

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

**Análise de falhas em transformadores de distribuição  
durante o ensaio de impulso atmosférico**

**Paulo Vitor Peclat de Oliveira Tavares**

**Itajubá, julho de 2021**

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

**Paulo Vitor Peclat de Oliveira Tavares**

**Análise de falhas em transformadores de distribuição  
durante o ensaio de impulso atmosférico**

**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. Estácio Tavares Wanderley Neto**

**Julho de 2021**

**Itajubá-MG**

# **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço a Deus, pois pela graça me salvou, mediante a fé, e isso não veio de mim, é dom Deus.

Aos meus pais, pelo esforço e dedicação para a minha formação acadêmica e moral, sem as quais não estaria aqui hoje.

Aos meus familiares e amigos, que de alguma forma participaram deste trabalho.

À Ana Flávia, pela compreensão e paciência ao longo do meu mestrado.

Ao professor Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto pela orientação, por acreditar em meu trabalho e por todas as oportunidades que recebi, as quais sou muito grato.

Aos colegas do LAT-EFEI, pelos ensinamentos e companheirismo.

*"Eu sou é eu mesmo. Diverjo de todo o mundo... Eu quase que nada não sei. Mas desconfio de muita coisa. O senhor concedendo, eu digo: para pensar longe, sou cão mestre – o senhor solte em minha frente uma idéia ligeira, e eu rastreio essa por fundo de todos os matos, amém!" (Guimarães Rosa, Grande Sertão: Veredas)*

## RESUMO

Devido à importância do transformador para o sistema elétrico, diversos ensaios normalizados são prescritos para garantir o seu bom funcionamento quando em operação, sendo um deles o ensaio de impulso atmosférico. A detecção de falhas durante o ensaio de impulso atmosférico pode ser realizada por diferentes métodos, e a análise, muitas vezes, pode ser subjetiva e depender da experiência do avaliador. Desta forma, este trabalho propôs revisar as principais técnicas de análise falhas em transformadores, testá-las e reavaliá-las para transformadores de distribuição, uma vez que boa parte da literatura existente se refere a transformadores de alta tensão. Foram consideradas para este trabalho os métodos de detecção de falhas no domínio do tempo e da frequência. Para o domínio do tempo, foram analisadas a sensibilidade de diferentes tipos de medições, a relação entre o sentido das correntes medidas com o tipo de falha que ocorre no transformador, bem como a relação entre a ocorrência de sinais de alta frequência no transformador e a presença das descargas parciais. No domínio da frequência, foram analisadas a capacidade da técnica de comparar diferentes formas de onda, inclusive impulsos plenos e cortados, a relação entre a atenuação ou deslocamento do polo ressonante da resposta com o tipo de falha que ocorreu no transformador. Os resultados obtidos permitiram comprovar os pontos avaliados, com a exceção da caracterização das falhas no domínio da frequência, no qual não foi possível encontrar a relação entre a função de transferência com o tipo de falha no transformador. A função coerência foi avaliada como uma ferramenta capaz de determinar a faixa de frequência confiável para análise no domínio da frequência, e como um indicador numérico que pode diminuir a subjetividade da identificação de falhas.

Palavras-chave: descargas parciais, ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico, falhas, fft, função coerência, transformador.

## **Abstract**

Due to its importance to the electric power system, transformers are subjected to normalized electric tests in order to guarantee its proper functioning in operation conditions, one of which is the lightning impulse test. Failure detection during the lightning impulse test can be accomplished through different methodologies and the analysis can be subjective and dependent of the evaluator's experience. Thus, the purpose of this work is to revisit the main failure analysis techniques for transformers, then test and reevaluate them for distribution transformers, since most of the existent literature refers to high voltage transformers. The considered methods for this work were the failure detection in the time and frequency domains. For the time domain, the sensibility of different types of measurements, the relation between the direction of the measured current with the type of failure that occurs in the transformer, as well as the relation between the occurrence of high frequency signals and the presence of partial discharges in the transformer were analyzed. In the frequency domain, the capacity of the technique to compare different waveforms, including full and chopped lightning impulses, the relation between the attenuation or shift of the resonant pole of the response with the type of failure that occurred in the transformer were analyzed. The results verified the evaluated topics, with the exception of the failure characterization in the frequency domain, in which it was not possible to find the relation between the transfer function and the type of failure in the transformer. The coherence function was evaluated as a tool capable of determining the reliable frequency range for analysis in the frequency domain and, as a numerical indicator, reducing the subjectivity of fault identification.

