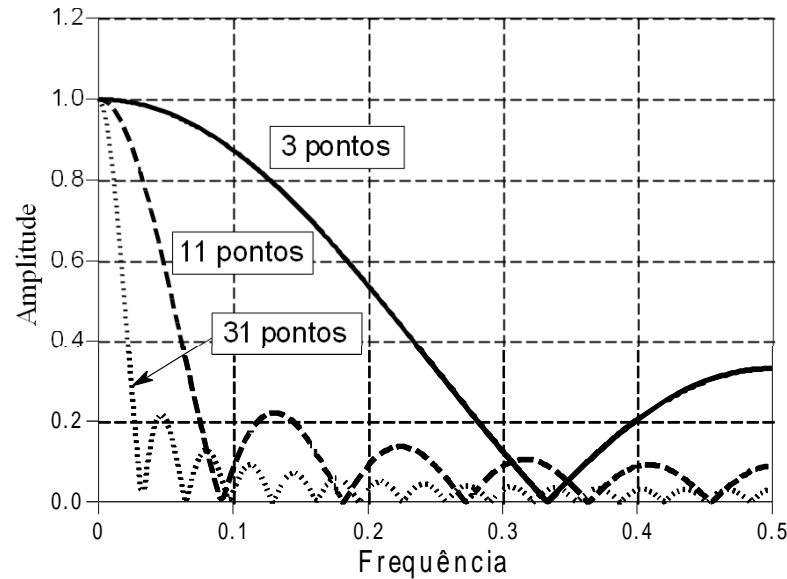


Figura 17 - Resposta em frequência do filtro de média para diferentes tamanhos de janela, adaptado de [40].

$$H[f] = \frac{\sin(\pi f M)}{M \sin(\pi f)} \quad (4)$$

Existem outros filtros que cumprem esta tarefa, como os clássicos de Chebychev, Butterworth, Elíptico ou filtros não lineares, como o de mediana [41]. O comportamento no domínio da frequência é suave, longe do comportamento de um filtro ideal. O uso de muitos pontos para o filtro de médias é inadequado para um ensaio de impulso, porque pode provocar a atenuação das respostas em alta frequência associadas às descargas disruptivas entre espiras, por exemplo.

Uma decimação pode ser seguida de um filtro de médias sem prejuízo à análise das ondas de impulso e com um ganho de resolução regido pela expressão vista anteriormente, desde que se escolha adequadamente o número de pontos do filtro de médias e o fator de decimação para não atenuar o comportamento desejado. Em alguns casos, um conjunto de filtros e/ou processos de decimação podem ser utilizados, mediante ensaios.

Foram avaliadas diversas combinações de filtros para o pré-processamento. A Figura 18 mostra uma das avaliações feitas com uma forma de corrente real extraída de um transformador com indicativos de falhas. A amostra veio a falhar em aplicações posteriores de tensão.

Optou-se pela utilização de um filtro de médias, na etapa inicial pelo seu desempenho satisfatório e rapidez de execução, embora ainda sejam necessárias mais análises e estudos, em particular envolvendo um equipamento com maior resolução, de modo a fim de validar os experimentos e extrair o melhor rendimento dessa etapa do processo.

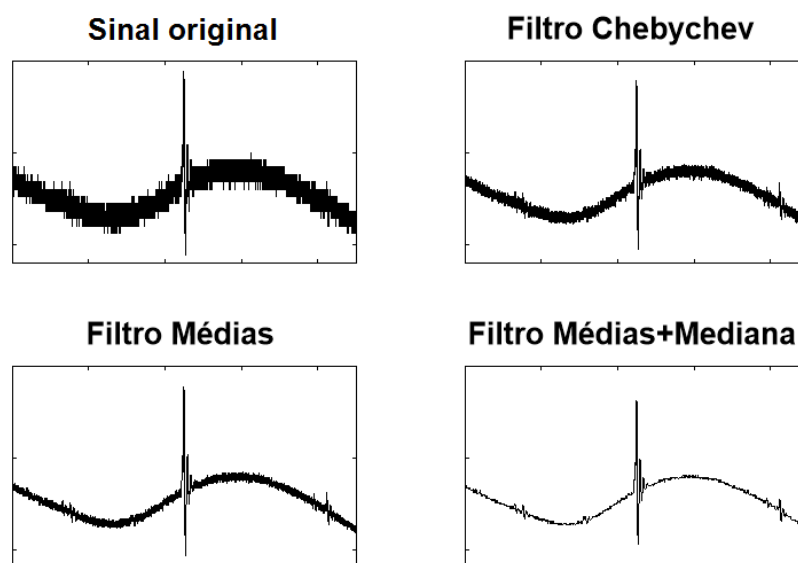


Figura 18 - Diversos tipos de filtros e seus efeitos em uma forma de corrente.

Apesar de visualmente apresentar um bom desempenho, é necessária uma análise minuciosa do comportamento do filtro de medianas para assegurar seu uso, em virtude do seu comportamento não linear. Os resultados obtidos com o filtro de média permitiram obter pouco mais de um bit de incremento na resolução vertical efetiva, com efetiva minimização do ruído indesejado associado às formas.

4.1.2 Determinação da amplitude, tempo de frente e cauda do impulso

Após a filtragem inicial, uma etapa necessária ao processamento do sinal é a determinação da sua amplitude. A amplitude de um sinal de tensão registrado pelo sistema de medição e o conhecimento da relação de divisão de tensão fornece o nível de impulso aplicado. A determinação do nível de tensão impulsiva é feita de forma indireta, pois na primeira aplicação não se sabe de antemão qual vai ser o nível de tensão aplicada.

Uma estimativa pode ser feita em função da tensão de carregamento dos capacitores e o rendimento típico do gerador para o equipamento a ser ensaiado. Após a primeira aplicação, as tensões a serem aplicadas podem ser determinadas diretamente em função da tensão de carregamento dos capacitores, assumindo a linearidade do circuito de ensaio.

As primeiras aplicações de tensão se destinam também ao ajuste dos tempos de frente e cauda característicos dos impulsos, onde se ajusta o gerador para a aplicação de um nível

baixo de tensão, inferior à metade da TSNIA, onde são medidas além da amplitude, o tempo de frente e o tempo de cauda.

Conforme mostrado na Figura 1, o tempo de frente (T_f) é uma relação do intervalo de tempo entre dois pontos, sendo o primeiro referente a 30% da amplitude (T_{30}) e o segundo referente a 90% da amplitude (T_{90}). Os valores de referência foram escolhidos de modo a se atingir a porção linear da característica e ao mesmo tempo ser insensível às oscilações devidas à existência de indutâncias e capacitâncias parasitas, existentes nos circuitos de ensaio. Desse modo, resulta:

$$T_f \cong 1,67(T_{90} - T_{30}) \quad (5)$$

Os pontos de referência permitem a determinação de uma reta de tendência para a primeira parte da forma em dupla exponencial. A extrapolação da reta permite a determinação de dois pontos, sendo o primeiro uma origem virtual, e o segundo o ponto de máxima amplitude. A origem virtual é utilizada na determinação do tempo de cauda (T_c), que é definido como o intervalo de tempo delimitado pelo ponto de amplitude de 50%, posterior ao pico (T_{50}) e o ponto de origem virtual (T_O). Assim:

$$T_c = T_{50} - T_O \quad (6)$$

A determinação da amplitude pode ser feita a princípio tomando-se o maior valor da onda de tensão, varrendo-se todo o vetor em busca do maior valor. Esse procedimento pode acarretar dois problemas, sendo o primeiro um pequeno offset em corrente contínua, que deve ser subtraído dos instantes iniciais. Já o segundo é referente à presença de sobre-elevação da tensão ou ruído excessivo nos dados, que pode fazer com que a amplitude obtida com o procedimento mencionado se torne superior a real, podendo levar a aplicação de menores solicitações que o previsto ao equipamento quando se usa o valor determinado como referência.

A presença de um nível em corrente contínua pode ser amenizada, haja vista que é usual o ajuste da posição horizontal do "trigger" - disparo do equipamento em 10% do comprimento total de aquisição. Isso implica que estão disponíveis antes do ponto de disparo, que serve de referência para o início da escala de tempo para o equipamento, 10% do comprimento total, de modo que a aquisição realmente começa em instantes anteriores ao disparo. Uma média com base nos instantes iniciais sem a excitação permite determinar o

nível em corrente contínua, que pode ser subtraído de todos os pontos posteriormente, de modo a compensar a componente contínua.

A presença de ruídos ou sobre-elevação pode ser equacionada com uma filtragem mais rigorosa do sinal de tensão de entrada. Esse procedimento só deve ser utilizado na determinação da amplitude e dos tempos característicos, e é imprescindível que não ocorra distorção significativa dos parâmetros citados. É característica do filtro de médias o atraso em subidas íngremes, bastando observar que a resposta a um degrau unitário para este filtro é uma rampa linear com duração proporcional ao tamanho da janela, ou seja, o número amostras utilizadas para a média.

Uma abordagem promissora para a filtragem nesses casos é a utilização de aproximações por meio de funções polinomiais, onde é definida uma janela e uma ordem de aproximação polinomial. Os coeficientes do polinômio são ajustados para cada janela e a mesma move-se sucessivamente até cobrir toda a massa de dados. A generalização desse procedimento é dada por meio de uma família de filtros denominada Savitzky-Golay. A Figura 19 mostra o resultado obtido com a técnica.

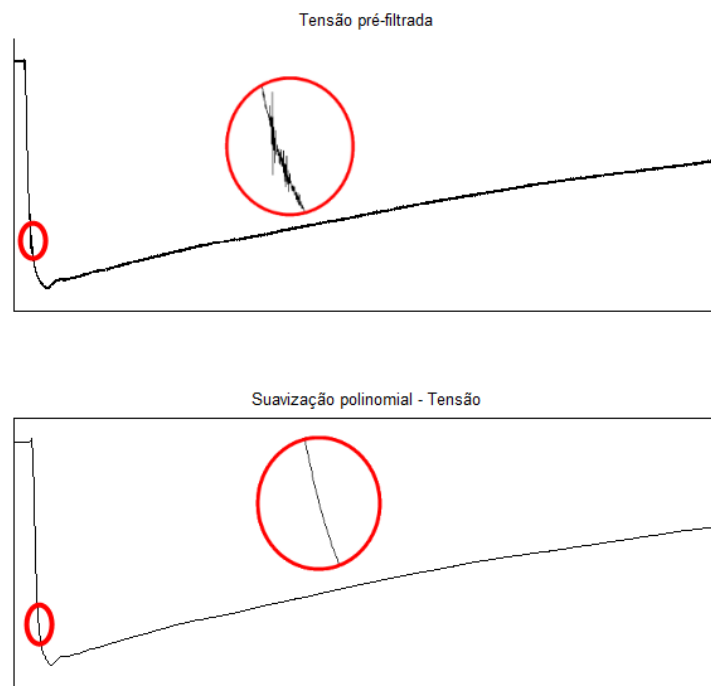


Figura 19 - Utilização de suavização polinomial para a determinação da amplitude, tempo de frente e tempo de cauda,

Com uso da suavização polinomial, com parâmetros adequados, pode-se utilizar o método simplificado para a determinação do valor de amplitude, para todos os fins práticos

nos impulsos obtidos nos dois laboratórios utilizados para os ensaios mostrados nessa dissertação. Dependendo do nível de sobre-elevação de tensão, pode ser necessário um procedimento adicional, pelo ajuste de uma função exponencial, por meio de, por exemplo, o algoritmo de Levenberg-Marquardt [42], que possui detalhes de aplicação em [29].

