



## GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM

### NOVO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE SEVERIDADE DOS TRANSITÓRIOS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

HUMBERTO MARGEL WICKERT(1); TIAGO BANDEIRA MARCHESAN; RODINEI CARRARO  
CPFL Transmissão(1)

#### RESUMO

As formas de onda não padronizadas do sistema elétrico, oriundas de transitórios de altas frequências, representam um desafio em sua representação nos ensaios de transformadores de potência. Utilizando os recursos da transformada wavelet, este estudo avalia se os fenômenos transitórios estão abrangidos pelos ensaios dielétricos realizados nos equipamentos e apresenta o conjunto de ensaios de impulso atmosférico representativos. Este método possibilita que fabricantes e concessionárias de energia submetam os equipamentos a condições que representem os efeitos dos transitórios, através da composição adequada de formas de onda de impulso atmosférico que possam ser realizados em laboratórios de alta tensão.

#### PALAVRAS-CHAVE

Transformador de potência. Transformada wavelet. Impulso Atmosférico. Transitórios. Alta Frequência.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência estão expostos a diversos fenômenos transitórios de altas frequências, oriundos do sistema elétrico. As sobretensões transitórias são caracterizadas por sobretensões de curta duração, oscilatórias ou não oscilatórias, geralmente causadas por descargas atmosféricas ou operações com chaveamentos e implicam em solicitações de tensão sobre a isolamento interna dos equipamentos.

Os equipamentos de Alta Tensão (AT) são testados e certificados em laboratórios por meio de procedimentos normalizados, antes de sua instalação no sistema elétrico. De acordo com a IEC-60060-1 (2010) e IEEE Std 4 (2013), para avaliar a qualidade do projeto e processo de fabricação dos equipamentos são utilizados ensaios conhecidos como impulso atmosférico, do inglês, *Lightning Impulse* (LI) e Impulso atmosférico cortado, do inglês, *Chopped Lightning Impulse* (LIC), os quais possuem os seguintes parâmetros: tensão de pico ( $U_m$ ), tempo de frente ( $T_1$ ), tempo de meia cauda ( $T_2$ ) e instante de corte ( $T_c$ ). Os Transformadores são avaliados por ensaios de impulso atmosférico padrão (1,2/50  $\mu s$ ) e impulso atmosférico cortado. Neste último, para a IEEE Std 4 o corte pode ocorrer no instante de frente, no pico ou na cauda da onda, enquanto na IEC 60060-1 o corte ocorre na cauda da onda.

O princípio básico do ensaio AT expressa que as tensões devem representar as características que ocorrem com equipamentos em operação devido as várias origens, consequentemente produzir o mesmo efeito sobre o dielétrico. Apesar desta definição, é provável que as formas de onda transitórias de campo submetam o dielétrico dos transformadores a efeitos diferentes dos ocasionados pela LI 1,2/50  $\mu s$  (CIGRÉ, 2013).

Baseada na forma de onda, a IEC-60071-1 (2019) tem classificado as sobretensões transitórias como: sobretensão de frente lenta, do inglês, *slow front overvoltage*, sobretensão de frente rápida, do inglês, *fast front overvoltage* e sobretensão de frente muito rápida, do inglês, *Very Fast Front Overvoltage* (VFTO). Em geral, todas as classes de sobretensões transitórias podem ocasionar falhas nos equipamentos, mas entre as formas de onda com frente íngreme a mais severa é a VFTO. Especialmente em subestações isoladas a gás, *Gas Insulated Substation* (GIS), podem surgir VFTOs.

Um detalhe importante relativo à VFTO, apresentado pelo CIGRÉ (2014), é a relação entre estes transitórios e falhas em transformadores de potência. Considerando que o transformador é um dos equipamentos mais importantes e de maior custo no sistema elétrico, cuja confiabilidade depende do seu isolamento, é evidente a necessidade de que os ensaios de fábrica avaliem a integridade dielétrica frente as formas de onda não padronizadas de altas frequências. Os equipamentos isolados com papel impregnado de óleo, como transformadores e suas buchas, quando sujeitos a transitórios de frente íngreme oriundos de GIS, podem falhar em tensões abaixo do nível de impulso atmosférico.

Em busca de uma abordagem para solucionar estas questões alguns estudos sugerem o método analítico de integração, denominado Efeito Disruptivo, para prever a resistência de isolamento para a forma de onda não padrão, a partir dos dados de testes com a forma de onda padrão.

Outra linha de pesquisa propôs um método para conversão de formas de onda de impulso atmosférico não padrão em formas de onda de impulso atmosférico com estresse equivalente na isolamento, para uma faixa de frequência entre 0,24 à 1,0 MHz, sugerindo a possibilidade de redução das especificações de isolamento de impulso atmosférico de transformadores imersos em óleo (Okabe e Takami, 2008).

A tensão de impulso suportável, normalmente necessária como parte do ensaio de validação de fábrica do equipamento, torna-se imprescindível para validar as tensões e formas de onda de impulso a que o equipamento foi submetido.

Também é importante pontuar a dificuldade de obter nos ensaios em fábrica a onda de impulso padrão, em razão de oscilações que surgem na forma de onda. Estas podem levar a inconsistências no dimensionamento do isolamento e a consequente dificuldade em obter a coordenação de isolamento adequada. As normas IEC 60060-1 e IEEE Std 4, prescrevem a função da tensão de ensaio, denominada *k-factor*, para definir a resposta do isolamento a impulsos com oscilações.