**Keywords:** transformer, lightning impulse test, failure, FFT, partial discharges.

## Lista de Figuras

Figura 1: Parâmetros de tempo do IAP.....	19
Figura 2 – Tensão de impulso atmosférico cortado na cauda.....	19
Figura 3 – Circuito típico de ensaio de impulso.....	21
Figura 4 - Ligações dos terminais, em ensaios de impulso atmosférico e métodos de detecção de falha. Fonte: Retirado de [5]. .....	22
Figura 5 – Comparação entre impulsos atmosféricos. Fonte: Adaptado de [28].....	23
Figura 6 - Representação da isolação do transformador – Fonte: Adaptado de [35]. ..	25
Figura 7 – Modelo de um enrolamento do transformador - Fonte: Adaptado de [36].	25
Figura 8: Descargas parciais em um meio isolante. Fonte: Retirado de [38]. .....	26
Figura 9 – Comparação entre impulsos atmosféricos com e sem falha, curto-circuito do enrolamento ensaiado. Fonte: Adaptado de [28]. .....	27
Figura 10 – Comparação entre impulsos atmosféricos com e sem falha, com medição da corrente transferida capacitivamente. Fonte: Adaptado de [28]. .....	28
Figura 11 – Definição de aditividade. Adaptado de [49].....	33
Figura 12 – Descrição de um sistema linear. Fonte: Retirado de [45]. .....	34
Figura 13 – Sinal com 16 pontos. Fonte: Adaptado de [49]. .....	34
Figura 14 - Sinal da Figura 13 decomposto em sinais senos. Fonte: Adaptado de [49]. .....	35
Figura 15 – FT de um transformador. Fonte: Adaptado de [45]. .....	36
Figura 16 – Densidade de amplitude $F(f)$ de diferentes tensões e correntes impulsivas. 1 – Impulso de manobra 250/2500 $\mu$ s; 2 – Impulso atmosférico 0,84/60 $\mu$ s; 3 – Impulso atmosférico 1,5/50 $\mu$ s; 4 – Função triangular ( $t_c = 0,5 \mu$ s); 6 – Impulso de corrente 8/20 $\mu$ s. Fonte: Retirado de [51]. .....	37
Figura 17 – Resolução vertical. Fonte: Adaptado de [52]. .....	38
Figura 18 – Impulsos atmosféricos plenos. Fonte: Retirado de [29]. .....	41
Figura 19 – FT dos IAP da Figura 18. Fonte: Retirado de [29]. .....	41
Figura 20 – Função coerência para analisar a FT, Figura 19. Fonte: Retirado de [29].	41
Figura 21 – FT sem falha e com falha entre espiras. Fonte: Adaptado de [46]. .....	42
Figura 22 – FT sem falha e com descargas parciais. Fonte: Adaptado de [46]. .....	43
Figura 23 – Medição da FT pelo método SFRA. Fonte: Adaptado de [48]. .....	46
Figura 24 – Conexões do transformador TR1 ensaiado. Fonte: O autor. .....	47
Figura 25 – Tensões e correntes da 1° e 12° aplicação. Fonte: O autor. .....	56

Figura 26 - Resposta em frequência dos registros e pelo método SFRA. Fonte: O autor. .....	57
Figura 27 -Sinais de tensão e corrente para faltas série, corrente de neutro. Fonte: O autor. ....	58
Figura 28 - Sinais de tensão e corrente para faltas <i>shunt</i> , corrente de neutro. Fonte: O autor. ....	60
Figura 29 - Sinais de tensão e corrente para faltas série, corrente de linha. Fonte: O autor. .....	61
Figura 30 - Sinais de tensão e corrente para faltas <i>shunt</i> , corrente de linha. Fonte: O autor. ....	62
Figura 31 - Sinais de alta frequência no transformador TR5. Fonte: O autor. ....	63
Figura 32 - Diferentes formas de onda no domínio do tempo. Fonte: O autor.....	65
Figura 33 – Resposta em frequência dos impulsos aplicados. Fonte: O autor. ....	66
Figura 34 – Corrente no domínio da frequência. Fonte: O autor.....	67
Figura 35 – Tensão no domínio da frequência. Fonte: O autor. ....	67
Figura 36 – FT dos impulsos com medição da corrente de neutro. Fonte: O autor.....	69
Figura 37 – FT dos impulsos com medição da corrente de linha. Fonte: O autor.....	70
Figura 38 – Tensão e corrente para falha com resistência de 350 $\Omega$ , medição da corrente de neutro. Fonte: O autor. ....	71
Figura 39 – FT e função coerência para falha com resistência de 350 $\Omega$ , medição da corrente de neutro. Fonte: O autor. ....	72
Figura 40 – FT e função coerência do transformador TR5. Fonte: O autor. ....	74
Figura 41– FT e função coerência do transformador TR3. Fonte: O autor. ....	75

