



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GTM/29

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO 12 - GMT**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES**

**GMT**

**SOFTWARE PARA ANÁLISE E DETECÇÃO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES ATRAVÉS DE  
ENSAIOS DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS ESCALONADOS**

**Guilherme Martinez Figueiredo Ferraz  
HVEX**

**Ruan da Silva Costa  
HVEX**

**Rogério Salustiano  
HVEX**

**Renato Massoni Capelini  
HVEX**

**Felipe Lira Santana Silva  
HVEX**

**RESUMO**

O ensaio de descarga atmosférica em transformadores é de suma importância para avaliação da robustez do seu isolamento. Todavia, a análise dos resultados é objetivo de grandes discussões, entre fabricantes e clientes, frente a sua aprovação, ficando, com exceção dos casos de curto franco, a cargo do responsável técnico analisar as formas de onda.

Este artigo visa detectar a falha de isolamento em transformadores. Para isso realizou-se uma modelagem envolvendo um gerador de impulsos e um transformador em elementos distribuídos no software ATP®. Após isso, demonstrou-se, através de simulações, que o curto circuito entre pequenos trechos da bobina geram consequências nos sinais adquiridos pelos instrumentos de medição e no fator de forma da onda. Por este motivo foi desenvolvido o software de análise promovendo, através de técnicas digitais, a acurácia no processo de avaliação dos resultados. Logo após a aquisição de dados através de osciloscópio é necessária uma sequência de procedimentos para obter o aumento da resolução vertical, redução de ruídos brancos além de cálculos dos parâmetros da forma de onda decorrente. De posse de um sinal mais fidedigno e com parametrizações bem definidas iniciou-se um processo de sincronismo dos impulsos reduzidos e plenos, modularizando as amplitudes e comparando ponto a ponto a deformação das ondas. Caso elas venham ocorrer, com consequências nos sinais de tensão e corrente simultaneamente, a probabilidade de falha de isolamento é elevada, provado pelo banco de ensaios realizados.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transformadores, Impulso Atmosférico, Filtro Digital, Desvio Padrão, Ensaios.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Embora seja um componente de extrema importância para os sistemas elétricos, o transformador é difícil de ser modelado e analisado precisamente, ainda mais quando se almeja extrair um circuito equivalente fidedigno para altas frequências e descobrir a distribuição de gradientes ao longo das bobinas durante eventos transitórios. Como os detalhes do projeto estão disponíveis apenas para os fabricantes, que são os proprietários legais, a modelagem para o estudo de transitórios eletromagnéticos é altamente sofisticada. Além disso, algumas capacitâncias e indutâncias parasitas, de difícil determinação, são mais significativas com o acréscimo da frequência. Por fim, detectar falhas com ensaios em alta frequência tem grande caráter subjetivo intrínseco ao analista.

O estudo de fenômenos transitórios elétricos em sistemas de energia envolve uma faixa de frequência que varia desde DC (Corrente Contínua) até cerca de 50 MHz ou, em casos específicos, ainda mais. No entanto, em alguns casos, podem haver efeitos transitórios em faixas de frequência diferentes das tradicionais (1).

Vale ressaltar que muitos destes transitórios requerem uma modelagem adequada do comportamento não-linear do núcleo do transformador, causado, basicamente, pelos efeitos de magnetização e histerese. Outros transitórios

exigem uma representação adequada dos parâmetros dependentes do efeito pelicular. Já aqueles em alta frequência, exigem a representação precisa de todas as capacitâncias: para a carcaça, entre enrolamentos, intersecções com o núcleo e até mesmo da própria bobina, levando a um modelo de elementos distribuídos.

Este artigo trata sobre a representação da bobina de alta tensão dos transformadores com foco na análise de falhas frente a impulso atmosférico. Além disso, a realização de uma série de ensaios com impulsos escalonados e o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para apontamento de deformações das formas de onda (2, 3, 4 e 5).

Não obstante, a mesma modelagem, verificada em transformadores de distribuição, poderia ser extrapolada para transformadores de potência e reatores, dada a característica do enrolamento e ensaios submetidos.

## 2.0 - METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DE FALHA NO ISOLAMENTO DE UM TRANSFORMADOR

### 2.1 Determinação do circuito equivalente para simulação em ATP

O primeiro passo na obtenção de um modelo para transitórios de frequência elevada é dividir os elementos em parâmetro distribuídos com um número razoável de seções, fornecendo o detalhamento exigido de tensões de cada secção dentro da bobina do transformador. A bobina pode ser representada por tantos elementos quanto aqueles que de fato existirem, em outras palavras, se existirem dez segmentos de bobinas, tipo panqueca, pode-se representar os dez no circuito equivalente. Assim, o modelo de parâmetros distribuídos resultante é uma série de circuitos com acoplamentos magnéticos mútuos.