A partir da forma filtrada e do nível de máxima amplitude fica fácil a determinação do tempo de frente, bastando encontrar os índices dos pontos de 30% e 90% da amplitude e calcular o tempo por meio da relação apresentada anteriormente, sabendo-se que o incremento de tempo é fixo. O ponto de 50% também é facilmente detectável, bastando-se percorrer os instantes posteriores ao ponto de amplitude máxima. Dessa forma também é possível determinar o tempo de cauda.

O ponto de 30% também é adequado às correções em decorrência de desvios de trigger, que podem ocasionar diferentes bases de tempo e o uso de referências de tempo diferentes, que pode dificultar o procedimento de ajuste das formas feito posteriormente.

A Figura 20 exemplifica o descrito, mostrando a discrepância entre as referências de tempo ao longo das aplicações e o seu efeito sobre as formas de tensão e corrente. O observado é ocasionado em grande parte pelo ajuste inadequado do nível de "*trigger*" ou a presença de ruídos próximos ao nível escolhido. Com a correção por meio da filtragem, o ajuste das bases de tempo pode ser feito de forma externa, posteriormente ao ensaio.

Diversos ensaios foram realizados, com medições da amplitude, tempo de frente e tempo de cauda feitas de forma manual, com o uso de cursores de medição no osciloscópio, e de forma automática, com o uso das técnicas de filtragem e o algoritmo pertinente.

Houve concordância dos valores, dentro da resolução permitida pelos cursores, dos valores lidos manualmente e obtidos por meio do algoritmo. Posteriormente, houve uma adequação da metodologia adotada para aplicação em ensaio de isoladores, como o ensaio de determinação da tensão disruptiva de impulso atmosférico – U50% (Up & Down) e a determinação da curva U-T, o que permitiu a validação do procedimento em várias centenas de aplicações, com os mesmos resultados positivos.

A determinação dos parâmetros básicos referentes ao impulso e a comunicação com o osciloscópio permite a sugestão automática das escalas para a forma, e a detecção de problemas de ceifagem do impulso por ajuste inadequado de "*offset*". O fornecimento adicional de informações referentes ao gerador de impulsos, como tensão de carregamento, configuração de ligação e o valor dos resistores de frente e cauda permite a sugestão de um valor ótimo para a obtenção dos tempos de frente e cauda especificados [43], dentro da margem de tolerância.

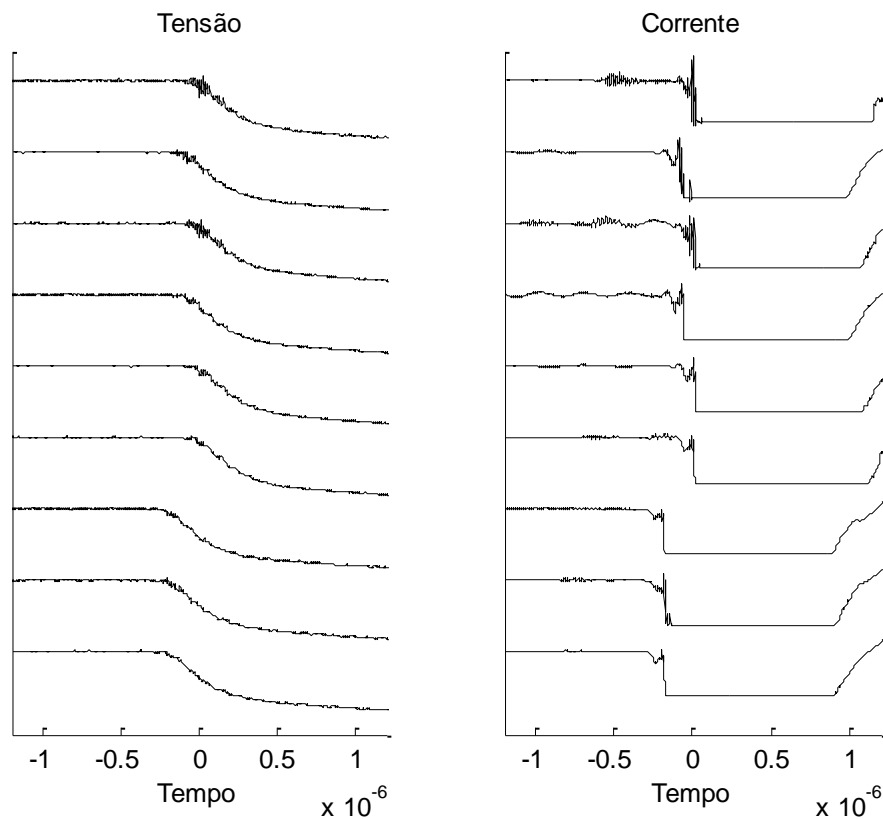


Figura 20 - Resultado de um EIAE, evidenciando diferentes referências de tempo durante o ensaio.

O fornecimento dessas informações também permite a sugestão de valores apropriados para uso de um shunt de corrente e da tensão de carregamento necessária para a obtenção dos valores de amplitude especificados, reduzindo o tempo necessário para esses procedimentos e a possibilidade de problemas em virtude de equívocos nas estimativas desses parâmetros. São funcionalidades previstas para uma versão futura do sistema.

4.2 Ajuste das formas de tensão e corrente

Após o pré-processamento e a definição das principais características do impulso, como amplitude, tempo de frente e cauda e o ajuste da referência de tempo, a próxima etapa é o ajuste dos impulsos de tensão e corrente e a detecção de possíveis não conformidades grosseiras, como uma descarga disruptiva para a carcaça, por exemplo. Têm-se nessa etapa um conjunto de vetores, ajustados no tempo, com os valores de tensão e corrente referente às diversas aplicações, assim como o registro das amplitudes das formas subsequentes.

A primeira etapa é a normalização da amplitude de um impulso de referência, escolhido como a aplicação de menor amplitude e válida, isto é, com os tempos de frente e

cauda compatíveis com o restante das aplicações válidas. Isso corresponde à primeira aplicação após os ajustes iniciais e representa a menor solicitação imposta ao equipamento, servindo de referência para as próximas aplicações.

Em casos mais graves é possível detectar anomalias já nessa aplicação, o que não impede o uso desse impulso com menor amplitude como referência, já que qualquer não conformidade vai aparecer em tempos diferentes nas sucessivas aplicações em função dos diferentes níveis de tensão aplicadas.

A normalização pode ser feita com a divisão do impulso pela amplitude medida, fazendo com que a forma passe a ter amplitude unitária. Vale mencionar que esse procedimento não é necessário para a análise dessa seção, mas é útil para as análises posteriores, por meio da definição de uma referência única que independe do nível de tensão aplicada, para a discriminação de oscilações sutis.

As formas devem ser comparadas duas a duas, sendo que sempre são comparadas com a aplicação de referência. Como a forma de tensão é ajustada de modo a não saturar o canal do equipamento de medição, é a referência de amplitude, sendo o impulso de corrente ajustado com base nesta mesma referência, haja vista que se exige que o sistema seja linear para a aceitação da amostra.

O procedimento descrito não é adequado para equipamentos que possuam comportamento não linear, como os transformadores em que o projeto prevê a inclusão de resistores não lineares, visando à proteção de seções do enrolamento contra a disrupção.

No caso de equipamentos que podem possuir pronunciados efeitos de polarização e/ou saturação, como transformadores a seco, devem-se efetuar procedimentos adicionais para minimizá-los ou levar isso em consideração nas análises. Alternativamente podem-se comparar as aplicações com apenas os mesmos níveis de tensão.

A adequação das amplitudes é feita por meio do método dos mínimos quadrados. Pensando-se em X_1 como a onda de referência, tenta-se ajustar X_2 , que representa a onda a ser ajustada, por meio da seguinte relação:

$$X_2 = aX_1 + b \quad (7)$$

Onde a e b são constantes a serem determinadas. Em função do ajuste de "offset" descrito na seção precedente, a constante b tem valor insignificante perante a constante a e, em muitos casos, pode ser omitida do ajuste sem problemas. Após o ajuste, faz-se uso das constantes de modo inverso para a normalização de amplitude, isto é:

$$X_{2adj} = \frac{X_2 - b}{a} \quad (8)$$

A forma X_{2adj} refere-se à utilizada para o ajuste. As constantes a e b determinadas por meio dos impulsos de tensão são utilizadas para o ajuste das formas de corrente correspondentes. A Figura 21 ilustra o procedimento de ajuste para ondas de tensão. Após o ajuste, pode-se definir um impulso de diferenças, isto é:

$$X_{diff12} = X_1 - X_{2adj} \quad (9)$$

Os valores de X_{diff12} representam a parcela não ajustada entre as formas X_1 e X_2 . Os vetores possuem medições anteriores à aplicação de tensão, que correspondem a aproximadamente 10% dos pontos disponíveis para a medição. Esses valores são importantes para se definir o critério de análise do ajuste.

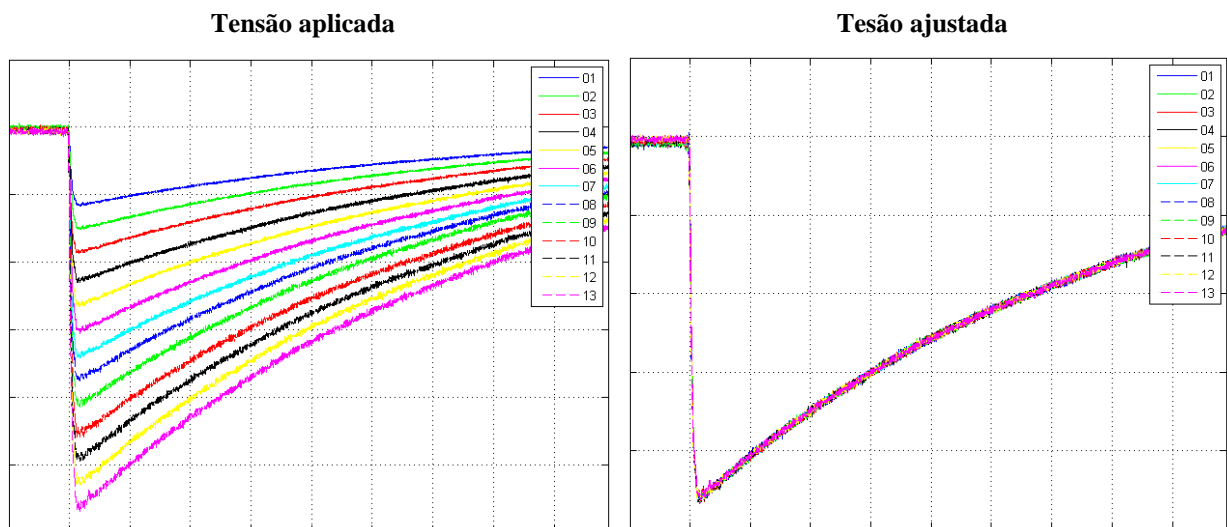


Figura 21 - Aplicação do método dos mínimos quadrados para o ajuste das formas de tensão.