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Pontos das falhas.....	48
Tabela 2 - Transformadores ensaiados .....	50
Tabela 3 – Característica das formas de onda aplicadas no TR1. ....	50
Tabela 4 – Relação do fluxo .....	54
Tabela 5 – Soma dos fluxos após uma sequência de aplicações .....	55
Tabela 6 – Medições de descargas parciais e sinais de alta frequência.....	63
Tabela 7 – Medições de descargas parciais e sinais de alta frequência agrupados. ....	64

# Nomenclatura e Simbologia

IA – Impulso Atmosférico

FT – Função de Transferência

FFT – Transformada Rápida de Fourier

LAT-EFEI – Laboratório de Alta Tensão Professor Manuel Luís Barreira Martinez

STFT – Transformada de Fourier de Curto Tempo

WT – Transformada *Wavelet*

ANN – Redes Neurais Artificiais

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem

IAP – Impulso Atmosférico Pleno

T<sub>1</sub> – Tempo de frente

T<sub>2</sub> – Tempo até meio valor ou tempo de cauda

T – diferença entres os instantes onde a tensão chega a 90% e 30% do pico durante a subida da tensão

IAC – Impulso Atmosférico Cortado

T<sub>c</sub> – Tempo de corte

IEC – *International Electrotechnical Commission*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBI – Nível Básico de Isolamento

C<sub>s</sub> – Capacitância série

C<sub>g</sub> – Capacitância terra

L – Indutância própria

M – Indutância mútua

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

N – Número de pontos

CF – Função coerência

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1.	Objetivos.....	15
1.2.	Metodologia proposta.....	16
1.3.	Estrutura do trabalho.....	16
2.	IDENTIFICAÇÃO DE FALHA NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	18
2.1.	O Ensaio de impulso atmosférico.....	18
2.1.1.	Formas de onda e sequência de ensaio.....	18
2.1.2.	Arranjo de ensaio.....	20
2.1.3.	Metodologia de avaliação dos resultados.....	22
2.2.	Interpretação dos resultados.....	24
2.2.1.	Modelo do transformador.....	24
2.2.2.	Interpretação dos resultados.....	26
2.3.	Hipóteses a serem testadas.....	30
3.	IDENTIFICAÇÃO DE FALHA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	32
3.1.	A Função de transferência.....	32
3.2.	Tratamento digital dos sinais.....	36
3.3.	Função coerência.....	39
3.4.	Caracterização de falhas no domínio da frequência.....	42
3.5.	Hipóteses a serem testadas.....	44
4.	METODOLOGIA E INSTRUMENTOS.....	45
4.1.	Hipótese I.....	45
4.2.	Hipóteses II, III, IV.....	46
4.3.	Hipótese V.....	49
4.4.	Hipótese VI.....	50
4.5.	Hipótese VII.....	51

4.6. Hipótese VIII .....	51
4.7. Instrumentos.....	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
5.1. Hipótese I: O equipamento sob ensaio é linear em toda a faixa de tensão a qual ele foi submetido.....	53
5.2. Hipóteses II, III e IV .....	57
5.3. Hipótese V: Sinais de alta frequência são indícios de descargas parciais .....	62
5.4. Hipótese VI: Resposta em frequência não é influenciada pela forma de onda aplicada para uma determinada faixa de frequência. ....	65
5.5. Hipóteses VII: Falhas entre espiras provocam um deslocamento dos polos ressonantes da admitância calculada.....	69
5.6. Hipóteses VIII: Descargas parciais são detectadas no domínio da frequência pela atenuação dos polos ressonantes da admitância calculada .....	73
6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....	76
6.1. Conclusão.....	76
6.2. Trabalhos futuros .....	78
REFERÊNCIAS .....	79

# 1. INTRODUÇÃO

A isolação elétrica de um transformador é crucial para seu bom funcionamento uma vez que, em operação, estará sujeita a diferentes solicitações de tensão. Desse modo, a fim de avaliar o projeto da isolação dos transformadores, estes devem ser submetidos a diferentes ensaios, previstos por normas [1, 2, 3], que testam o dielétrico do equipamento.