Com este modelo em mente dividiu-se a bobina de alta tensão do transformador de distribuição em pequenos pacotes de indutâncias com capacitâncias para o referencial de terra e entre as espiras da bobina, visto a direita da Figura 1. Não obstante, representou-se o gerador de impulsos, como sendo uma série de capacitores carregados, descarregado em sincronismo, visto a esquerda da mesma figura. Além disso, a imagem fornece a representação das resistências que determinam o fator de forma do impulso, o divisor de tensões e o circuito de medição.

De posse deste modelo simulou-se a falha de isolamento em uma pequena parcela da bobina representada pela chave normalmente aberta no começo da bobina.

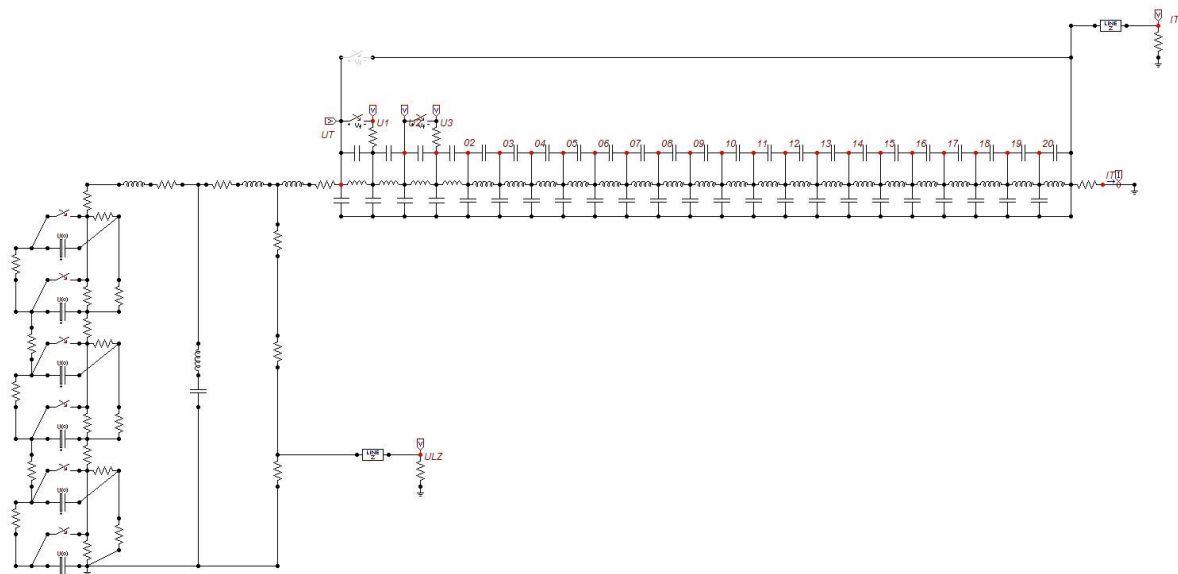


FIGURA 1 – Simulação em ATP de gerador de impulso e bobina de alta tensão de transformador

### 2.2 Elaboração do software de operação do gerador de impulsos, cadastro e análise de sinais.

Geradores de impulso de tensão têm por finalidade reproduzir as formas de ondas associadas a descargas atmosféricas e manobras. Com isso, é possível analisar o comportamento de materiais dielétricos e equipamentos quando submetidos a solicitações elétricas severas associadas a estes tipos de descarga. A análise deste comportamento indica se o corpo de provas está aprovado e tem rigidez dielétrica ou NBI (Nível Básico de Isolamento) de acordo com critérios normativos.

Para o controle e análise de sinais a equipe desenvolveu o software HVEX LIAS. Sua principal função é o registro dos ensaios de impulso atmosférico e análise, além disso está apto para comandar um Controlador Lógico Programável (PLC), conseqüentemente todo o ensaio, além de armazenar dados sobre clientes, fabricantes, transformadores, osciloscópios e muito mais

### 2.2.1. Cadastro

A figura 2 apresenta o menu Cadastro na qual estão todas as possibilidades de armazenamento para geração de dados históricos e do relatório de ensaio. Os possíveis cadastros são: cliente (empresa e fabricante), endereço, cidade, estado e país. Informações essenciais de país e estado foram previamente cadastradas para facilitar a utilização do software no registro inicial. Já o menu laboratório encontram-se os cadastros dos equipamentos relacionados aos ensaios e também o cadastro dos transformadores, os objetos a serem ensaiados. Foi criado um banco de dados relacional, portanto, quando se cadastra um transformador e a sua classe de tensão o software já armazena o valor de NBI que deverá ser aplicado naquele corpo de prova evitando sobretensões no transformador.