Por tanto, torna-se necessário estudar maneiras de ensaiar os transformadores em laboratório com ondas que os submetam a condições similares as proporcionadas pelas formas de onda transitórias presentes em subestações. Considerando a dificuldade de reproduzir nos laboratórios de AT tensões com formas de onda não padronizadas, este informe técnico propõe um método para avaliar e representar os transitórios de altas frequências através da composição entre ensaios de impulso atmosférico com ondas plenas e cortadas.

Com o objetivo de obter melhor compreensão das características das formas de onda não padronizadas, a transformada wavelet é utilizada por apresentar a capacidade de avaliação simultânea nos domínios do tempo e frequência. O conhecimento da amplitude e energia dos sinais permite propor alterações nos parâmetros das tensões de impulso para representar os sinais transitórios. Os parâmetros contemplados são: tempo de frente, instante de corte e amplitude da tensão de ensaio. Outro detalhe importante é que a transformada wavelet é adequada a impulsos atmosféricos plenos e cortados pois não introduz distorções devido à sua aplicação.

O método proposto permite que as concessionárias de energia e os fabricantes de transformadores tenham condições de entender a severidade imposta ao isolamento de transformadores pelas ondas transitórias oriundas do sistema. Esta abordagem fornece uma indicação da forma de onda representativa, através da similaridade do perfil de energia e amplitude da tensão entre o sinal transitório de alta frequência e a forma de onda dupla exponencial com parâmetros de onda alterados (Wickert e Marchesan, 2021).

## 2.0 ENSAIOS DE ALTA TENSÃO

Com o objetivo de verificar se um equipamento está em conformidade com as tensões suportáveis nominais, que determinam o seu nível de isolamento, são realizados ensaios dielétricos de acordo com os procedimentos padronizados em normas, dentre as quais citam-se: IEEE Std 4 (2013), IEC 60060-1 (2010), NBR 5356-4 (2008).

As três formas de onda típicas de ensaios com impulso de atmosférico, apresentadas na Figura 1, possuem diferenças na duração e nas taxas de crescimento e de decaimento da sobretensão transitória, solicitando de modo diferenciado a isolamento dos equipamentos de alta tensão.

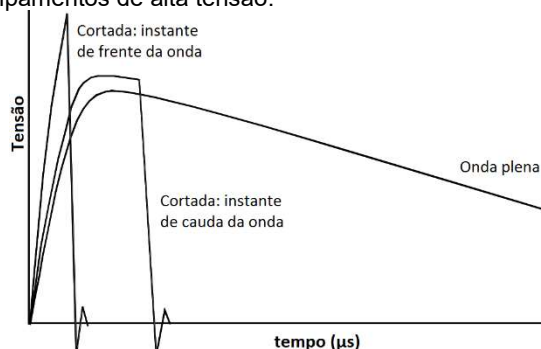


Figura 1 – Formas de onda padronizadas de impulso atmosférico

Em decorrência dos estudos realizados neste trabalho priorizarem as sobretensões transitórias de frente rápida e muito rápida, serão abordados somente os ensaios de impulsos atmosféricos.

## 3.0 MÉTODO PARA REPRESENTAR AS FORMAS DE ONDA NÃO PADRONIZADAS

Os conceitos e modelos matemáticos para cálculo da transformada wavelet são amplamente abrangidos pela bibliografia (Mallat, 1989). Destaca-se da teoria a transformada wavelet discreta baseada na análise multirresolução (AMR). Por meio desta, o sinal é decomposto em dois outros sinais que representam as baixas frequências, denominado Aproximação, e altas frequências, chamado Detalhe. Este processo é repetido com a Aproximação (A) para gerar o próximo nível de Aproximação e Detalhe (D), conforme Figura 2.

A decomposição do sinal (S) através da AMR, demonstrada na Figura 2, permite que o sinal original seja reconstruído. Esta reconstrução pode ser representada pelo o somatório da Aproximação (Aj) e Detalhe (Dj) do sinal:  $S = A_N + D_1 + D_2 + \dots + D_N$ , onde N representa a último nível de decomposição.

As análises das formas de onda são realizadas utilizando o *software* Matlab. A função base wavelet utilizada é a Daubechies (db8), pois o seu emprego apresenta excelente desempenho para ondas impulsivas, sendo capaz de detectar sinais de baixa amplitude, curta duração, decaimento rápido e oscilante (PANDEY e SATISH, 1998). Os sinais são amostrados a 100 MHz. Com base na faixa de frequência de interesse para transitórios de altas frequências, neste trabalho considerou-se a AMR nos primeiros dez níveis de decomposição, compreendendo as altas frequências (Detalhes: 48,83 kHz a 50 MHz) e baixas frequências (Aproximação: 0 a 48,83 kHz), demonstrados na Tabela 1. A reconstrução das ondas é dada por  $S=A_{10}+D_1+D_2+\dots+D_{10}$ .