Um dos principais ensaios dielétricos é o de suportabilidade ao impulso atmosférico (IA), que visa reproduzir, em laboratório, os esforços elétricos que o transformador sofreria em campo frente a descargas atmosféricas. Neste ensaio, os transformadores são submetidos a uma sequência de aplicações de tensões de impulso atmosférico normalizados. Com as medições realizadas durante esta sequência, é possível verificar se há alguma falha de isolação no transformador analisando-se os sinais registrados.

Tanto a norma brasileira quanto as internacionais definem os procedimentos de ensaio sem muitas margens para alterá-los, porém, isto não é observado quanto aos métodos para detectar falhas no equipamento. Por exemplo, é estabelecida a necessidade de medir a tensão aplicada e pelo menos um outro transitório característico [4, 5], ou seja, a escolha dos outros registros é opcional, sendo eles: corrente no neutro, corrente no enrolamento sob ensaio, corrente transferida a um enrolamento adjacente, corrente no tanque, tensão transferida a um enrolamento não ensaiado e corrente de linha.

Ao definir os registros que serão avaliados, o operador deve avaliar a repetibilidade entre os sinais obtidos durante o ensaio, pois ela comprovará que o transformador manteve suas características. No caso de diferenças entre os sinais registrados, estas poderão indicar falhas de isolação do equipamento.

Dependendo da situação observada, a análise dessas diferenças pode enfrentar algumas dificuldades. Há irregularidades que podem aparecer com grau menor do que o necessário para serem observadas nos registros, e quando forem sensíveis o suficiente deve-se determinar se são provenientes de falhas ou outras causas. “Esta tarefa requer perícia, sendo frequentemente difícil, mesmo com considerável experiência, decidir quanto ao significado das discrepâncias, em vista do grande número de possíveis fontes de perturbação” [5]. Essas perturbações podem ter origem no circuito de ensaio, no circuito de medição e nas práticas de aterramento [5].

Hoje, além das dificuldades citadas anteriormente, os laboratórios que realizam ensaio de impulso atmosférico em transformadores, principalmente em transformadores de distribuição<sup>1</sup>, têm dificuldade de dar um diagnóstico além do aprovado ou reprovado, ou seja, dificilmente há uma caracterização do tipo de falha que ocorreu e a sua localização ao longo do enrolamento do transformador. Isto é devido à pouca literatura que há para avaliar transformadores de distribuição e a dificuldade de se estudar estas falhas, pois os laboratórios de ensaio, em geral, não possuem a alternativa de investigar o transformador internamente.

“Diversas técnicas têm sido usadas ao longo dos anos para diagnóstico de falha durante o impulso em transformadores, incluindo análise manual dos oscilogramas, análise no domínio da frequência e técnicas modernas de processamento digital de sinais [...]” [6]. A primeira técnica é, basicamente, a mencionada anteriormente que analisa os registros obtidos durante os ensaios, sendo a mais usada e o padrão previsto nas normas vigentes e foi largamente estudada por diversos autores [7, 8, 9].

Com o desenvolvimento da tecnologia e a utilização de digitalizadores<sup>2</sup> em laboratórios de alta tensão [10, 11] surgem as técnicas de processamento digital de sinais, entre elas destaca-se a análise no domínio da frequência, que calcula a Função de Transferência (FT) do transformador [12, 13, 14] por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Esta técnica propôs não apenas melhorar a capacidade de caracterização da falha, mas também diferenciar quando as discrepâncias dos sinais provêm de falhas no transformador ou de perturbações externas. Esta diferenciação é possível pois, teoricamente, a função de transferência do transformador é imutável caso o equipamento não apresente mudanças das suas características, independente de os registros apresentarem alterações provenientes de fatores externos.

Surgem então as técnicas modernas de processamento digital de sinais, que podem ser consideradas aquelas que utilizam ferramentas como a Transformada de Fourier de Curto Tempo (STFT) e a Transformada *Wavelet* (WT) [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Estas ferramentas, incluindo a FFT foram, posteriormente, aplicadas a Redes Neurais Artificiais (ANN) [25] e Lógica *Fuzzy* [26, 27].