Montando-se um histograma da parcela referente aos instantes iniciais de X_1 , X_2 e X_{diff12} , pode-se perceber um comportamento semelhante, isto é, uma distribuição aproximadamente normal, discretizada em função da finita resolução vertical.

A diferença de duas funções com distribuição normal também é uma distribuição normal, caracterizada por diferentes valores de média e desvio padrão. Dessa forma, os instantes iniciais são uma boa métrica do nível de desajuste da forma do impulso e pode-se

assumir que o desvio padrão dos instantes iniciais da parcela não ajustada é semelhante ao desvio padrão das parcelas posteriores.

Em função de pequenos desajustes das referências de tempo, tomam-se para a análise, os instantes posteriores a acomodação da maior parcela transitória dos impulsos, isto é, posterior a aproximadamente 1 ou 2 μs .

A metodologia descrita permite a discriminação de descargas disruptivas e pequenas descargas que impactam na redução da parcela indutiva da onda com concordância com as análises manuais, para todos os casos observados durante o período de validação e comissionamento dos procedimentos/programa.

Este é um método simples, rápido e eficaz para esse tipo de análise e totalmente compatível com a norma para efetuar o procedimento e é o bloco responsável pela detecção de anomalias de amplitude no fluxograma, pois advêm da análise de amplitude fornecida pelo método dos mínimos quadrados. O método também não faz uso de constantes arbitrárias, independentemente do dispositivo de medição e dos níveis de tensão aplicados.

4.3 Detecção de pequenas não conformidades nas formas de tensão e/ou corrente

Caso não seja possível detectar alguma não conformidade por meio do ajuste das formas com o uso do método dos mínimos quadrados e seja possível a sobreposição das formas em boa parte do intervalo, torna-se necessário uma investigação mais minuciosa do comportamento dos impulsos de tensão e corrente em busca de pequenas oscilações, características de descargas disruptivas entre espiras ou entre pequenas seções do enrolamento. O procedimento que vai ser descrito tenta solucionar essa questão e mostrou-se efetivo nos testes realizados.

Para tanto, basta observar que a forma de diferenças, definida na seção anterior, acumula todos os eventuais problemas associados e também o ruído inerente às duas formas que estão sendo comparadas, conforme mostrado na Figura 22. Supondo um processo Gaussiano, o ruído obtido na função de diferenças (R_d) é dado por:

$$R_d = \sqrt{R_1^2 + R_{2adj}^2} \quad (10)$$

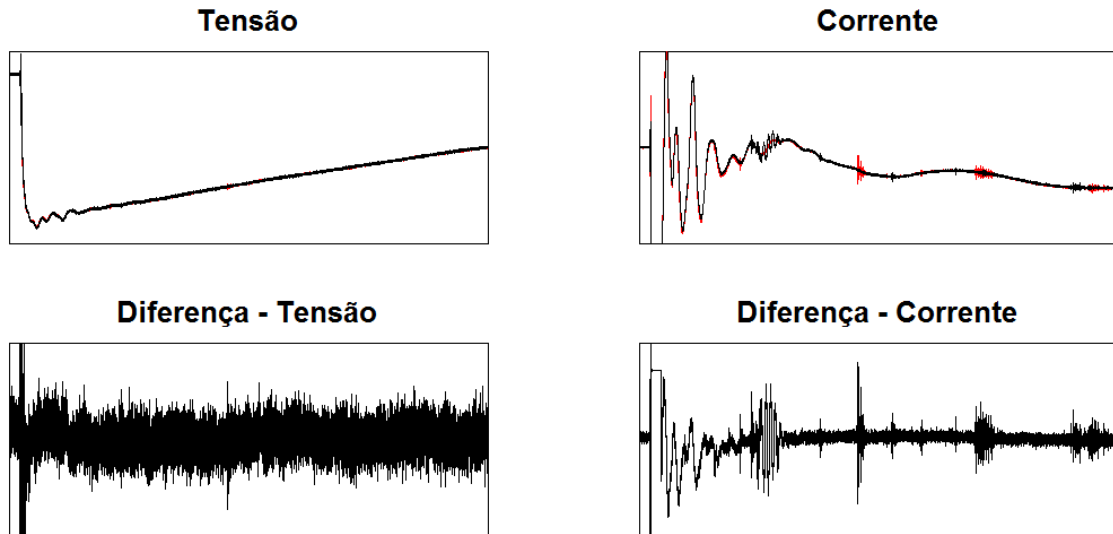


Figura 22 - Superposição das ondas de tensão e corrente e suas funções de diferença.

Onde R_1 é devido ao primeiro impulso e R_{2adj} é devido à segundo impulso ajustado. Como há um acréscimo do nível de ruído, a técnica a ser utilizada na análise precisa ser sensível para detectar possíveis oscilações imersas em um ruído, com amplitudes compatíveis entre o ruído e as oscilações, como se pode observar nas formas das diferenças no exemplo mostrado. Uma técnica que se mostra adequada ao propósito é o uso da Transformada Wavelet para a detecção e avaliação.

Os instantes iniciais não devem ser analisados por meio da equação de diferenças, pois desvios na referência de tempo, associada à alta taxa de variação da tensão e corrente nesses instantes iniciais faz com que a forma das diferenças possua correlação com o sinal aplicado, não apenas com os desvios necessários à análise.

Porém este processo é adequado à análise nos instantes posteriores, haja vista que praticamente não há um nível contínuo nos instantes finais. A dificuldade de detecção de oscilações nas formas de tensão é notável, e dificilmente pode-se de modo isolado afirmar que há a presença de uma oscilação em qualquer ponto da forma de tensão dado o nível de ruído de fundo.

O nível de ruído associado após os processos mencionados pode ser reduzido, em face das suas propriedades estatísticas. A Figura 23 sintetiza essas informações e foi obtida com o software MINITAB®, com o a opção “*Graphical Summary*”, para a forma das diferenças de tensão mostrada na Figura 22.

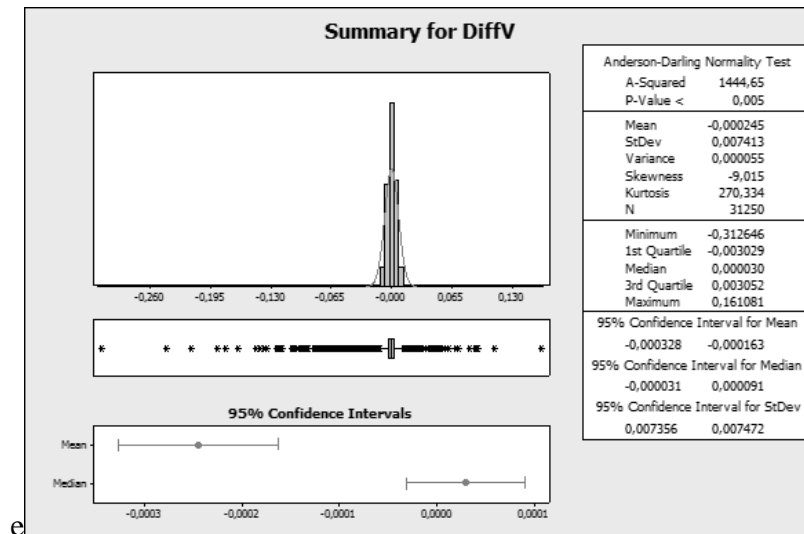


Figura 23 - Sumário para a curva de diferenças de tensão mostrada anteriormente.

Os dados de tensão utilizados para a obtenção da curva de diferenças foi previamente normalizado, possuindo amplitude unitária. Pode-se observar, pela mediana (0,000030) que o procedimento proposto consegue ajustar adequadamente os valores, possuindo mediana várias vezes menor que o desvio padrão (0,07413).

A mediana é uma métrica melhor que a média nesse caso, já que foi utilizado todo o vetor de diferenças e não apenas a parte estacionária. A média é menor que a maior resolução possível de ser obtida, caso fosse utilizado todo o range do conversor analógico digital de 8 bits ($1/256=0,003906$). O desvio padrão está compatível com o fenômeno de incremento do ruído mostrado anteriormente.

A redução de ruídos inicial pode ser feita com base em um filtro de médias, com tamanho pequeno de janela e as oscilações dos instantes iniciais podem ser reduzidas com base em um filtro passa-altas. A Transformada Wavelet permite o uso simultâneo dos dois mecanismos e ainda oferece uma forma conveniente de detectar as oscilações requeridas.

A Figura 24 mostra o sinal de corrente, e sua decomposição em cinco níveis diferentes, utilizando a onda mãe "haar". A oscilação mostrada possui traços em todos os níveis de decomposição. Nota-se também que as decomposições mantêm o mesmo padrão nos instantes em que não há oscilações com relação aos instantes de estado estacionário, antes do início da aplicação da tensão.

Uma importante propriedade da decomposição por esse tipo de onda mãe é que um sinal com distribuição normal tem todas as suas decomposições e aproximações também seguindo a mesma distribuição. A Figura 25 mostra o resultado da decomposição de um sinal

sinfético que segue a distribuição normal em cinco níveis, por meio da onda-mãe "haar", como descrito anteriormente.

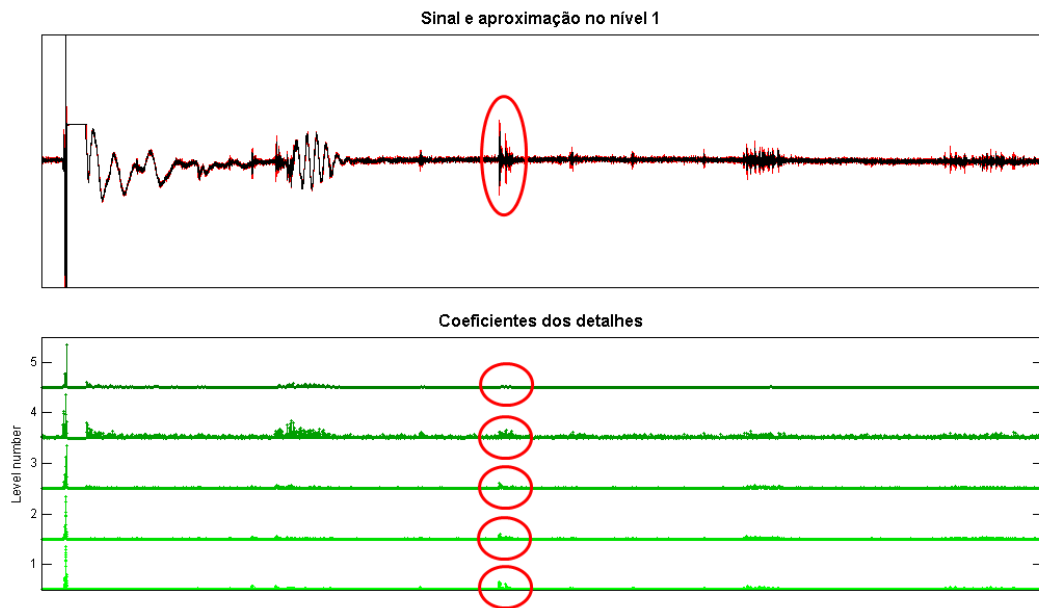


Figura 24 - Decomposição do sinal de diferenças por Wavelet, evidenciando o comportamento da oscilação.