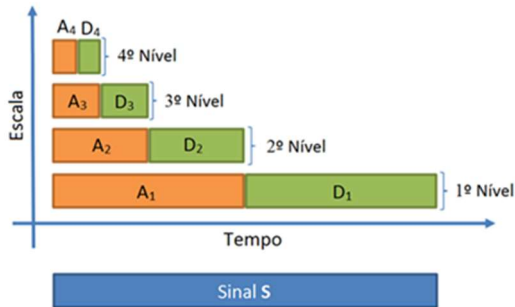


FIGURA 2 – Decomposição wavelet do sinal

TABELA 1 – Faixa de frequências por nível de decomposição

Aproximações	Faixa de Frequência (MHz)	Detalhes	Faixa de Frequência (MHz)
A1	0 - 25	D1	25 - 50
A2	0 - 12,5	D2	12,5 - 25
A3	0 - 6,25	D3	6,25 - 12,5
A4	0 - 3,125	D4	3,125 - 6,25
A5	0 - 1,5625	D5	1,5625 - 3,125
A6	0 - 0,78125	D6	0,78125 - 1,5625
A7	0 - 0,390625	D7	0,390625 - 0,78125
A8	0 - 0,195313	D8	0,195313 - 0,390625
A9	0 - 0,097656	D9	0,097656 - 0,195313
A10	0 - 0,048828	D10	0,048828 - 0,097656

A decomposição em dez níveis, coincidindo com a frequência mínima de 48,83 kHz, está fundamentada na definição de que os surtos atmosféricos correspondem as sobretensões com tempos de frente de até 20  $\mu$ s, ou seja, frequências maiores que 50 kHz.

Os distúrbios rápidos, que ocorrem de forma extremamente brusca e de forma impulsiva, são detectados em quase todas as escalas. A diminuição do  $T_1$ , por consequência aumento da frequência do sinal, resulta em maior energia nos primeiros níveis da decomposição wavelet - *Detalhes*. Para os sinais transitórios a amplitude e a frequência do sinal estão correlacionadas com a entropia ( $E_j$ ), dificultando a utilização somente deste parâmetro para classificar e representar as formas de onda não padronizadas. Para contornar esta limitação é determinada a energia wavelet relativa do sinal ( $p_j$ ). Assim obtém-se a entropia de energia wavelet, do inglês, *Wavelet Entropy Energy* (WEE), expressa na Equação (1). A WEE mudará apenas com o conteúdo da frequência. Com essa abordagem, a amplitude do sinal não interfere na distribuição da energia relativa nos níveis (ZHENG-YOU, 2011).

$$WEE = - \sum_j p_j \log_a p_j \quad (1)$$

Para a forma de onda de impulso atmosférico cortado, ao invés da entropia, o método utiliza a amplitude máxima de tensão presente nos níveis de decomposição. A Tabela 2 apresenta a amplitude máxima em cada nível de decomposição das LICs unitárias para diferentes instantes de corte ( $T_c$ ).

TABELA 2 - Distribuição da amplitude máxima para diferentes instantes de corte

$T_c$	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
0,5	0,0217	0,0229	0,0725	0,0395	0,1809	0,2892	0,2603	0,1666	0,0671	0,0308
0,75	0,0177	0,0464	0,0709	0,1158	0,1661	0,3529	0,1354	0,2288	0,1179	0,0530
1	0,0296	0,0369	0,0662	0,0609	0,2351	0,2183	0,3190	0,2460	0,1678	0,0785
2	0,0312	0,0387	0,0484	0,1615	0,2197	0,2670	0,1878	0,3401	0,2747	0,1942
3	0,0307	0,0382	0,0684	0,1217	0,1748	0,1467	0,2627	0,3501	0,1748	0,2793
4	0,0303	0,0377	0,0471	0,1153	0,1859	0,1932	0,2561	0,1835	0,3191	0,3058
5	0,0299	0,0371	0,0664	0,0513	0,1919	0,1348	0,2433	0,2363	0,4122	0,2731
6	0,0294	0,0366	0,0457	0,1526	0,1385	0,2220	0,1564	0,2598	0,3026	0,1996

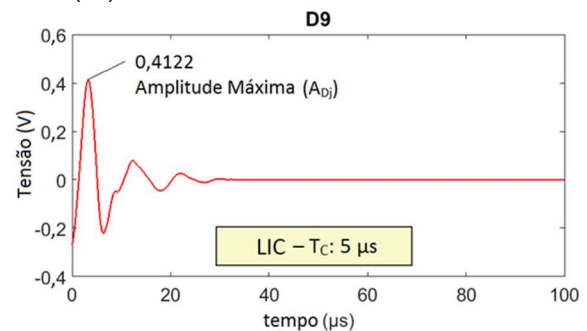


FIGURA 3 - Nível 9 da decomposição wavelet da LIC com  $T_c$  de 5  $\mu$ s

Tomando a Figura 3 como exemplo e comparando com a Tabela 2, pode-se identificar a máxima amplitude presente na decomposição wavelet, em 10 níveis, para a onda de impulso atmosférico unitária com instante de corte em 5  $\mu$ s. Para esta forma de onda a máxima amplitude ocorre no nível de decomposição 9, cuja faixa de frequência corresponde ao intervalo entre 97,66 kHz a 195,31 kHz, conforme demonstrado na Tabela 1.

#### 4.0 MÉTODO PROPOSTO

O método proposto considera a teoria da descarga, cuja probabilidade de formação de elétrons iniciais efetivos é afetada pela amplitude e tempo de duração da tensão aplicada. Quando uma onda impulso com valor de pico superior a tensão de ruptura de um isolamento é aplicada, há uma certa probabilidade para ruptura deste, mas a duração da sobretensão deverá exceder um intervalo de tempo para que isto ocorra (Kuffel e Zaengl, 2000).