---

<sup>1</sup> Normalmente os ensaios em transformadores de potência são realizados nas instalações do fabricante. Como o fabricante tem conhecimento do projeto do transformador e a possibilidade de abri-lo este diagnóstico é facilitado.

<sup>2</sup> O termo “Digitalizadores” refere-se a um instrumento digital que realiza a medição de uma tensão ou corrente temporariamente, mas pode ser registrada permanentemente em um formato digital e, futuramente, ser recuperada. Antes do uso dos digitalizadores usava-se instrumentos analógicos, e fotografias dos sinais gerados eram feitas para se ter os registros salvos.

O uso das ferramentas STFT e WT demonstraram-se promissoras, uma vez que elas são adequadas às aplicações que possuem sinais do tipo não-estacionário, característica dos registros obtidos durante o ensaio de impulso, e possibilitarem a detecção do instante em que a falha ocorreu. Porém, não é possível concluir o diagnóstico do transformador sem antes ter um conhecimento consolidado nas técnicas de análise tradicionais com foco em transformadores de distribuição.

Portanto, este trabalho utiliza, entre as ferramentas citadas, a análise dos sinais no domínio do tempo e da frequência pela FFT. O principal fato que influenciou nesta decisão é a presença desses dois métodos nas principais normas do uso destas técnicas [28, 29].

Ademais, este trabalho apresenta-se como uma continuidade às pesquisas realizadas pelo Laboratório de Alta Tensão Professor Manuel Luís Barreira Martinez (LAT-EFEI) e atende a algumas sugestões feitas por Romano [30].

Em um contexto geral, este estudo é particularmente importante ao considerar que, em 2012, entrou em vigor o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), o qual determina a realização de ensaios de impulso em transformadores para cadastramento e permissão para comercialização. Dessa forma, erros de interpretação de resultados podem acarretar prejuízos significativos, seja para fabricantes, seja para consumidores.

Os fabricantes de transformadores de distribuição no Brasil, em sua maioria, não possuem estrutura própria para realizar o ensaio de impulso atmosférico, é de particular interesse que o laboratório de ensaio contratado agregue informações aos diagnósticos, pois, desta forma, seus produtos podem ser aperfeiçoados.

## **1.1. Objetivos**

Esta dissertação tem como objetivo principal avaliar e testar as principais ferramentas e técnicas utilizadas para identificação e caracterização de falhas que ocorrem durante o ensaio de impulso atmosférico. Serão avaliadas as técnicas de identificação de falhas tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

Como objetivos secundários, espera-se:

- I. Avaliar a sensibilidade de cada transitório utilizado para detecção da falha;

- II. Comprovar que a técnica de análise no domínio da frequência é capaz de diferenciar as discrepâncias provenientes de falhas no transformador e perturbações externas;
- III. Definir as melhores técnicas para caracterizar a falha.

## 1.2. Metodologia proposta

Este trabalho adota o método Hipotético-Dedutivo [31], o processo investigativo proposto pode ser estruturado em 3 partes<sup>3</sup>: problema; solução; testes de falseamento.

Neste sentido, as soluções (hipóteses) para os problemas expostos neste capítulo são oriundas de uma revisão bibliográfica. Porém, estas hipóteses não necessariamente foram testadas para a transformadores de distribuição.

Os testes de falseamento foram realizados tanto por meio da experimentação quanto pela observação. No primeiro, ensaios de impulso com variáveis controladas foram realizados para testar as hipóteses levantadas. No segundo, registros de ensaios já realizados pelo LAT-EFEI foram analisados para testar as soluções propostas.

## 1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado pelos seguintes capítulos:

- **Identificação de falha no domínio do tempo:** Os conceitos necessários para entender o ensaio de impulso atmosférico são apresentados. Em seguida, uma revisão sobre as técnicas de medições citadas, as vantagens e análises que cada uma delas proporcionam são expostas. Ao final do capítulo, as hipóteses para esta técnica são apontadas;
- **Identificação de falha no domínio da frequência:** Semelhante ao capítulo anterior, os conceitos necessários para entender a análise dos sinais no domínio da frequência e uma revisão bibliográfica sobre a técnica aplicada ao ensaio de impulso atmosférico são apresentados e, ao final do capítulo, as hipóteses levantadas são apontadas;

---

<sup>3</sup> “O *problema*, em geral, de conflitos ante expectativas e teorias existentes; A *solução proposta*, consistindo numa conjectura (nova teoria) – dedução de consequências na forma de proposições passíveis de teste; *Os testes de falseamento*, tentativas de refutação, entre outros meios, pela observação e experimentação” [31].