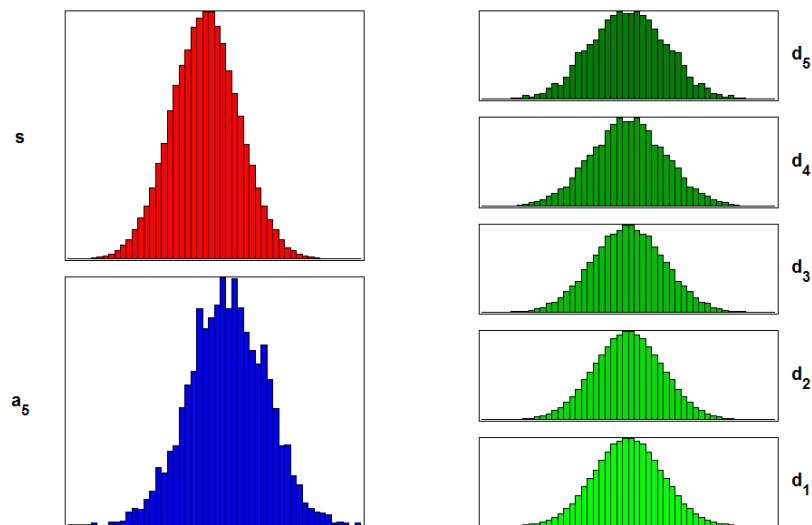


Figura 25 - Histograma da decomposição Wavelet de um sinal que segue distribuição normal em 5 níveis.

Nesta figura, s se refere ao sinal original, a_5  quinta aproximação e d_x ao detalhe x , sendo que foram mostrados os cinco primeiros detalhes. Repare que todos seguem a distribuição normal, e o formato do histograma  sucessivamente degenerado  medida que os vetores vão diminuindo de tamanho, por efeito das sucessivas decimações inerentes à decomposição.

Todas essas características podem ser convenientemente utilizadas na detecção das possíveis oscilações e nas escolhas dos níveis de detecção. A parte estacionária da forma

fornece os níveis de ruído esperados nas partes posteriores e, a presença de um sinal acima do maior nível de ruído esperado pode indicar a presença de uma oscilação. Como as oscilações também se apresentam em diversos detalhes simultaneamente pode-se efetuar o mesmo procedimento nos detalhes subsequentes, observando-se a presença de possíveis não conformidades, com a detecção em diversos níveis reforçando o nível de confiança do procedimento.

Ao fim, pode-se utilizar o mesmo procedimento para os impulsos de tensão e a presença simultânea de oscilações, tanto as formas de tensão quanto as de corrente, dão um forte indicativo de falhas no equipamento sob ensaio. Pode-se, portanto, alertar ao usuário sobre a ocorrência dessas oscilações, por exemplo, por meio de setas, como na Figura 26, que mostra uma das primeiras verificações do procedimento, que subsidiou a criação do programa nos moldes do descrito acima, ajustado para a detecção após os instantes iniciais da onda. Detalhes da versão final do programa são mostrados no Anexo A.

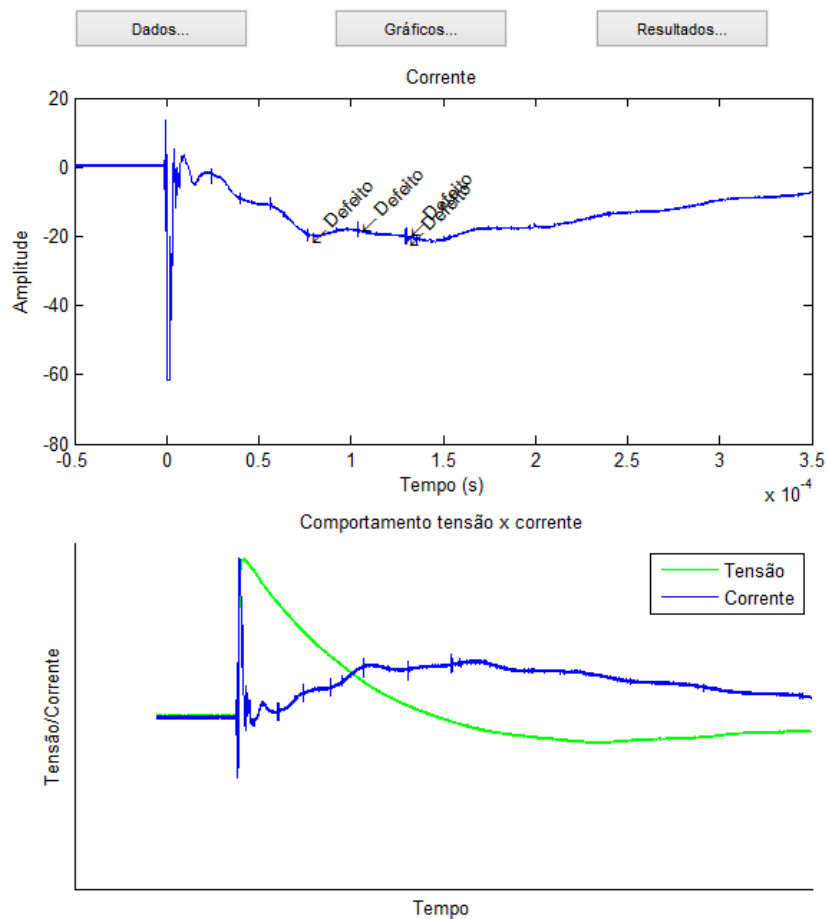


Figura 26 - Versão de ensaio do software, com destaque ao algoritmo de detecção de oscilações.

5 Considerações finais

O uso de divisores de tensão resistivos, em detrimento aos divisores capacitivos compensados, traz maior sensibilidade na detecção de possíveis falhas de menor impacto nas formas de tensão, como, por exemplo, a falha de isolamento entre espiras adjacentes em um transformador de distribuição submetido ao ensaio de impulso atmosférico. Ao se aliar o uso de um divisor resistivo às técnicas de melhoria da resolução vertical, torna-se possível em alguns casos ter a certeza que algum “*hash*” contido em um oscilograma de corrente corresponda efetivamente a uma falha real na amostra ensaiada.

Os shunts resistivos de corrente devem ser utilizados, quando possível, em função da sua maior sensibilidade na detecção de oscilações, em virtude da sua maior largura de banda. O circuito completo de medição deve ser cuidadosamente construído para não vir a exceder os estágios de entrada do instrumento de medição, mas ao mesmo tempo manter as características positivas inerentes ao uso do mesmo em detrimento a outro transdutor de corrente.

Osciloscópios de 8 bits são adequados aos propósitos da avaliação das formas de tensão e corrente oriundas dos ensaios de impulso atmosférico e, com o devido processamento de sinais, pode atingir uma resolução vertical próxima dos 10 bits. Oferecem estágios de entrada robustos e diversas opções de configuração, o que os torna extremamente flexíveis e confiáveis.

Entretanto, em virtude das características inerentes ao equipamento é conveniente o uso de um software específico para a aplicação em ensaios de impulso atmosférico como o proposto, necessitando o mesmo ser cuidadosamente elaborado, de modo a realçar as possíveis não conformidades. Nesse caso é necessária uma padronização nos métodos e procedimentos visando maior comparabilidade dos resultados obtidos com as soluções eventualmente disponíveis e o amplo uso das mesmas.

O ensaio de impulso atmosférico escalonado permite resultados conclusivos sobre a suportabilidade da amostra perante impulsos atmosféricos, de modo semelhante ao processo normalizado, sem envolver a aplicação de impulsos com a forma cortada. Dessa forma, evita-se a discussão sobre a análise de formas cortadas e a impossibilidade de corte no mesmo instante de tempo. Também facilita a análise de forma algorítmica dos resultados, pois não é necessária compensação dos tempos de corte e, ao mesmo tempo, permite ver a progressão de uma falha degenerativa, dando mais credibilidade a avaliação de falhas de menor severidade.

A rotina de comunicação com o osciloscópio desenvolvida torna mais ágil a transferência de informações referente às formas de tensão e corrente, viabilizando a aquisição e análise das formas de impulso em tempo real. Também possibilita o monitoramento do status do instrumento e o envio e a conferência de seus parâmetros de configuração, auxiliando a tarefa do operador e permitindo a prevenção de erros grosseiros.

O formato de arquivo de impulso possibilita o armazenamento dos dados brutos oriundos do osciloscópio, com grande economia do espaço de armazenamento em comparação com o formato de valores separados por vírgula. As ferramentas necessárias para a conversão entre os formatos foram implementadas com sucesso, e uma biblioteca disponível para uso interno do software, possibilitando a leitura dos dados dos impulsos nesse formato.

Foram desenvolvidas rotinas para a determinação do tempo de frente, cauda e amplitude de uma forma de tensão impulsiva e os valores obtidos com o seu uso foram confrontados com a técnica manual de leitura direta com os cursores do osciloscópio, com grande coincidência e consistência no comissionamento. O principal fator responsável pela robustez do método é o uso da rotina de aproximação polinomial, para eliminação de ruídos espúrios que pudessem influenciar negativamente nas estimativas.

O ajuste das formas de tensão pelo método dos mínimos quadrados e a aplicação dos valores obtidos para o ajuste das formas de corrente se mostrou adequado à comparação visual dos impulsos. O critério de avaliação do ajuste com base no trecho estacionário da forma anterior à aplicação do impulso evita o uso de constantes arbitrárias e se mostra como um critério objetivo e reproduzível, adequado a diferentes instrumentos e configurações.

A detecção de pequenas não conformidades pelo método da Transformada Wavelet, bem como o uso de critérios de avaliação com base no trecho estacionário anterior à aplicação do impulso se mostrou efetivo, com concordância com o método manual de avaliação. Apenas uma constante é arbitrada ao longo do processo e, com ela é possível determinar a sensibilidade da análise.

Por fim, os resultados obtidos permitem uma avaliação rápida e concordante com o método manual para ressaltar possíveis não conformidades associadas à avaliação de transformadores por meio de ensaios que envolvam a aplicação de formas impulsivas de amplitude plena e reduzida de tensão e corrente.

Por meio do software com suas técnicas de processamento de sinais, diminui-se a imprecisão na aquisição dos dados e as ferramentas gráficas permitem uma inspeção fina para auxiliar o operador na tomada de decisão onde possam surgir eventuais dúvidas sobre o comportamento do objeto sob ensaio, melhorando o processo interno de recebimento e

avaliação dos equipamentos adquiridos, gerando melhoria na qualidade do serviço e redução de custos operacionais das equipes de manutenção.

6 Perspectivas futuras

Apesar do resultado positivo, existe espaço para diversas melhorias na metodologia desenvolvida, bem como ainda há algumas coisas a serem investigadas, que podem resultar na alteração futura de algum procedimento visando a melhorar o resultado final ou a inclusão de análises e funcionalidades adicionais. Algumas sugestões de trabalhos futuros encontram-se abaixo:

- Visualização e análise por meio dos critérios de função de transferência (admitância no domínio da frequência);
- Uso da função de coerência para a análise de funções de transferência, bem como a detecção de possíveis problemas associados ao gerador de impulsos em um procedimento de comissionamento;
- Sugestão de valores de resistência adequados à obtenção das formas com tempos de frente e cauda especificados, dentro da tolerância nominal durante o procedimento de ajuste da forma de onda;
- Obtenção automática das formas dos ensaios, bem como o monitoramento dos principais parâmetros de configuração do osciloscópio;
- Investigação dos mecanismos de falhas de transformadores perante o ensaio de impulso, bem como a obtenção de padrões característicos nas formas, visando à identificação da natureza de uma falha detectada de forma automática;
- Modelagem completa do sistema, incluindo o gerador de impulsos, divisor de tensão, shunt, os atenuadores e cabeamento necessário, bem como o estágio de entrada do instrumento de medição e o processo de discretização, visando buscar as influências de alguns parâmetros na melhoria da sensibilidade de detecção de possíveis defeitos, como valores de impedância do divisor, valor de resistência do shunt, parâmetros construtivos do sistema de casamento de impedância, especificações do sistema de aquisição de dados, etc..