FIGURA 2 – Tela de cadastro de transformadores

### 2.2.2. Procedimento de Ensaios

A sequência de impulsos é aplicada em cada terminal de linha do enrolamento de alta tensão, H1, H2 e H3. Para transformadores trifásicos, os terminais de alta tensão e baixa tensão (X1, X2, X3 e X0) não ensaiados são curto-circuitados e aterrados no tanque. O mesmo procedimento é utilizado em transformadores monofásicos, como visto na figura 3. O condutor de aterramento é conectado entre o tanque e o ponto de terra do gerador de impulsos através do resistor shunt, que deve ser devidamente escolhido para obter uma melhor sensibilidade na indicação de falhas. O esquema de conexão denominado “corrente de linha” é indicado a seguir, desta forma a corrente é aferida através da tensão observada sobre o shunt. Após realizar as devidas conexões o gerador de impulsos é carregado de acordo com NBI e número de estágios selecionados.

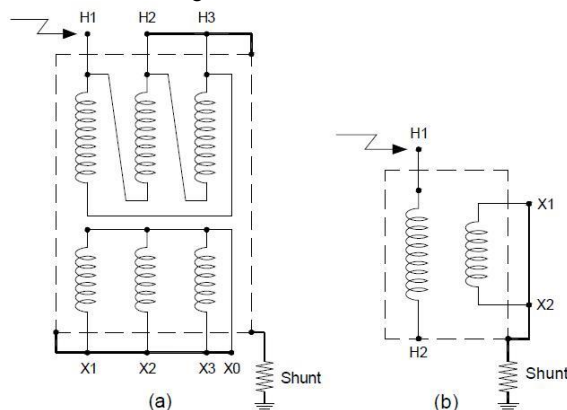


FIGURA 3 - a) transformador trifásico, b) transformador monofásico

### 2.2.3. Obtenção do impulso e filtros digitais

Na função obter ensaio armazena-se no banco de dados os ensaios de impulso atmosférico. Existem duas formas de entrada de dados: arquivo ou osciloscópio. No caso do ensaio estar em um arquivo, significa que o ensaio foi realizado e os canais do osciloscópio foram armazenados em um arquivo de dados (o formato .CSV foi escolhido para ser reconhecido pelo software). Ao selecionar a opção osciloscópio, significa que o ensaio está sendo realizado no momento do registro, ou seja, a cada novo impulso aplicado no transformador, um novo conjunto de dados deve ser capturado diretamente do osciloscópio.

Como os dados oriundos do osciloscópio está presente um certo nível de ruído de fundo, também chamado de ruído brando, tem-se a degradação da resolução vertical para uma análise exata de dados, somado a resolução em bits do conversor A/D. Para isso faz-se necessário uma filtragem na redução do ruído e aumento da resolução vertical. Os filtros recorridos foram:

- Média Móvel (Simple Moving Average) que evita o efeito de vazamento espectral, ou “aliasing”. Em estatística a Média Móvel é um cálculo para analisar pontos de dados através da criação de séries de médias de diferentes subconjuntos do conjunto de dados completo. Ele também é chamado de Moving Mean (MM) e é um tipo de filtro de resposta de impulso finito. Variações incluem: cumulativas ou ponderadas.
- Mediana Móvel (Moving Median) para analisar pontos de dados através da criação de séries de medidas da tendência central de diferentes subconjuntos do conjunto de dados completo.

As análises de grandezas temporais segue o seguinte procedimento:

- Tempo de Frente, é o parâmetro virtual definido como 1,67 vezes o intervalo de tempo T entre os instantes correspondentes a 30% e 90% do valor de crista do impulso atmosférico. A tolerância para o tempo de frente para o impulso normalizado é de  $\pm 30\%$  e é aferido através do vetor de tensão associado a uma incerteza extremamente baixa por utilizar conceitos de valores médios e desvio padrão frente ao ruído de fundo.
- Tempo de Cauda, é o parâmetro virtual definido como o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante na qual a tensão atinge a metade do valor de crista, na cauda. A tolerância para o tempo de cauda para o impulso normalizado é de  $\pm 20\%$  e segue os mesmos parâmetros de aferição do tempo de frente, todavia o vetor é analisado após o valor máximo.
- Tempo de corte, aplicável somente ao impulso atmosférico cortado, é o parâmetro virtual definido como intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante do corte. O instante do corte se inicia com a queda brusca da tensão que configura o impulso atmosférico cortado e usa-se conceitos de derivada para o cálculo do tempo até o corte.