No caso de transformador de potência, para avaliar os estresses dielétricos nos enrolamentos quando submetidos a ondas de impulso atmosférico não padronizadas, o documento 577A do CIGRÉ (2014) sugere que as tensões

devam ser convertidas para forma de onda padronizada de impulso atmosférico, de modo que esta conversão represente os efeitos equivalentes da forma de onda transitórias através dos ensaios dielétricos. Isto porque os surtos reais do sistema elétrico são mais íngremes e com amortecimentos mais rápidos (altas frequências) do que as ondas de impulso padrão.

Neste sentido há de se considerar que aplicação de ensaios de impulso atmosférico cortado em transformador de potência irá gerar condições de estresse na isolação, entre espiras e entre discos, mais críticas do que a onda de impulso atmosférica plena. Isto impõe a este equipamento situações semelhantes às frequentemente experimentadas por um transformador de potência em serviço. Portanto o instante de corte tem um papel importante no desenvolvimento de condições críticas para o isolamento do equipamento (Munshi et al., 1992).

Em referência ao exposto, esta seção descreve um novo método para determinar os ensaios de impulso atmosférico que representem os transitórios de altas frequências oriundos do sistema elétrico. De forma geral o método sempre determinará uma representação híbrida, ou seja, composto ao menos por uma onda LI e uma LIC padronizadas. Entretanto, para transitórios dominantes em frequências mais altas, pode ser necessária a composição com uma onda de parâmetros não normalizados (Wickert e Marchesan, 2021).

#### 4.1 Impulso Atmosférico Padrão – LI 1,2/50 µs

Para determinar as propriedades características das formas de onda, a AMR wavelet é aplicada tanto ao sinal transitório quanto à forma de onda de impulso atmosférico padronizada. Neste procedimento de conversão são removidas as componentes de alta frequência, superiores a 48,83 kHz, possibilitando assim a identificação da curva média do sinal transitório ( $V_{M,s}$ ).

Fundamentado no critério de igualdade de energia, é extraída a amplitude da tensão base da forma de onda de impulso atmosférico padrão ( $V_{b,LI}$ ), através da razão entre a energia do sinal transitório e a LI padrão unitária, descrita na Equação (2).

$$V_{b,LI} = \frac{E_{A10\_Sinal}}{E_{A10\_LIun.}} \quad (2)$$

A  $V_{b,LI}$  é considerada a tensão nominal do impulso atmosférico padrão e representa através da LI padrão a mesma energia do sinal transitório, na faixa de frequência determinada (0 - 48,83kHz).

Para um sinal de entrada do tipo transitório oscilatório em alta frequência, ou seja, sem característica evidente da forma de onda de impulso atmosférico, deve-se adotar o valor da  $V_{b,LI}$  como o valor de pico da tensão de ensaio LI representativo.

Quando o sinal de entrada for do tipo impulso atmosférico distorcido, denominado OLIW, resultante da sobreposição de tensões oscilatórias à onda de impulso, o método proposto utiliza uma transição gradual dependente da frequência e amplitude, das oscilações de tensão sobrepostas à onda de impulso atmosférico. Nesta transição são utilizados os conceitos da função de teste (*k-factor*) relacionada à rigidez dielétrica dos meios isolantes, adotado pelas normas internacionais IEEE Std 4 (2013) e IEC 60060-1(2010).

Por meio da transformada wavelet são extraídas as componentes oscilatórias residuais de altas frequências em 10 níveis de decomposição wavelet ( $D_j$ ) - faixas de frequências. Em cada um destes níveis o método proposto adota a função  $k(f)$ , referente à menor frequência representada na janela. Essa simplificação estabelece um coeficiente de segurança dos efeitos das oscilações na isolação pois sempre tende ao maior valor de  $k(f)$ , condição em que a sobretensão mais afeta a isolação e torna mais significativa sua influência na tensão de ensaio equivalente. A Figura 4 sintetiza em quatro etapas a determinação da amplitude da tensão de teste, LI 1,2/50 µs para a formas de onda não padronizadas.

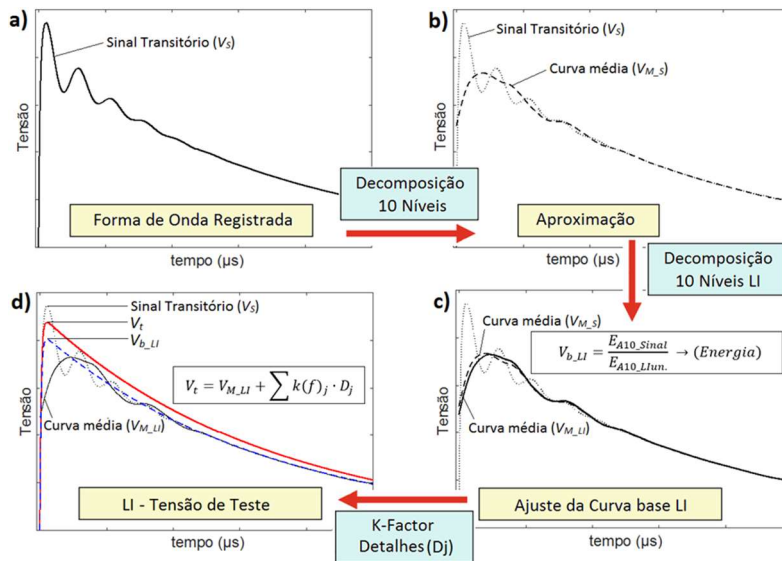


FIGURA 4 - Passos para obtenção da LI 1,2 / 50 µs representativa

A tensão de ensaio ( $V_t$ ) é definida pela Equação(3).

$$V_t = V_{M\_LI} + \sum k(f)_j \cdot D_j \quad , \quad j = 1, 2, \dots, 10 \quad (3)$$

- $V_t$  tensão de ensaio, é o valor de pico máximo da curva de tensão de ensaio processada;  
 $V_{M\_LI}$  é a curva base da onda de impulso atmosférico sem as componentes de altas frequências;  
 $k(f)$  fator de tensão de teste dependente da frequência;  
 $D_j$  decomposição do sinal na respectiva faixa de alta frequência – Detalhe;  
 $j$  nível de decomposição, correspondente à faixa de frequência.