Bibliografia

1. COFFEEN, L.; BRITTON, J.; RICKMANN, J. **A new technique to detect winding displacements in power transformers using frequency response analysis**. [S.l.]: [s.n.]. 2003. p. 7--pp.
2. CHRISTIAN, J.; FESER, K. Procedures for detecting winding displacements in power transformers by the transfer function method. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 19, p. 214--220, 2004.
3. VALECILLOS, B.; RAMIREZ, J. **Evaluation of Lightning Impulse Test by Frequency Response Analysis**. [S.l.]: [s.n.]. 2006. p. 1--6.
4. MALEWSKI, R.; POULIN, B. Impulse testing of power transformers using the transfer function method. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 3, p. 476--489, 1988.
5. REDDY, K. S. et al. **Coherence function method of detection of fault in a power transformer during impulse test**. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1--6.
6. AL-AMMAR, E.; KARADY, G. G. **Transfer function analysis using STFT for improvement of the fault detection sensitivity in transformer impulse test**. [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 1855--1862.
7. FERNANDO, S.; RAGHUVeer, M. **Application of wavelets to identify faults during impulse tests**. [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 581--584.
8. ABNT NBR 6939. **Coordenação do isolamento - Procedimento**. Rio de Janeiro. 2000.
9. ABNT NBR 5356-4. **Transformadores de Potência - Parte 4: Guia para ensaio de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores**. Rio de Janeiro. 2007.
10. ABNT NBR 6936. **Técnicas de ensaios elétricos em alta tensão - Procedimento**. Rio de Janeiro. 1992.
11. ABNT NBR 5356-3. **Transformadores de Potência - Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar**. Rio de Janeiro. 2007.
12. ABNT NBR 5356-1. **Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades**. Rio de Janeiro. 2007.
13. KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering: Fundamentals**. 2ª. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2000.
14. DE OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; DE ABREU, J. P. G. **Transformadores: Teoria e**

- Ensaio. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.
15. JACYSZYN, R. B. **Modelos Para Surtos para Transformadores de Média Tensão**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá - MG. 2006.
 16. MCCOMB, T. et al. Qualifying an impulse digitizer for measurements in HV impulse tests. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 5, p. 1256--1265, 1990.
 17. MCCOMB, T.; DUNN, J.; KUFFEL, J. Digital impulse measurements meeting standards while pushing the limits, 1999.
 18. AL-AMMAR, E.; KARADY, G. G.; SIM, H. J. Novel technique to improve the fault detection sensitivity in transformer impulse test. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 23, p. 717--725, 2008.
 19. RAHIMPOUR, E.; JABBARI, M.; TENBOHLEN, S. Mathematical comparison methods to assess transfer functions of transformers to detect different types of mechanical faults. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 25, p. 2544--2555, 2010.
 20. KARADY, G. G. et al. **Improved technique for fault detection sensitivity in transformer impulse test**. [S.l.]: [s.n.]. 2000. p. 2412--2416.
 21. HANIQUE, E. A transfer function is a reliable tool for comparison of full-and chopped lightning impulse tests. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 9, p. 1261--1266, 1994.
 22. PANDEY, S. K.; SATISH, L. Multiresolution signal decomposition: A new tool for fault detection in power transformers during impulse tests. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 13, p. 1194--1200, 1998.
 23. SLOMOVITZ, D.; SLOMOVITZ, G.; JOSKOWICZ, J. **New method for comparison of chopped waveforms in impulse transformer tests**. [S.l.]: [s.n.]. 2012. p. 1--5.
 24. RAJAMANI, P.; DEY, D.; CHAKRAVORTI, S. Classification of dynamic insulation failures in transformer winding during impulse test using cross-wavelet transform aided foraging algorithm. **Electric Power Applications, IET**, v. 4, p. 715--726, 2010.
 25. DE, A.; CHATTERJEE, N. A fuzzy ARTMAP fault classifier for impulse testing of power transformers. **Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on**, v. 11, p. 1026--1036, 2004.
 26. DE SALLES, C. **Correção de Umidade para Ensaio de Impulso Atmosférico**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá.

27. GIESSELMANN, M. G.; VOLLMER, T. T.; ALTGILBERS, L. **Modular, compact HV-capacitor charger**. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 409--412.
28. GIESSELMANN, M.; MCHALE, B. **Rapid capacitor charger for 10 Hz operation of a low-inductance compact Marx generator**. [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 1184--1187.
29. IEC 60060-1. **High-voltage test techniques - Part1: General definitions and test requirements**. Geneva, Switzerland. 2010.
30. HARADA, T. et al. Development of a high voltage universal divider. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. 95, p. 595--602, 1976.
31. POWER, J. F. Development of a 100 kilovolt two nanosecond risetime probe with DC response, 1986.
32. RAHAMAN, H. et al. **Development of inexpensive electrical probe for wideband voltage measurement up to 300 kV**. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1369--1371.
33. IEEE STD C57.138. **IEEE Recommended Practice for Routine Impulse Test for Distribution Transformers**. [S.l.]. 1998.
34. AICHER, L. Some Aspects of Ground-Current Measurements during Transformer Impulse Tests. **Power apparatus and systems, part iii. transactions of the american institute of electrical engineers**, v. 79, p. 1101--1103, 1960.
35. CHEKUROV, Y. Y.; HALLSTROM, J. K. **Fast resistive attenuators for high accuracy measurements of LI voltages**. [S.l.]: [s.n.]. 2004. p. 328--329.
36. IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. **IEEE Guide for Transformer Impulse**. [S.l.]: [s.n.], 2011.
37. TEKTRONIX. **Technical Brief - High Resolution Transient Capture**. [S.l.]. 1991.
38. TEKTRONIX. **Technical Brief - Improving Vertical Resolution in Tektronix Digital Phosphor Oscilloscopes**. [S.l.]. 2013.
39. KAUFMANN, G. Impulse testing of distribution transformers under load. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. 96, p. 1583--1595, 1977.
40. SMITH, S. W. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. 2^a. ed. [S.l.]: California Technical Publishing, 1997.
41. GABBOUJ, M.; COYLE, E.; GALLAGHER, N. An overview of median and stack filtering. **Circuits, Systems and Signal Processing**, v. 11, p. 7-45, 1992. ISSN 0278-081X.

42. GAVIN, H. The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems. **Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University**, 2011.
43. KANNAN, S.; RAO, Y. N. **Prediction of the parameters of an impulse generator for transformer testing**. [S.l.]: [s.n.]. 1973. p. 1001--1005.

ANEXO A – Detalhes do software desenvolvido

Essa seção procura mostrar brevemente as telas pertinentes e as funções do software desenvolvido. Na Figura 27, tem-se a tela inicial do software, mostrando a tela inicial e os botões pertinentes de funções para a leitura dos arquivos de tensão e corrente, o cadastro de transformadores e do instrumento de medição, a análise de formas impulsivas, configurações e ajuda, além do botão de saída para o encerramento do programa.

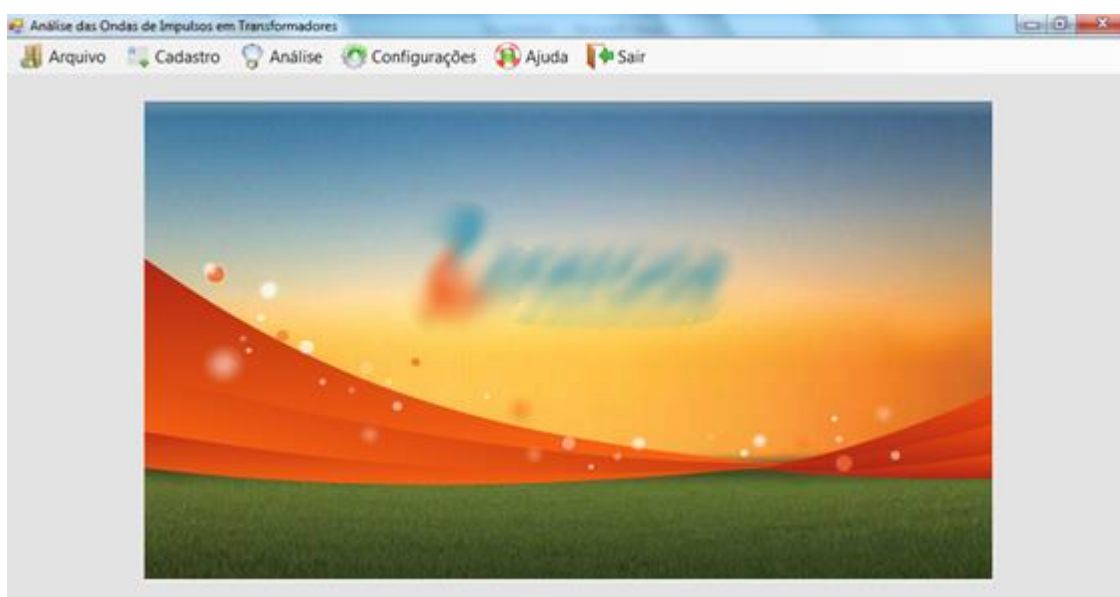


Figura 27 - Tela Inicial do Software de Análise de Ensaio de Impulso Atmosférico

A Figura 28 dá destaque ao botão “Cadastro”, em que temos diversas opções. A partir desse botão é possível cadastrar no banco de dados o transformador a ser ensaiado (Transformador), a empresa para a qual o ensaio esta sendo feito (Empresa), o fabricante do transformador (Fabricante) e o osciloscópio utilizado para capturar as formas de tensão e corrente provenientes do ensaio (Osciloscópio).



Figura 28 - Função Cadastro

Na Figura 29 é mostrado o cadastro de transformadores. Os dados solicitados são: número de patrimônio, número de série, número de fases, potencia (kVA) fabricante, tensão, empresa, estado de conservação (novo ou usado).



Figura 29 - Cadastro de Transformadores

Na Figura 30 é mostrada a tela de cadastro da empresa para a qual o ensaio está sendo feito, ou seja, o cliente solicitando do serviço. Cadastra-se o cliente com o nome da empresa, CNPJ, telefone, o contato na empresa e o endereço completo.