Quando uma forma impulsiva é capturada, automaticamente o software sincroniza o início real do impulso, calcula os tempos virtuais de frente, cauda e máximo. Além disso, informa ao operador caso os tempos ou a amplitude do impulso estejam fora das tolerâncias normativas, como pode ser observado na figura 4.

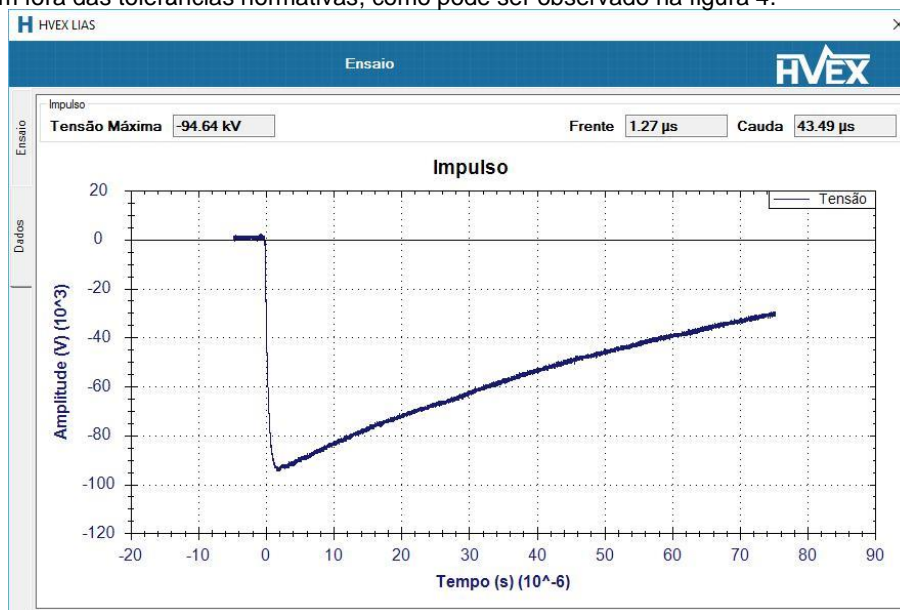


FIGURA 4 – Tela de captura do impulso com respectivos parâmetros normativos

Além desta análise sobre o impulso pleno implementou-se uma ferramenta correlaciona ao impulso cortado. Em outras palavras, o algoritmo busca derivadas em faixas que vão de 2  $\mu s$  a 5  $\mu s$ , tempos pré-escolhidos para o corte do impulso. Desta forma, automaticamente os caracteres são alterados e o tempo até o corte é aferido, como pode ser observado na figura 5 (9).