#### 4.2 Impulso Atmosférico Cortado – LIC e Impulso Atmosférico – T1/50 $\mu$ s

No processo de definir uma LI equivalente com a mesma probabilidade de descarga disruptiva que uma forma de onda transitória, assume-se que a tensão de teste pode não atingir a amplitude máxima de tensão para todo o espectro de frequência do sinal original. Esta avaliação fica evidente em uma análise simultânea nos domínios do tempo e frequência.

Porém nos transitórios as mudanças bruscas de tensão podem apresentar condições severas para o sistema de isolamento de determinados equipamentos. Na conversão da forma de onda não padrão em uma LI equivalente estas alterações bruscas acabam sendo suavizadas. Neste sentido o método propõe que, além da LI equivalente, os equipamentos sejam submetidos a ensaios com forma de onda do tipo impulso atmosférico cortado.

Considerando que o instante de corte da forma de onda de impulso atmosférico influencia diretamente no espectro de frequência que apresentará máxima amplitude de tensão, o método estabelece que sejam utilizadas LICs com instante de corte que representem o sinal transitório em todos os níveis de decomposição da transformada wavelet. Os instantes de corte adotados correspondem aos valores previstos em norma. Os procedimentos adotados para identificar as LICs representativas são descritos a seguir.

O primeiro passo é identificar o nível de decomposição do sinal transitório que apresenta a máxima amplitude ( $A_{Dj}$ ). Com essa definição é selecionada a LIC unitária cuja máxima amplitude corresponda ao mesmo nível de decomposição do sinal transitório. A razão entre os vetores ( $A_{Dj\_S}$  e  $A_{Dj\_LIC\_un.}$ ) estabelece um novo vetor denominado Relação de Amplitude ( $RA$ ), conforme descrito pela Equação (4).

$$\begin{aligned} A_{Dj\_S} &= [A_{D1}, A_{D2}, \dots, A_{D10}] \\ A_{Dj\_LIC\_un} &= [A_{D1}, A_{D2}, \dots, A_{D10}] \\ RA &= \frac{A_{Dj\_S}}{A_{Dj\_LIC\_unit}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$RA = [A_{D1\_resultante}, A_{D2\_resultante}, \dots, A_{D10\_resultante}]$$

Desta maneira o vetor  $RA$  reúne as características em cada nível de decomposição, sendo utilizado como entrada para determinar a composição de ondas de impulso atmosférico que representam o transitório para a faixa de frequência de 48,83 kHz a **50 MHz**. Destacam-se três situações referentes as faixas de frequência com dominância do transitório:

- ✓ 48,83 kHz – 390,62 kHz (Níveis de decomposição: D8 a D10) – Instante de corte na Cauda: 2 a 6  $\mu$ s
- ✓ 390,62 kHz – 3,12 MHz (Níveis de decomposição: D5 a D7) – Instante de corte na frente da onda 0,5 a 1  $\mu$ s podendo ser complementada por impulso cortados na cauda de 2 a 6  $\mu$ s.
- ✓ 3,12 MHz – 50 MHz (Níveis de decomposição: D1 a D4) – Além das LICs com tempos de corte nos instantes de frente e cauda da onda, é necessária uma LI com tempo de frente inferior a 1,2  $\mu$ s.

A forma de onda dupla exponencial (T1/50  $\mu$ s) foi utilizada para obter a relação entre  $T_1$  e WEE. Para as ondas mais íngremes, com menor  $T_1$ , maior é a energia presente nos primeiros níveis de decomposição, alta frequência. A partir do perfil da distribuição WEE em relação a  $T_1$ , uma representação matemática é determinada, considerando  $T_1$  entre 0,044  $\mu$ s a 1,7  $\mu$ s. A Equação apresentada na Figura 5, é proposta para estimar o  $T_1$  da LI que resulte em um valor da WEE similar ao sinal transitório.

A tensão de pico da LI T1/50  $\mu$ s é oriunda da amplitude máxima presente no vetor  $RA$  entre os detalhes D1 a D4.

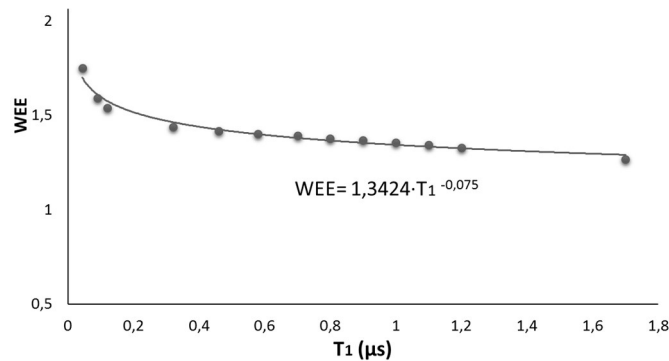




FIGURA 5 – LI: variação da WEE com o respectivo T1

Cada faixa de frequência geralmente corresponde a alguns fenômenos transitórios. O método engloba o espectro de frequência correspondente aos ensaios dielétricos padronizados para transitórios de frente rápida até a frequência de 50 MHz. Esta faixa abrange os fenômenos mais usuais e atende a uma das classificações mais aceitas, para as diretrizes de modelagem de equipamentos de potência, proposta pela norma IEC TR 60071-4 (2004), cuja classificação considera como transitórios de frente rápida a faixa de frequência de 10 kHz à 3 MHz e como transitórios de frente muito rápida de 100 kHz à 50 MHz (MARTINEZ-VELASCO, 2010).