- **Metodologia e instrumentos:** Neste capítulo, uma descrição dos experimentos e observações, para testar as hipóteses levantadas nos capítulos anteriores, é apresentada;
- **Resultados e Discussões:** Os resultados e análises dos testes são apresentados neste capítulo;
- **Conclusão e Trabalhos futuros:** Neste capítulo são apresentados os problemas que cada uma das hipóteses testadas soluciona. Novas hipóteses são sugeridas para novos problemas e àqueles que não foram solucionados.

## 2. IDENTIFICAÇÃO DE FALHA NO DOMÍNIO DO TEMPO

Este capítulo está estruturado da seguinte maneira: apresentação dos conceitos básicos e procedimentos para entender e realizar o ensaio de impulso atmosférico; descrição da metodologia de detecção de falha e revisão bibliográfica das interpretações dos resultados utilizando esta metodologia.

### 2.1. O Ensaio de impulso atmosférico

#### 2.1.1. Formas de onda e sequência de ensaio

O ensaio de impulso atmosférico, consiste na aplicação de uma sequência de impulsos de tensão com o objetivo de representar uma descarga atmosférica. Na prática, as descargas atmosféricas podem ocorrer de diversas formas, portanto, para replicação em laboratório, padronizaram-se parâmetros que melhor se aproximam dessas descargas atmosféricas.

A primeira forma de onda padronizada é o impulso atmosférico pleno (IAP). Por definição, o IAP possui uma forma de onda “com tempo de frente ( $T_1$ ) de 1,2  $\mu$ s (com tolerância de  $\pm 30\%$ ) e um tempo até meio valor ( $T_2$ ) de 50  $\mu$ s (com tolerância de  $\pm 20\%$ ), e descrito como um impulso de 1,2/50” [32].

O tempo de frente ( $T_1$ ) é um parâmetro virtual definido pela razão entre T (conforme Figura 1) e 0,6, sendo T calculado pela diferença entre os instantes quando a tensão chega a 90% e 30% do pico durante a subida da tensão.

Por definição, o  $T_2$  consiste em um parâmetro definido pelo intervalo entre a origem virtual,  $O_1^4$ , e o instante em que a curva atinge 50% da tensão de pico durante a queda da tensão.

---

<sup>4</sup>  $O_1$  é o ponto de intersecção da reta, obtida pelas coordenadas dos pontos de 30 e 90% da tensão, com o eixo das abscissas.

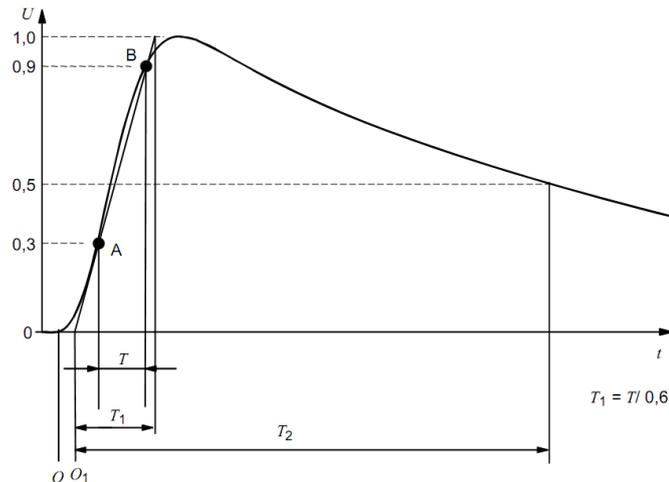


Figura 1: Parâmetros de tempo do IAP.  
Fonte: Adaptado de [32].

A segunda forma de onda padronizada é o Impulso Atmosférico Cortado (IAC) que representa uma “tensão de impulso atmosférico durante a qual uma descarga disruptiva causa um rápido colapso de tensão, praticamente ao valor zero” [32]. No caso o IAC normalizado deve ter um valor de tempo de corte ( $T_c$ ) entre  $2 \mu s$  a  $5 \mu s$  (pela norma IEC [33] este valor deve estar entre 3 e 6  $\mu s$ ), conforme pode ser visto na Figura 2. O impulso cortado representa o que na prática seria a disrupção dielétrica na rede, em um isolador, por exemplo, esta disrupção provoca sinais transitórios mais rápidos que os provocados por um IAP.