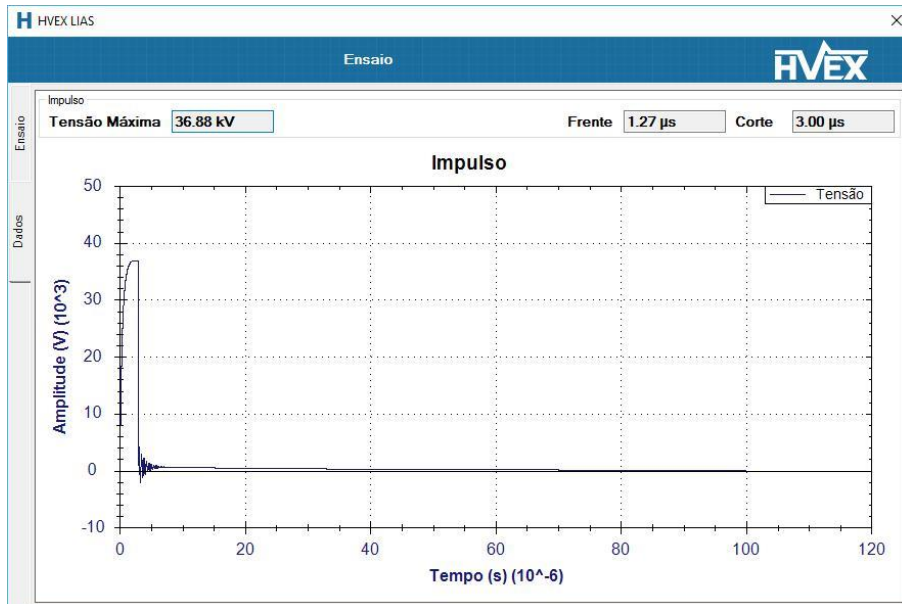


FIGURA 5 – Detecção autônoma do impulso cortado

Além das ferramentas destacadas o software faz a justaposição das formas de onda separadas por um offset pré-definido. Esse método seleciona as formas de onda de um ensaio analisando qual delas tem o maior valor de crista. Logo após este cálculo todos os valores de tensão das formas de onda são normalizados em unidade (por unidade - P.U.) em relação a maior tensão máxima. Conseqüente, as formas de onda com amplitude unitária são postas em um mesmo gráfico visto na figura 6, separadas por um offset (o valor 0,2 foi o que se mostrou efetivo em nos testes) para melhor entendimento e análise das curvas (11, 12 e 13).

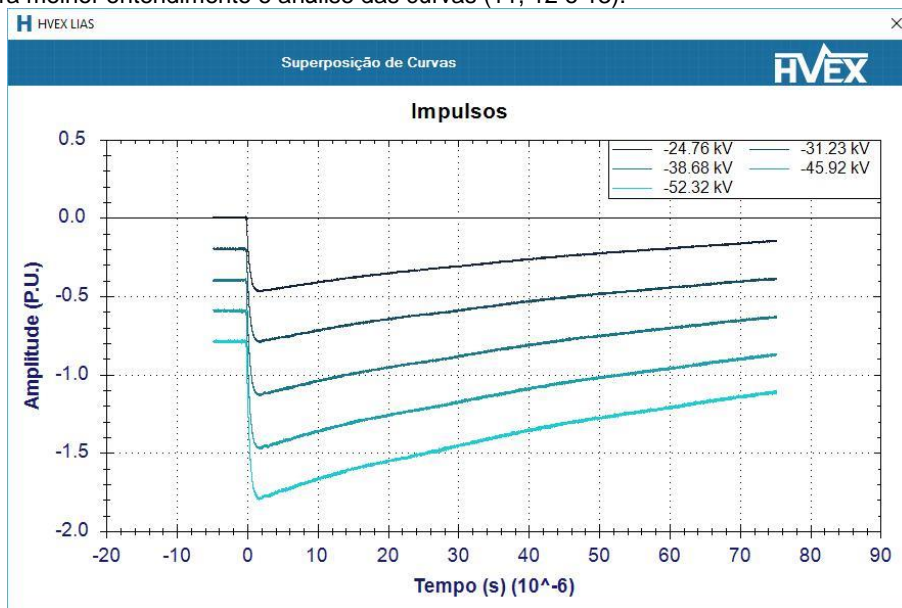


FIGURA 6 – Sobreposição de impulsos normalizados.

Entretanto a diferenciação crítica do sistema desenvolvido foi a ferramenta de superposição de curvas (10). Tal ferramenta busca inconformidades nas formas de onda, através do método de análise ponto a ponto das curvas de tensão reduzida e plena, correlacionando deformações nos vetores de tensão e corrente.

Metodologia para detecção de deformações nos impulsos:

- Sincronização do impulso, a investigação inicia-se primeiramente na determinação do desvio padrão do ruído de fundo do osciloscópio. A partir disto o algoritmo busca deformações dos sinais, com mais de 5 desvios padrões, nos instantes próximo ao início da captura do osciloscópio;
- Normalização do impulso, o vetor de tensão é dividido pelo valor máximo do impulso, logo a sua amplitude máxima igual a 1 p.u.
- Alteração no fator de forma, as simulações demonstraram a mudança de forma tanto na composição da corrente quanto na tensão de um impulso. Assim a ferramenta investiga ponto a ponto o vetor reduzido e o pleno após a normalização, se elas ocorrem simultaneamente o software registra esta posição.

- A tela de sobreposição de formas de onda pode ser obtida selecionando as curvas desejadas e clicando no botão Superposição de Curvas na tela de Análise. Com esta visão em tons degradê, à escolha do operador, é possível comparar as formas de impulso pleno e reduzido em uma única tela. Deste modo, torna-se fácil a percepção de alterações no perfil da onda durante o ensaio, acusando falha de isolamento do transformador

### 3.1 – RESULTADOS

#### 3.1. Simulação

A simulação determinada no item 2.1. destaca perturbações tanto na forma de onda de tensão quanto na de corrente para o terra, durante o ensaio de impulso atmosférico, como visto na figura 7. O fechamento da chave temporizada no software ATP®, representando o curto circuito entre espiras, reflete em um transitório de alta frequência próximo a 0,3  $\mu$ s. Vale ressaltar que a forma de onda vermelha representa a corrente para terra do transformador e a verde a forma impulsiva na bobina de alta tensão.