No fluxograma da Figura 6 são demonstradas as principais etapas do método proposto para representar as formas de onda transitórias através de ensaios do tipo impulso atmosférico.

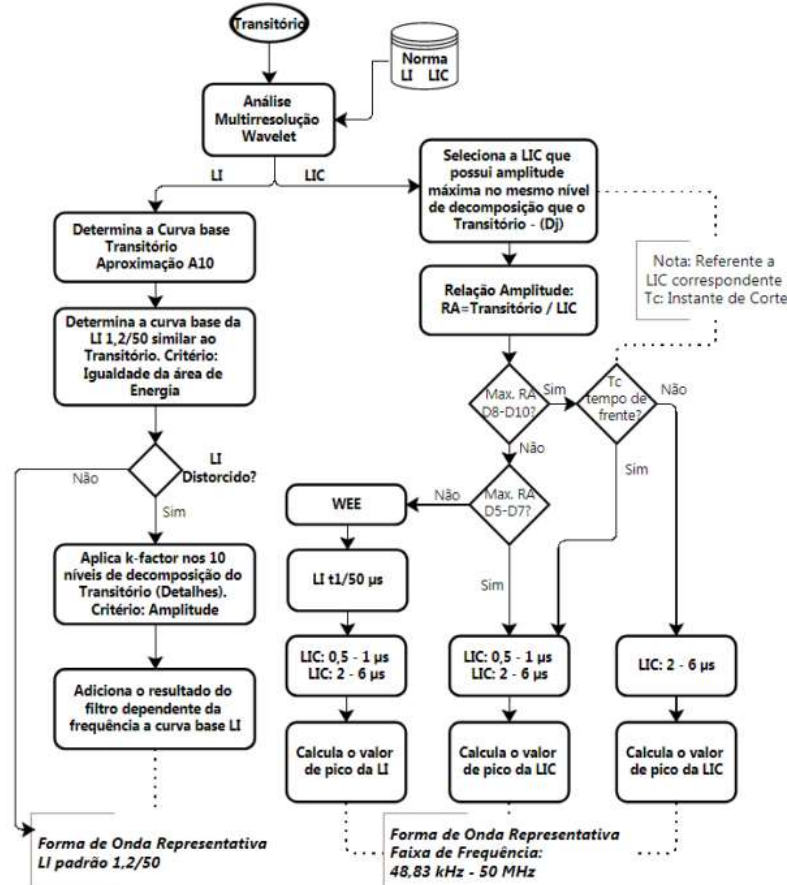


FIGURA 6 – Fluxograma macro para implementação do método proposto (Wickert e Marchesan, 2021)

## 5.0 VALIDAÇÃO

A avaliação dos resultados é baseada em simulações e análise comparativa com dados experimentais e métodos desenvolvidos por outros autores no estado da arte. Para isso, são apresentados três estudos de caso e uma comparação com dados experimentais.

**Caso 1:** Forma de onda de impulso atmosférico sobreposta por oscilações de 100 kHz, denominada OLIW. A Figura 7 demonstra, para a faixa de frequência até 48 kHz, a onda de impulso atmosférico plena de ensaio ( $V_t$  – LI1,2/50) com tensão de pico de 128 kV e os principais parâmetros utilizados pelo método.

A Tabela 3 mostra a análise realizada seguindo as etapas do fluxograma. Após aplicar a AMR wavelet no sinal, é identificada a máxima amplitude ( $A_{Dj,s}$ ) e selecionada a LIC ( $A_{Dj,LIC}$ ) correspondente. A razão entre os vetores resultará no RA. Considerando que RA possui a máxima amplitude no nível de decomposição D8 e o tempo de corte para a LIC selecionada ocorre na cauda da onda, o método define como forma de onda representativa a LIC com  $T_c$  em 5  $\mu s$  e tensão de pico 101,03 kV. É necessário enfatizar que existem outras duas LICs que também apresentam a máxima amplitude em D9 (LIC4 e LIC6), entretanto, o método adota como premissa a utilização da LIC que resulte em menor  $V_t$ . Isto não impede que seja adotada uma destas LICs como representativa, resultando apenas na adequação da amplitude correspondente. Assim, garante-se que ao adotar a amplitude máxima do vetor RA, resultante da LIC correspondente, o transitório será representado para toda a faixa de frequência (48,83 kHz à 50 MHz), demonstrando a versatilidade do método.