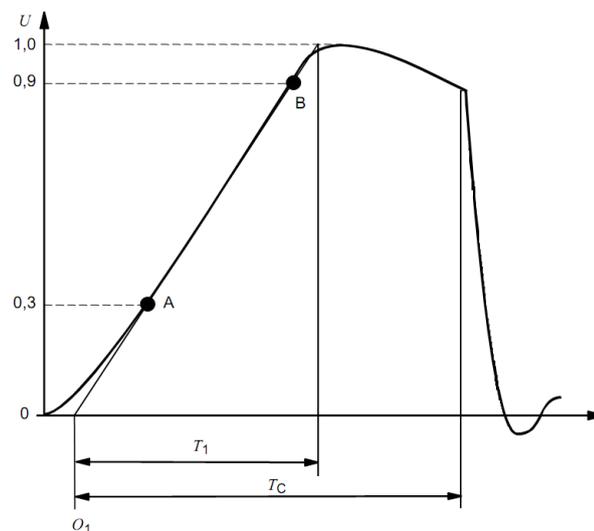


Figura 2 – Tensão de impulso atmosférico cortado na cauda  
Fonte: Adaptado de [32].

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 5356-4:2007, as aplicações de impulso devem seguir a seguinte ordem:

- 1 IAP com valor reduzido – 50 a 75% do Nível Básico de Isolamento (NBI);
- 1 IAP com o valor suportável nominal – 100% do NBI;
- 1 IAC com valor reduzido – 55% do NBI;
- 2 IAC com valor especificado – 110% do NBI;
- 2 IAP com valor suportável nominal – 100% do NBI.

Esta sequência de aplicações possui uma lógica para identificação de falhas. A primeira aplicação, O IAP de valor reduzido, é o sinal que será considerado referência. Em seguida aplica-se um IAP de valor nominal e compara-se com o valor reduzido para verificar a suportabilidade do equipamento. Em seguida, são aplicados os impulsos cortados. Apesar de se ter o IAC com valor reduzido, a comparação entre os IAC é difícil devido aos instantes em que o corte ocorre. Devido a essa dificuldade, são aplicados 2 IAP adicionais para verificar se o equipamento suportou aos IAC.

### **2.1.2. Arranjo de ensaio**

O arranjo do ensaio é formado basicamente por 4 elementos principais. O primeiro é o gerador de impulsos; o segundo, o circuito de corte; o terceiro, o sistema de medição; e o quarto, o objeto sob ensaio.

O primeiro e o segundo elementos são os responsáveis pela geração das formas de onda, e podem ser visualizados na Figura 3 como os elementos 3 (gerador de impulso) e 4 (circuito de corte)<sup>5</sup>. O sistema de medição é representado pelos elementos 8 e 9 da Figura 3, que consistem no sistema de medição de corrente e tensão, respectivamente. O último elemento mencionado, o objeto sob ensaio, é representado pelo item 5 na Figura 3.

A sequência de ensaio “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”

---

<sup>5</sup> O foco deste trabalho é a análise das falhas durante o ensaio de impulso atmosférico. Portanto não é o objetivo deste trabalho detalhar sobre o processo geração dos impulsos de tensão. Para mais informações, recomenda-se o trabalho de Pereira [54].

[4]. Se o transformador tiver um terminal de neutro, este também deve ser aterrado, assim como os terminais dos demais enrolamentos e o tanque.