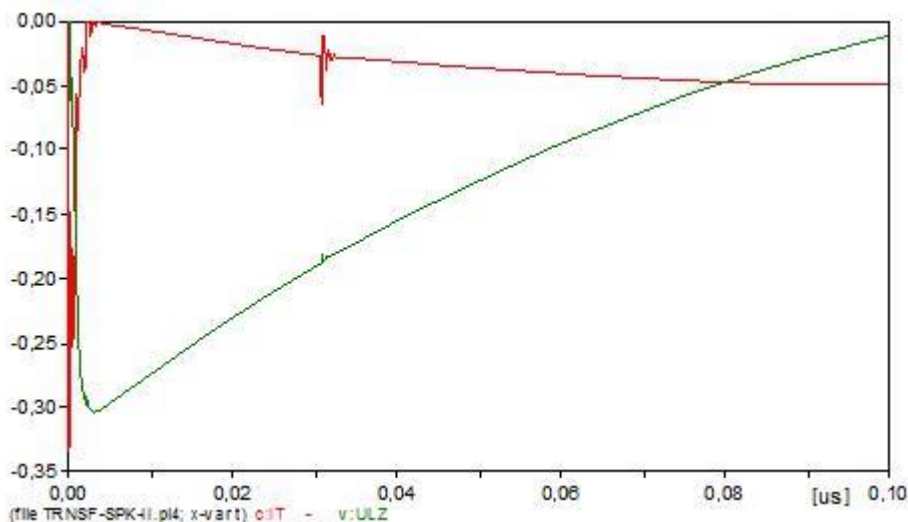


FIGURA 7 – Resultado da simulação de impulso em transformador com falha do isolamento entre camadas da bobina

#### 3.2. Ensaio escalonado

Para comprovar que falhas parciais de isolamento em setores da bobina do transformador culminam em pulsos de alta frequência com correspondência entre a tensão e corrente adquiridas, foram realizados 60 ensaios de impulso escalonados em transformadores de distribuição e através de ferramenta matemática sincronizou-se e comparou-se ponto a ponto impulsos de diferentes amplitudes. Nos primeiros 30 transformadores não se realizou o ensaio de impulso atmosférico pleno, determinado por norma, apenas impulsos que variaram de 10% a 80% do NBI. Para a segunda metade do lote de ensaios realizou-se o impulso pleno.

Os resultados foram aglutinados na Tabela 1, nela é possível observar que no primeiro lote metade dos transformadores apresentaram deformação nos impulsos. Já o segundo lote, com o mesmo número de corpos de prova mas tipo e marcas diferentes, apresentou deformação em pelos menos 11 unidades sendo que 8 apresentaram falha crítica. Vale ressaltar que todos os transformadores reprovados no ensaio apresentaram deformações no impulso escalonado, por volta de 70 a 80% do NBI. A equipe classifica os resultados segundo a metodologia:

- Tipo 1: os oscilogramas de tensão e corrente não possuem indicações de falha no isolamento;
- Tipo 2: os oscilogramas de corrente apresentam sinais de descargas acima de um determinado nível de tensão ou modificações na frequência de oscilação;
- Tipo 3: os oscilogramas de tensão e corrente apresentam sinais de descargas severas ou curto-circuito entre as camadas ou espiras, geralmente com modificações no oscilograma de tensão;
- Tipo 4: os oscilogramas de tensão e corrente indicam curto-circuito entre o(s) enrolamento(s) ensaiado(s) e um ponto de terra (núcleo ou tanque).

O transformador é considerado reprovado quando apresentar oscilogramas do tipo 4, visto na figura 9. Todavia há fortes indicativos de falha de isolamento quando são observados o tipo 3, como mostrado na figura 8.



Tabela 1 – Deformação de forma de onda

Lote	Ensaio Escalonados	Deformação na forma de onda	Ensaio Pleno (NBI)	Reprovação no ensaio Pleno
1° Lote – 30 Transformadores	30	15	-	-
2° Lote – 30 Transformadores	30	11	30	8

Estas perturbações, representadas por triângulos justapostos na cor verde, quando em número elevado, tiveram correspondência com a falha do transformador em ensaios normalizados, comprovando não só a simulação quanto a eficácia de se comparar formas de onda com amplitudes diferentes para análise da fragilidade do isolamento.