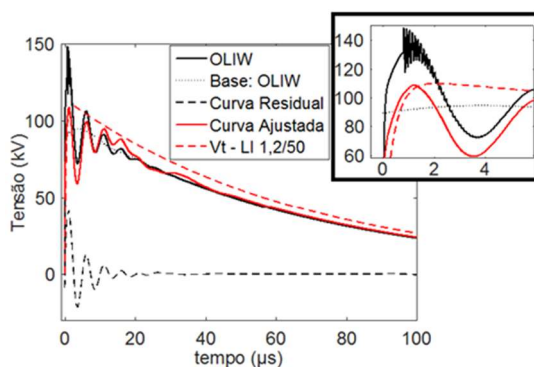


FIGURA 10 - OLIW

Os dados obtidos no desenvolvimento do método proposto demonstraram um desempenho similar ao método *k-factor*, com diferenças máximas das tensões de teste LI inferior a 5,37%. Deve-se considerar que a função de teste do método *k-factor* foi obtida para a probabilidade de 50% de descarga disruptiva para cada meio dielétrico. Utilizou-se ainda a curva do comportamento médio de cinco meios dielétricos: ar, SF6, XLPE, óleo e papel-óleo. Apesar do método *k-factor* ser indicado para formas de onda de impulso atmosférico distorcido, torna-se complexo determinar a tensão equivalente para múltiplas frequências sobrepostas como o Caso 3.

Ao contrapor os resultados com o método apresentado para transformadores de potência, método de Okabe, observa-se que a diferença máxima com o método proposto se situa entre -3,2% e 7,84%.

Os métodos consagrados dispostos na literatura consideram a equivalência entre forma de onda não padrão e LI. Entretanto, ao representar uma onda não padrão através de uma LI, as oscilações bruscas não são consideradas. Neste sentido, um dos grandes diferenciais do método proposto reside na complementação entre formas de onda LI e LIC. Desta forma é possível representar a forma de onda transitória considerando as oscilações bruscas a partir da LIC, utilizando tanto o critério de igualdade de energia como a amplitude de tensão por faixas de frequência.

A Tabela 6 apresenta a aplicação do método para os três casos apresentados.

TABELA 6 – Formas de onda de impulso atmosférico representativas

Caso	Onda	Método Proposto				Okabe		k-Factor	
		t1 (μs)	t2 (μs)	Tc (μs)	Um (kV)	Um (kV)	%	Um (kV)	%
1	LI	1,2	50	-	128	132,15	-3,06	136,37	-5,37
	LIC	1,2	50	5	101,03	-	-	-	-
2	LI	1,2	50	-	113,2	110,77	2,19	118,97	-4,85
	LIC	1,2	50	1	99,3	-	-	-	-
3	LIC	1,2	50	2	51,23	-	-	-	-
	LI	1,2	50	-	110	-	-	-	-
	LIC	1,2	50	6	77,71	-	-	-	-
	LIC	1,2	50	1	51,37	-	-	-	-
	LI	0,09	50	-	101,6	-	-	-	-

Para validar e demonstrar a potencialidade do método proposto, são utilizados os dados experimentais da pesquisa Guo (2020). Em específico a forma de onda transitória com frequência de oscilação de 310 kHz para a tensão de ruptura de  $U_{50\%}$ , considerando apenas o nível de partículas previstos em norma, ver Figura 11.

A Tabela 7 apresenta os principais parâmetros utilizados pelo método proposto para determinar a amplitude da LI.

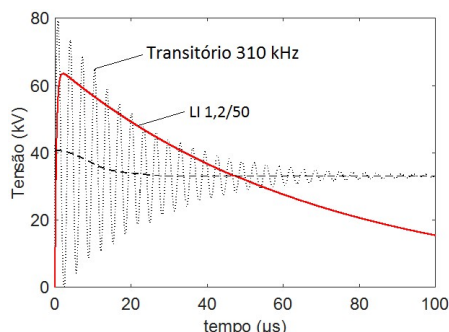


FIGURA 11 – Representação do transitório por LI

Os dados experimentais apresentados em Guo (2020) apontam que a tensão de ruptura  $U_{50\%}$  para a LI equivalente é de 61,38 kV em relação ao transitório oscilatório. Ao comparar com o método proposto observa-se uma diferença de 3,44%. A Figura 11 apresenta a forma de onda transitória oscilatória avaliada por ambos métodos e a LI representativa identificada pelo método proposto.

TABELA 5 - Avaliação da LIC e LI representativas (método)

Detalhe	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
Adj_Sinal	5276	13590	12084	12068	12077	5657	9524	20187	<b>20993</b>	8269
Adj_LIC6	0,029	0,037	0,046	0,153	0,138	0,222	0,156	0,260	<b>0,303</b>	0,200
RA	179227	<b>371327</b>	264152	79066	87213	25477	60884	<b>77718</b>	69377	41431
Adj_LIC1	0,030	0,037	0,066	0,061	0,235	0,218	0,319	0,246	0,168	0,079
RA "LIC1"	178216	368746	182403	198046	<b>51364</b>	25910	29851	82065	125097	105309
Adj_LI0,09/50	0,067	0,170	0,116	0,135	0,108	0,035	0,036	0,034	0,036	0,036
RA "LI0,09/50"	78519	79788	<b>104328</b>	89129	111763	159510	265975	597990	<b>581111</b>	228219
Método	<b>104328 V</b>			<b>51364 V</b>			<b>77718 V</b>			
	LI 0,09/50			LIC1			LIC6			

TABELA 7 – Avaliação da LI representativa

Parâmetros			Transformada Wavelet
Forma de Onda	f (kHz)	Vmax (V)	Entropia (EA10)
Transitório	310	79140	338567589,51
LI 1,2/50 (un)	-	1	5332,39
<b>LI 1,2/50 - Tensão de teste Vt (kV)</b>			<b>63,49</b>



## CONCLUSÕES

Este trabalho concentrou esforços na consolidação de um método para a determinação de testes de impulso atmosférico que atestem a suportabilidade dielétrica para formas de onda transitória não padronizadas nos ensaios de equipamentos de alta tensão. O modelo baseia-se nas características de decomposição dos sinais, utilizando a análise multirresolução da transformada wavelet. Informações adicionais referente ao método proposto podem ser verificadas em Wickert (2021).