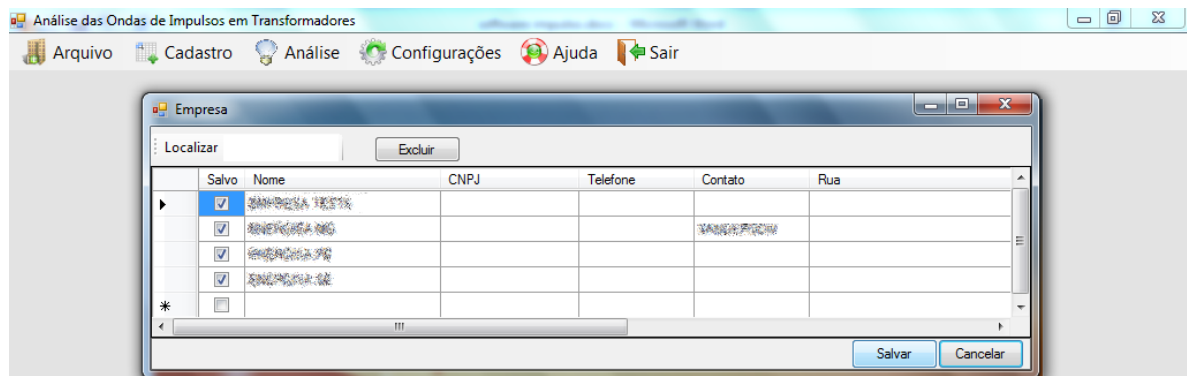


Figura 30 - Cadastro de Empresa solicitante do serviço

Na Figura 31 é mostrada a tela do cadastro de fabricantes de transformadores, onde são inseridos o nome da empresa, o CNPJ, o telefone, o contato na empresa e o endereço completo.

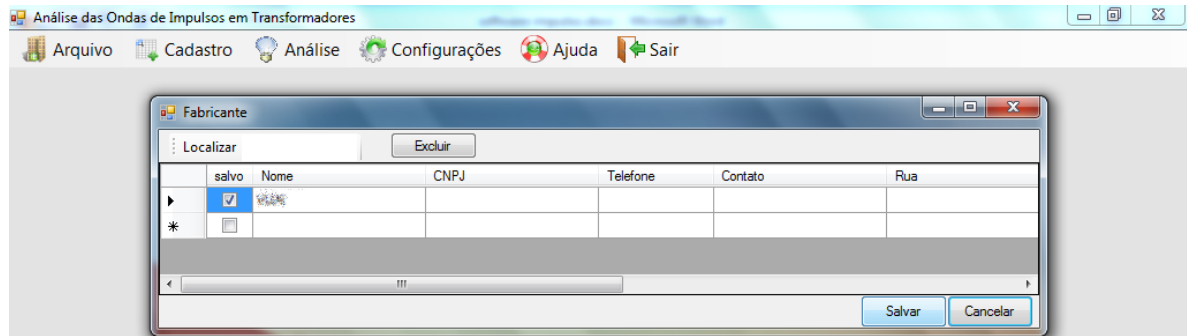


Figura 31 - Cadastro de Fabricante de Transformadores

A Figura 32 mostra a tela de cadastro de osciloscópio, onde são preenchidos o nome do fabricante do osciloscópio e o modelo.

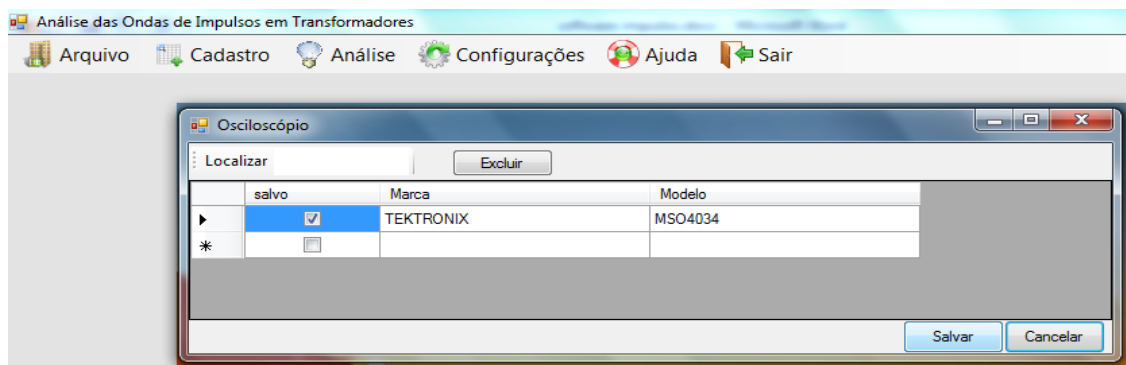


Figura 32 - Função Cadastro de Osciloscópio

A Figura 33 mostra as configurações do osciloscópio, que devem ser inseridas a fim de que o software consiga interpretar as informações lidas. São solicitados o valor do divisor de tensão utilizado no circuito de ensaio, o caractere separador para a importação de dados textuais, visando a importação tanto de arquivos de captura no formato CSV (Valores separados por vírgula; comma-separated values) quanto oriundos de algum equipamento que não siga esse formato, a coluna de início, a partir da qual os dados lidos são validos, o número de linhas a ignorar, linhas essas que normalmente contém informações suplementares às leituras, como ajustes de escalas do osciloscópio, o modelo do osciloscópio, que foi cadastrado anteriormente, o IP de configuração, a partir do qual o software acessa os dados de tensão e corrente provenientes do ensaio e o diretório padrão, onde os dados são salvos, no caso de se armazenar os dados dos canais do osciloscópio.

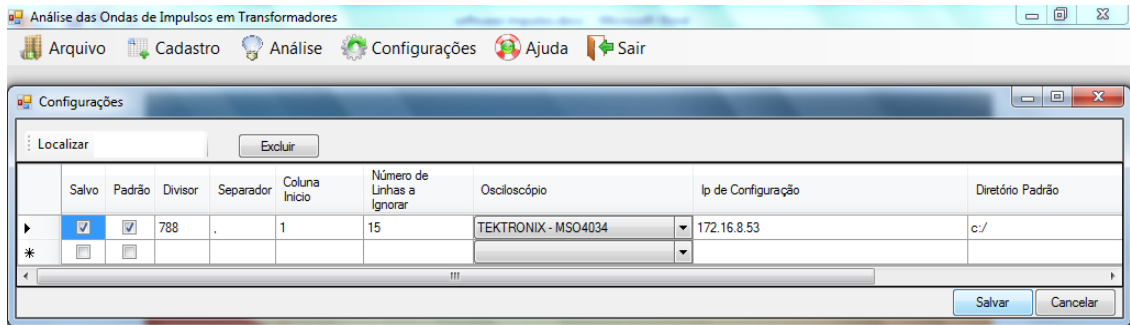


Figura 33 - Configurações do Osciloscópio

Na Figura 34 é mostrado o menu “Arquivo”, onde são encontradas as funções “Ensaio” e “Sair”, que serve para fechar o software. A função “Ensaio” serve para cadastrar dados de um ensaio.



Figura 34 - Menu Arquivo

Na função “Ensaio” armazena-se em banco de dados os ensaios de impulso atmosférico. Na Figura 35 pode-se observar que existem duas formas de entrada de dados: Arquivo ou Osciloscópio. No caso do ensaio estar em arquivo, significa que o ensaio foi feito no passado e os canais do osciloscópio foram armazenados em arquivos de dados (.isf, .csv e outros). No caso de se usar a opção Osciloscópio, significa que o ensaio está sendo realizado no momento em que se cadastra o ensaio, o que significa que a cada novo impulso aplicado no transformador, um novo conjunto de dados deve ser adquirido diretamente do osciloscópio (Figura 36).

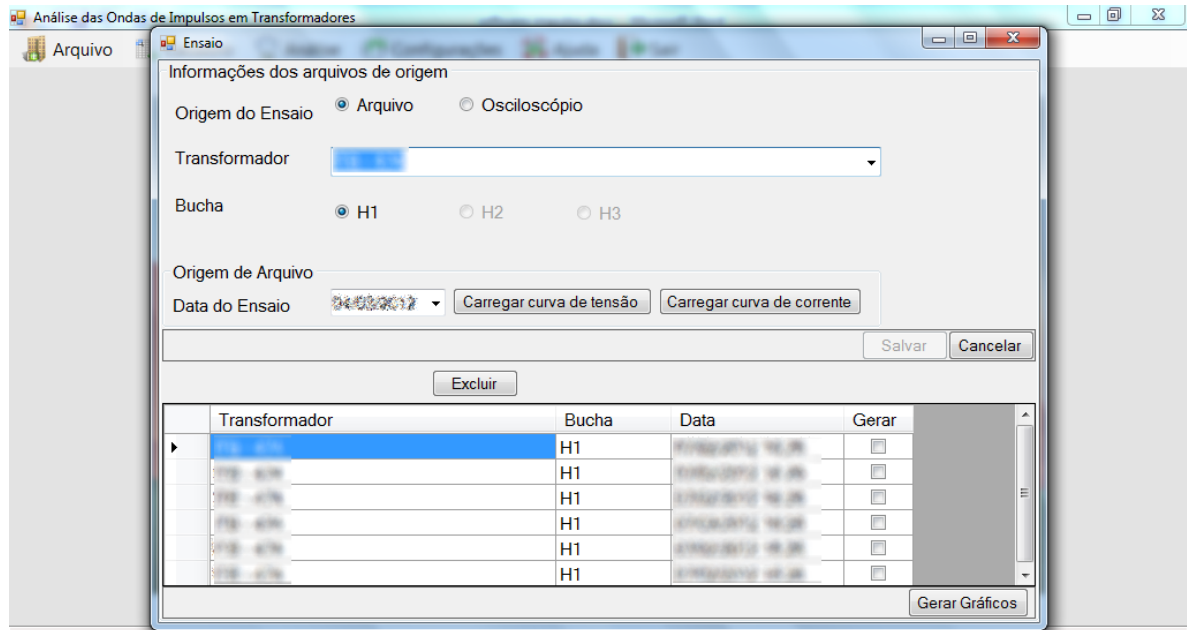


Figura 35 - Cadastro de Ensaio

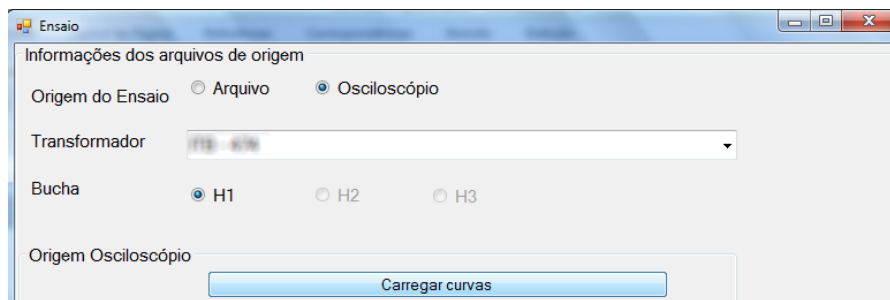


Figura 36 - Opção de cadastro de ensaio a partir do osciloscópio

Pode-se observar-se o botão “Gerar Gráficos” na Figura 35. A partir deste botão, os gráficos da Figura 37 são gerados. O número de gráficos a ser gerados é definido pelo usuário, a partir da checkbox “gerar”.