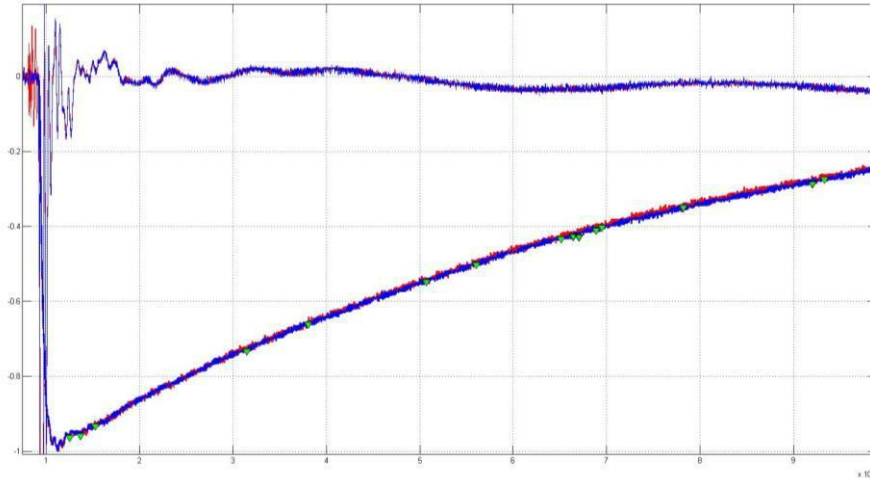


FIGURA 8 – Localização de deformações no impulso escalonado, tipo 3

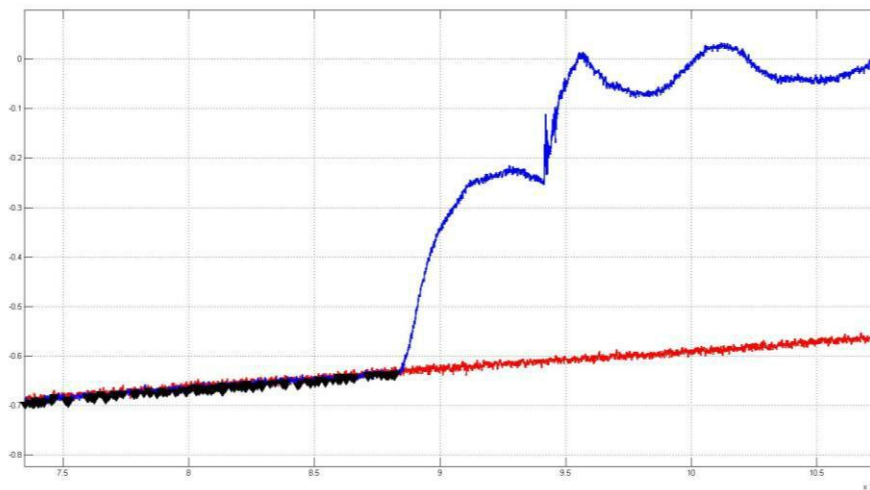


FIGURA 9 – Falha típica de um transformador sob ensaio, tipo 4, com localização de deformações

### 3.0 - CONCLUSÃO

A simulação dos transformadores de distribuição no software ATP®, sob ensaio de impulso, gerou informações muito importantes sobre a deformação das formas de onda. Obviamente a simulação não reproduziu todas as perdas e atenuações de uma falha de isolamento, sendo assim os sinais de alta frequência dentro do impulso tem amplitude elevada em comparação com os resultados práticos. De qualquer forma a modelagem abre caminhos para trabalhos futuros na localização da falha.

A partir destes preceitos de simulação a elaboração do software rompeu uma série de dificuldades quanto ao tratamento de sinais e filtros. Dado que a determinação, com precisão de 10 ns, no início do impulso é uma tarefa árdua, pois há muitos componentes de diversas frequências na abertura de um arco. Todavia, superado estas dificuldades e a reprodutibilidade em diversos corpos de prova, os resultados foram satisfatórios em eliminar o fator humano na aprovação de um ensaio de impulso.

Além disso, a taxa de acertabilidade da ferramenta se mostrou excelente, pois 100% dos transformadores reprovados tiveram deformações prévias nos impulsos escalonados. Vale ressaltar que alguns apresentaram as deformações mas não foram reprovados, isto se dá pelo fato de que o valor aplicado de impulso não foi o suficiente para abertura de um curto-circuito franco.