Como conclusão verifica-se a importância do teste com tensão de impulso atmosférico cortado, dada sua capacidade em representar as bruscas variações de tensão das ondas transitórias. Um dos grandes diferenciais do método reside no fato de contemplar a identificação precisa do instante de corte da forma de onda de impulso que represente as variações bruscas das tensões transitórias no domínio do tempo e da frequência.

Com isso cada etapa do método proposto torna-se reproduzível e padronizada. Isso é importante para evitar erros, conduzindo todas as análises com base na transformada wavelet. A técnica é adaptável para aplicações com faixas de frequências diferentes e dados obtidos através de oscilogramas de medições. Entretanto, deve-se ter o cuidado para fazer todas as análises na mesma faixa de frequência.

O que se busca é reunir formas de onda de impulso atmosférico que possuam severidade similar as formas de onda não padronizadas impostas aos transformadores pelo sistema. Assim, a aplicação deste método possibilita que fabricantes de transformadores e concessionárias de energia submetam os transformadores de potência a condições que representem os efeitos dos transitórios, através da composição adequada de tensões de teste de impulso atmosférico que possam ser realizados em laboratórios de alta tensão (Wickert e Marchesan, 2021).

## BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356-4: Transformadores de potência. Parte 4: Guia para ensaio de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2008.
- CIGRÉ WG-C4-306. Insulation Coordination for UHV AC Systems. Brochure 542, 2013.
- CIGRÉ JWG-A2/C4.39. Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System. Brochure 577A. Part 1 – Expertise, Apr. 2014.
- GUO, R. et al. Breakdown characteristics of transformer oil with cellulose particles in a non-uniform field under lightning impulse voltage. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 5, pp. 1627-1635, Oct. 2020.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60060-1. High voltage teste techniques – Part 1: general definitions and test requirements. Genebra. 2010.
- KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S. Electrical Breakdown in gases. In: *High Voltage Engineering – Fundamentals*. 2nd ed. Oxford: BTCV, 2000. Chapter 5, pp. 295-297 and 359-365.
- MARTINEZ-VELASCO, J. A. Parameter Determination for Electromagnetic Transient Analysis in Power Systems. In: *Power System Transients: Parameter Determination*. Ed. Boca Raton, FL, USA: CRC, 2010. Cap. 1, p. 1-16.
- MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE PAMI* vol. 11, no. 7, pp. 674-693, Jul 1989.
- MUNSHI, S.; ROY, C. K.; BISWAS, J. R. Computer studies of the performance of transformer windings against chopped impulse voltages. *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, 139 (3), pp.286-294, May 1992.
- OKABE, S; TAKAMI, J. Evaluation of Breakdown Characteristics of Oil-immersed Transformers under Non-standard Lightning Impulse Waveforms – Method for Converting Non-standard Lightning Impulse Waveforms into Standard Lightning Impulse Waveforms. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol.15, n.5, pp.1288-1296, Oct. 2008.
- PANDEY, S. K. and L. SATISH, L. Multiresolution signal decomposition: a new tool for fault detection in power transformers during impulse tests. *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 13, no. 4, pp. 1194-1200, Oct. 1998.
- THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 4-2013. IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques. New York, NY. 2013.
- WICKERT, H. M. Uma Abordagem para Atestar a Suportabilidade Dielétrica a Formas de Onda não Padronizadas nos Ensaios de Equipamentos de Alta Tensão. 123 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica).- Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, RS, 2021.
- WICKERT, H. M.; MARCHESAN, T. B. A method for representing non-standard waveform in factory tests using impulse waveforms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3129603.
- ZHENG-YOU, H. et al. Study of a new method for power system transients classification based on wavelet entropy and neural network. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, pp. 402-410, Mar 2011.

**DADOS BIOGRÁFICOS**

HUMBERTO MARGEL WICKERT possui graduação em Engenharia Elétrica (2013) pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos e Doutorado em Engenharia Elétrica (2021) pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Trabalha no Sistema Elétrico, Área de Transmissão, desde o ano de 2006, tendo atuado na Engenharia de Transformadores de Potência e de Instrumentos, Gerência de Operação e Manutenção (O&M) e atualmente na área de Pós-Operação da CPFL Transmissão.

**(2) TIAGO BANDEIRA MARCHESAN**

Tiago Bandeira Marchesan possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2003- with first class honours) e doutorado em Engenharia Elétrica (2007) pela mesma Universidade, com estágio na Universidad de Oviedo, España. É diretor do Centro de Tecnologia da UFSM desde 2017. Foi Coordenador de Transferência de Tecnologia da UFSM (2014-2017). Atua como Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CAPES conceito 6) e professor do Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência da mesma Universidade. É Pesquisador no Instituto de Redes Inteligente e Unidade EMBRAPII.

**(3) RODINEI CARRARO**

Engenheiro de Manutenção, atuando em área técnica de engenharia de manutenção especializada de transformadores de potência e de instrumentos. Atua como engenheiro coordenador da Manutenção de Transformadores, área que planeja, programa e executa manutenção especializada de transformadores de Potência, Corrente e Potencial, Comutadores, Buchas, e Subestação Móvel.