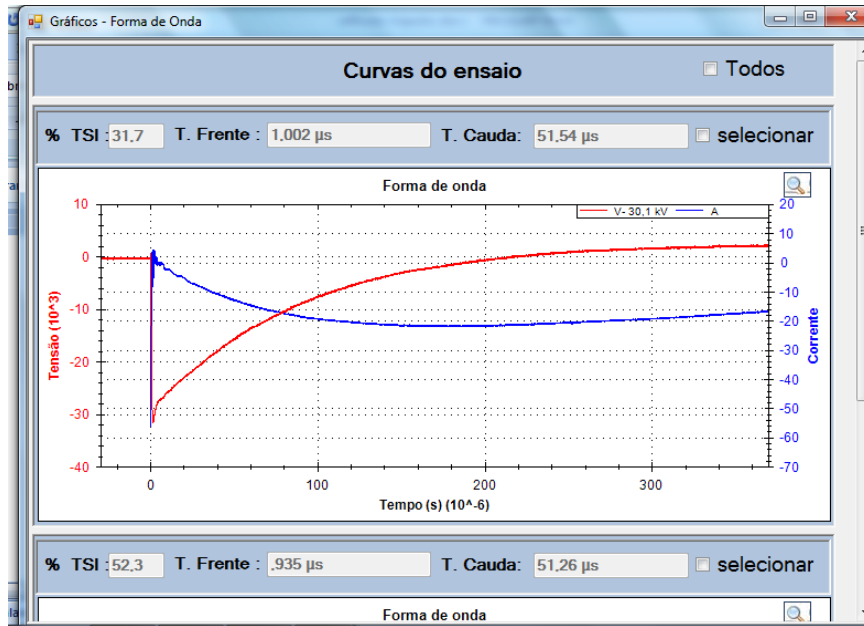


Figura 37 - Características geradas a partir dos dados do ensaio

Nesta tela de visualização das características há a opção de zoom em qualquer parte dos dados. A Figura 38 mostra a tela que é visualizada quando se clica na lupa da Figura 37. Estabelece-se uma área dentro da qual o detalhamento é mostrado. O resultado dessa visualização é a tela da Figura 39.

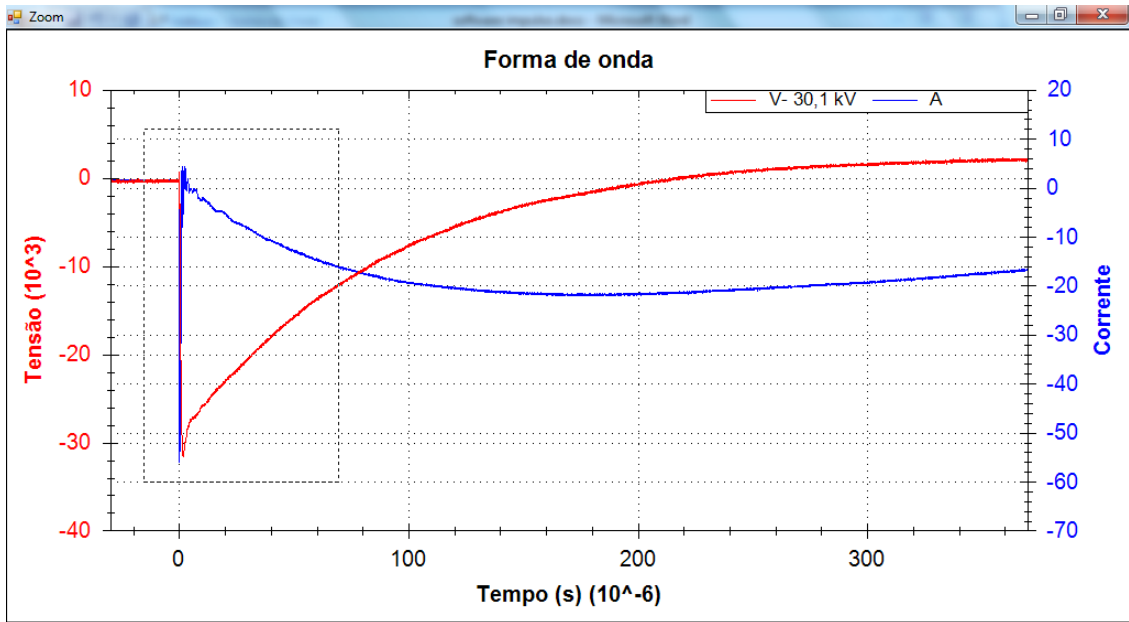


Figura 38 - Função Zoom

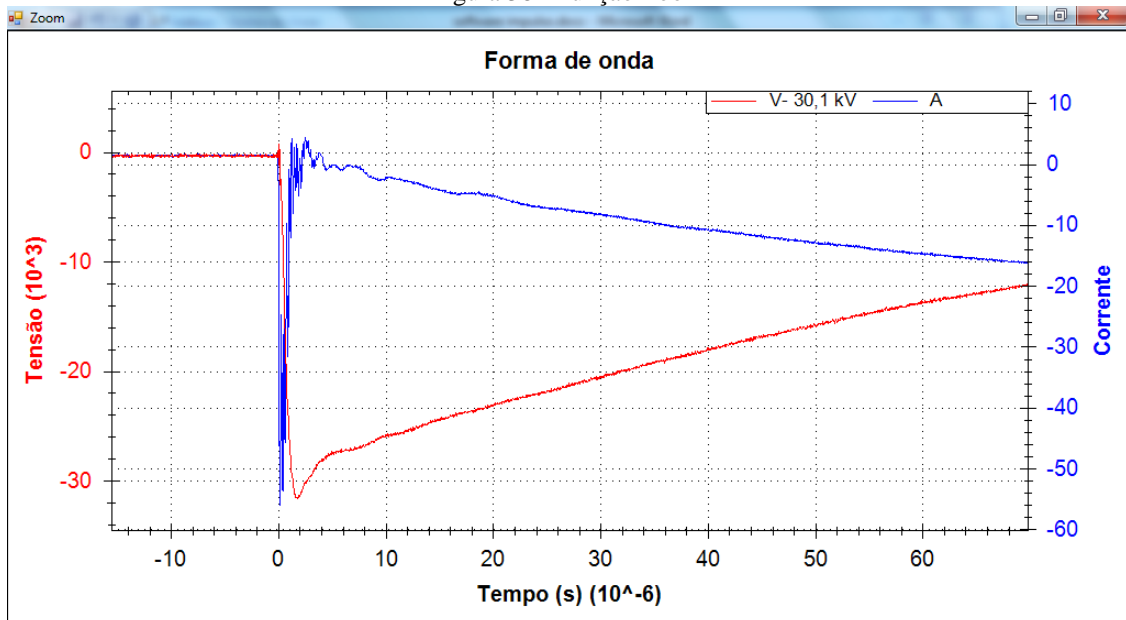


Figura 39 - Resultado da visualização de uma área específica da característica.

Após a geração das características, pode-se optar por realizar as análises do ensaio cujas características estão sendo visualizadas. Para realizar a análise a partir deste ponto, basta clicar em “Analisar”, mostrada na Figura 40.

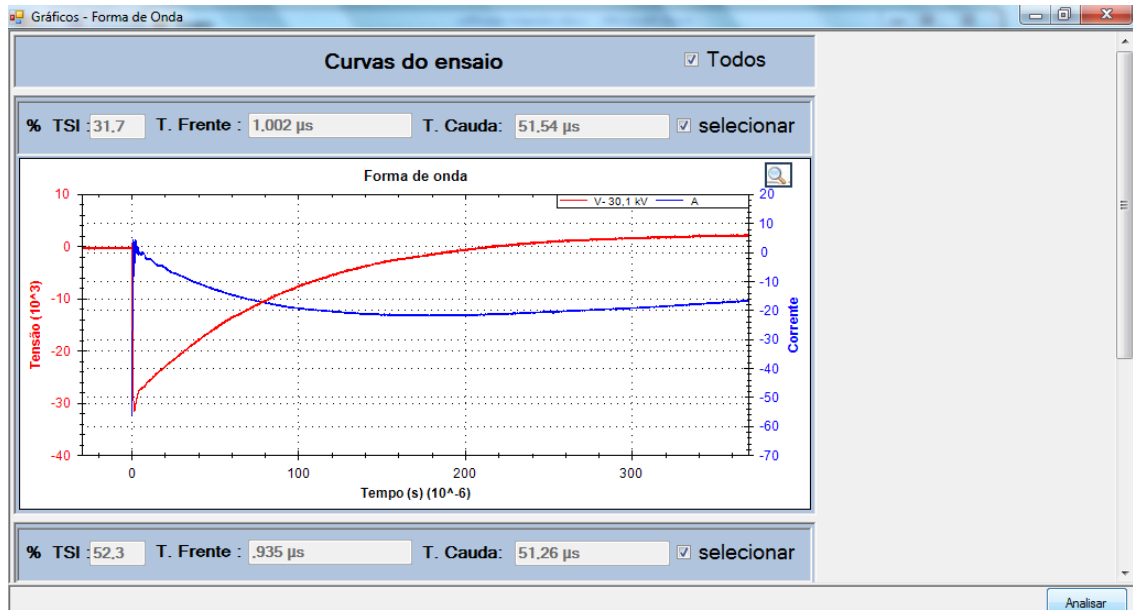


Figura 40 - Botão “Analisar” dentro da visualização das características de ensaio.

Quando se clica em “Analisar”, o relatório mostrado na Figura 41 é visualizado. São mostrados todas as características, bem como as com as análises dos ensaios. Cabe ressaltar que o relatório mostrado refere-se a somente 2 características, selecionadas anteriormente.

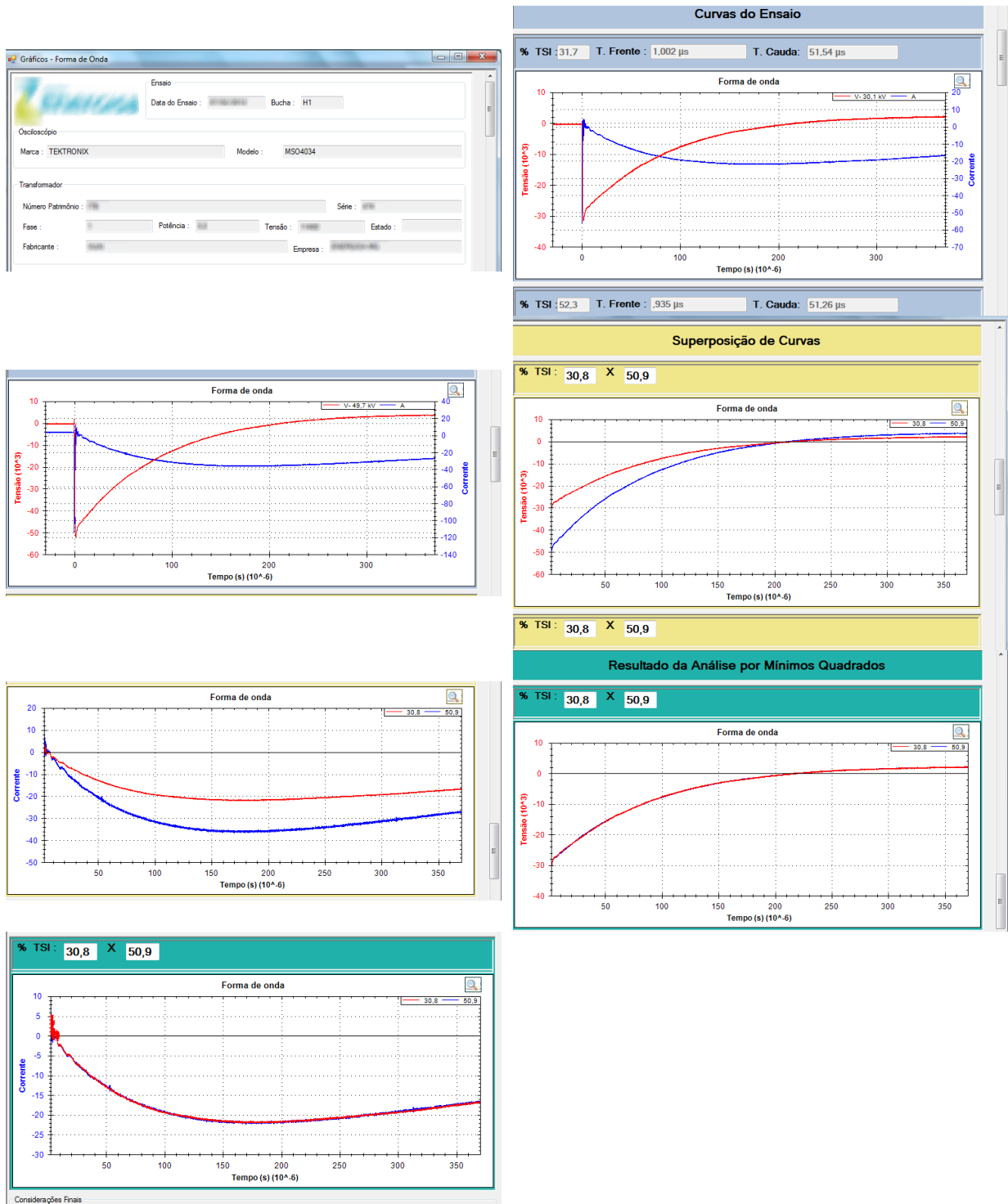


Figura 41 - Relatório de Análise do ensaio.