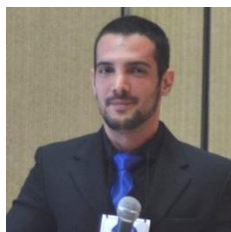
#### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABNT NBR 6939. Coordenação do isolamento - Procedimento. Rio de Janeiro. 2000
- (2) 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
- (3) ABNT NBR 6936. Técnicas de ensaios elétricos em alta tensão - Procedimento. Rio de Janeiro. 1992
- (4) ABNT NBR 5356-3. Transformadores de Potência - Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar. Rio de Janeiro. 2007
- (5) ABNT NBR 5356-1. Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades. Rio de Janeiro. 2007
- (6) KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. High Voltage Engineering: Fundamentals. 2ª. ed. [S.I.]: Butterworth-Heinemann, 2000
- (7) DE OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; DE ABREU, J. P. G. Transformadores: Teoria e Ensaio. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.
- (8) JACYSZYN, R. B. Modelos Para Surtos para Transformadores de Média Tensão. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá - MG. 2006
- (9) 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
- (10) 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.
- (11) IEC 60060-1. High-voltage test techniques - Part1: General definitions and test requirements. Genava, Switzerland. 2010
- (12) IEEE STD C57.138. IEEE Recommended Practice for Routine Impulse Test for Distribution Transformers. [S.I.]. 1998
- (13) TEKTRONIX. Technical Brief - Improving Vertical Resolution in Tektronix Digital Phosphor Oscilloscopes. [S.I.]. 2013

#### 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Felipe Lira Santana Silva** nasceu em Santos, SP, Brasil, em 21 de Agosto de 1991. Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (2015), e cursou durante 1 ano e meio a University of Toronto, Toronto, ON, Canadá. Atualmente é mestrando na UNIFEI em Engenharia Elétrica com ênfase em Automação e Sistemas Elétricos Industriais, e trabalha na High Voltage Equipments, onde atua na automação de equipamentos para testes em alta e média tensão e desenvolvimento de pesquisa para o mestrado.



**Guilherme Martinez Figueiredo Ferraz** nasceu em Mococa, SP, Brasil em 20 de maio de 1989. Iniciou a graduação em Economia pela UNICAMP em 2007. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2013), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2015), com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, doutorando (2015) na mesma área e local. Tem experiência na área de Administração, com ênfase em Administração de Recursos Humanos e Qualidade. Sócio da empresa HVEX - High Voltage Equipments, tem experiência adquirida do LAT-EFEI, Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá (desde 2009). Trabalha em projetos de pesquisa e desenvolvimento com concessionárias de energia e fabricas de equipamentos elétricos, além de projetar sistemas para ensaio em média e alta tensão. Sócio da Pandô APPS (desde de 2014) empresa que desenvolve aplicativos para plataformas móveis e sites.



**Renato Massoni Capelini** nasceu em São Paulo em 19 de maio de 1981. Recebeu os títulos de bacharel em engenharia elétrica, mestre e doutor pela Universidade Federal de Itajubá em 2006, 2011 e 2015 respectivamente. Possui experiência industrial na indústria automotiva e de alimentos, onde trabalhou com instalações elétricas, manutenção e eficiência energética. Atuou no Laboratório de Alta Tensão como consultor de 2010 à 2015, desenvolvendo projetos de P&D, estudos e ensaios elétricos. É co-fundador da HVEX, onde trabalha com projetos de P&D e desenvolvimento de produtos.





**Rogério Salustiano** obteve os títulos de bacharel e mestrado em engenharia elétrica em 2005 e 2012, respectivamente, na Universidade Federal de Itajubá, MG. Atualmente cursa Doutorado na Universidade Federal de Itajubá. Realizou pesquisas pelo Laboratório de Alta tensão de Itajubá – LAT-EFEI. Sua pesquisa inclui projetos e ensaios em transformadores, novos materiais, envelhecimento e degradação de materiais poliméricos.



**Ruan da Silva Costa** nasceu em Volta Redonda, RJ, Brasil em 3 de maio de 1994. Iniciou a graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Fluminense em 2012. Graduando em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Itajubá. Tem experiência no desenvolvimento de plataformas online adquirida em projetos acadêmicos. Trabalha desde 2014 na empresa HVEX – High Voltage Equipments em projetos de pesquisa e desenvolvimento de softwares de análise de dados em sistemas para ensaio em média e alta tensão.