Na Figura 42, quando se clica no botão “Imprimir”, é gerada a versão para impressão do relatório de ensaio. Na versão para impressão, deve-se incluir o nome do responsável pelo ensaio, bem como inserir considerações sobre o ensaio, no campo “considerações finais”.

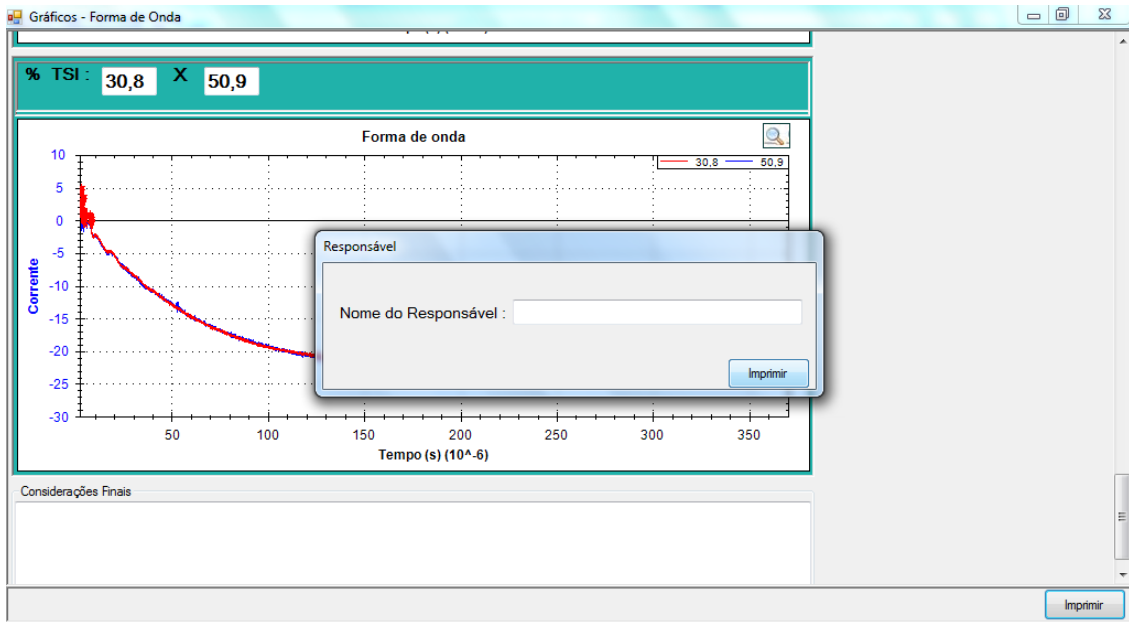


Figura 42 - Características geradas a partir das curvas de ensaio.

A Figura 43 mostra a versão para impressão do relatório. Os relatórios podem ser impressos em arquivos do tipo .pdf ou .xls.

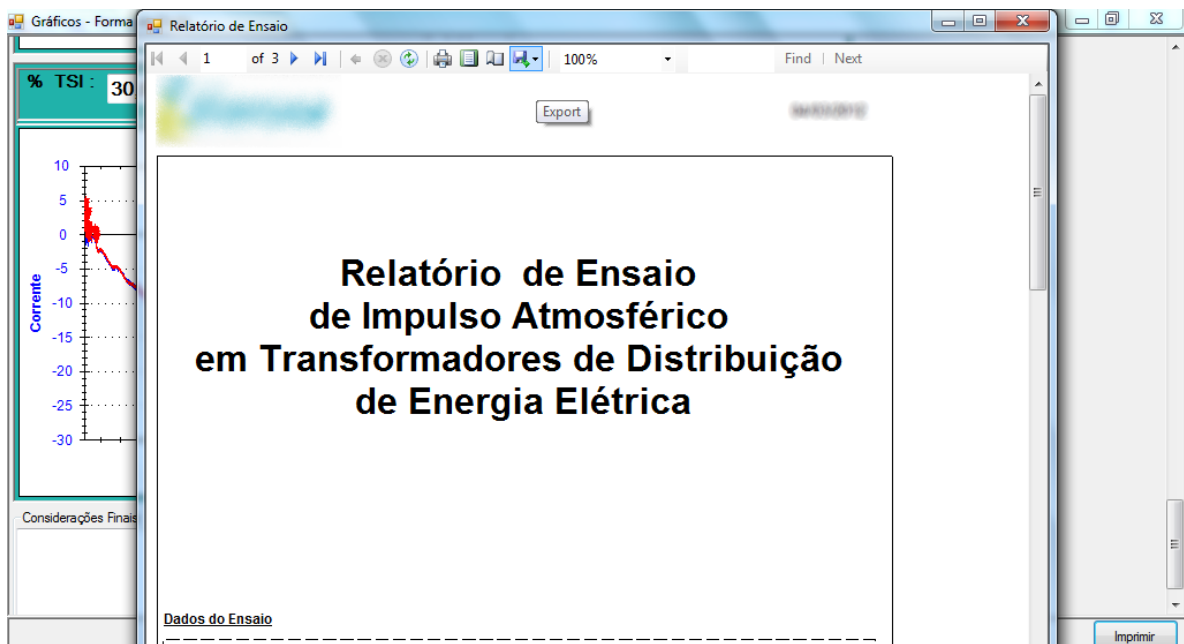


Figura 43 - Versão para impressão do relatório de ensaio.

Outra forma de se analisar características de ensaio é a partir do menu “Análise”. A partir dessa função, pode-se buscar ensaios já armazenados em banco de dados, gerar as características, analisá-las e gerar o relatório de ensaio, da mesma forma que a partir do menu “Ensaio” (Figura 44).

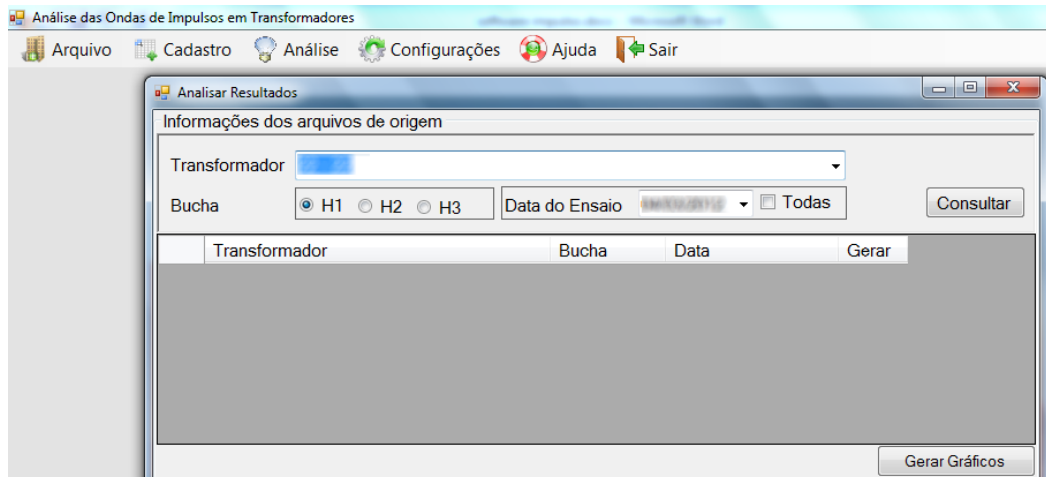


Figura 44 - Menu “Análise”.

No menu Ajuda estão os botões “Ajuda” e “Sobre” (Figura 45). Em “Ajuda” são mostradas informações relevantes sobre o ensaio de impulso atmosférico, bem como sobre a metodologia utilizada no software (Figura 46). Em “Sobre” são mostradas informações sobre a versão do software.

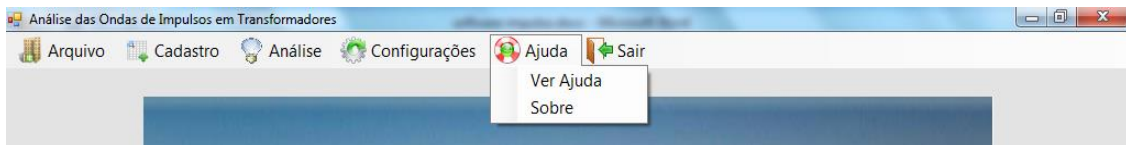


Figura 45 - Menu Ajuda.

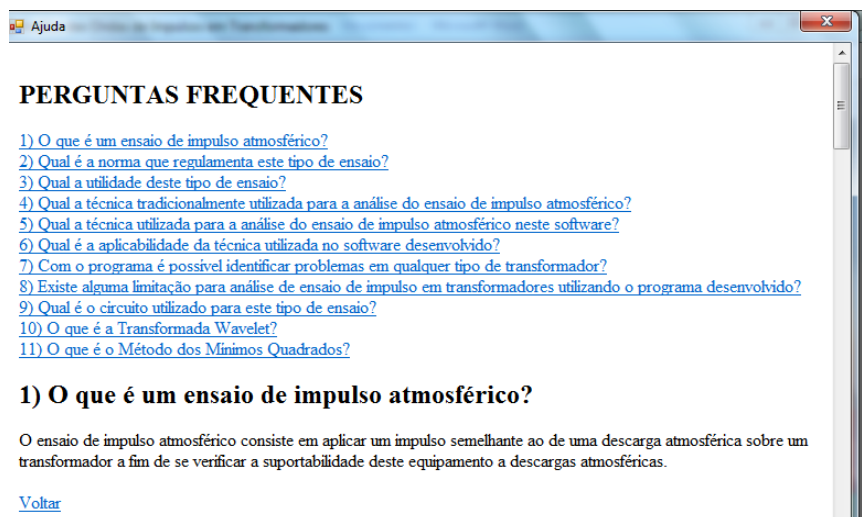


Figura 46 - Botão “Ajuda”.