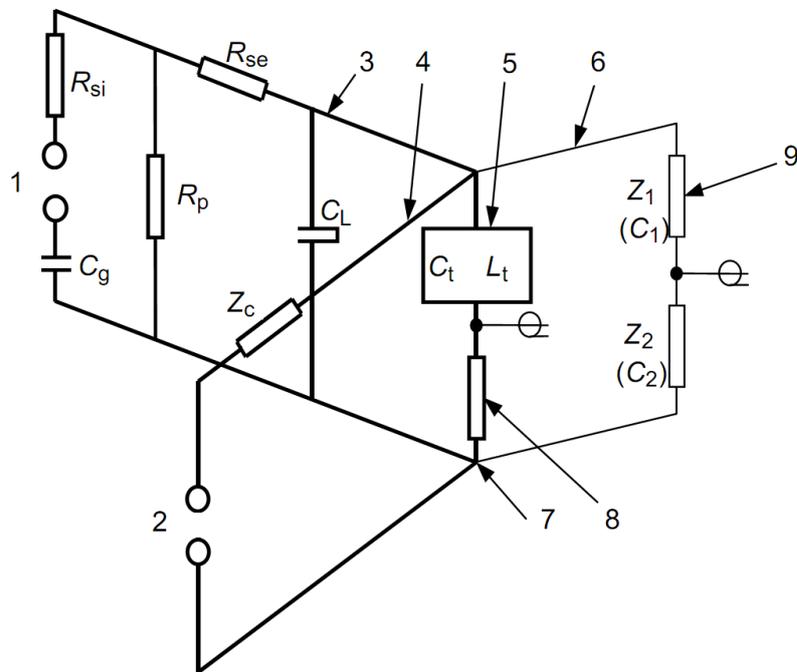


Figura 3 – Circuito típico de ensaio de impulso.  
Fonte: Retirado de [5].

Fica a ser definido o outro transitório a ser medido, geralmente uma corrente, que neste caso, existe mais de uma possibilidade. Esta medição está diretamente relacionada aos métodos de detecção de falhas, uma vez que ela possui uma sensibilidade maior que a medição de tensão na ocorrência de possíveis falhas. As seguintes medidas podem ser obtidas: “Corrente no neutro ou no enrolamento, corrente transferida a um enrolamento adjacente; corrente no tanque, tensão transferida a um enrolamento não ensaiado; corrente de linha” [5], conforme Figura 4.

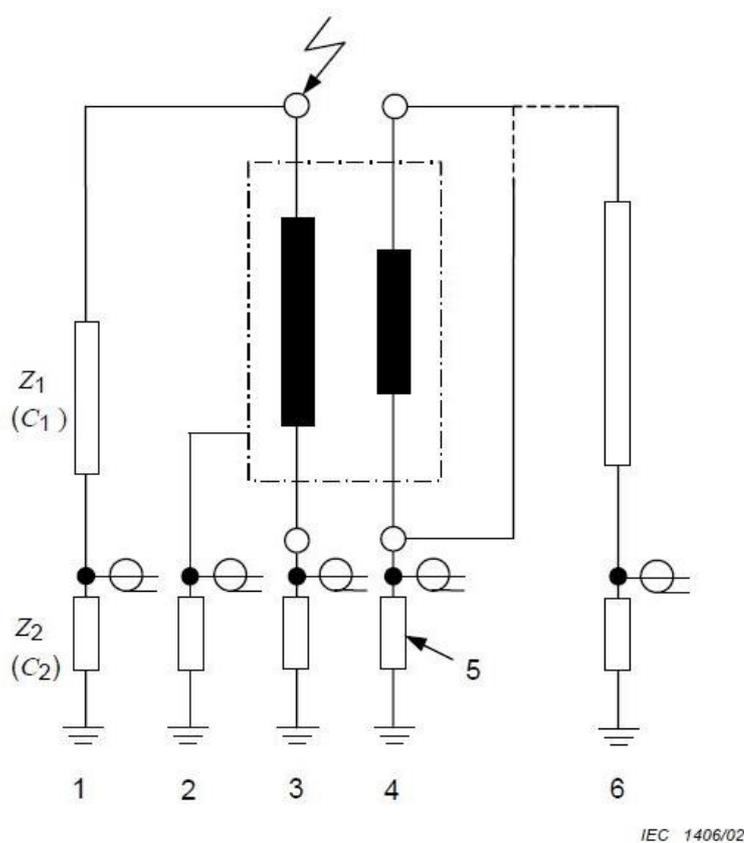


Figura 4 - Ligações dos terminais, em ensaios de impulso atmosférico e métodos de detecção de falha. Fonte: Retirado de [5].

Sendo:

- |  |   |
|--|---|
| 1 – Circuito de medição de tensão        | 4 – Corrente transferida a um enrolamento adjacente                               |
| 2 – Corrente no tanque                   | 5 – Dispositivo utilizado para medição da corrente. Geralmente um resistor shunt. |
| 3 – Corrente no neutro ou no enrolamento | 6 – Circuito de medição de tensão transferida                                     |

A corrente de linha é considerada como a soma das correntes no tanque, no neutro (ou enrolamento) e a corrente transferida a um enrolamento adjacente.

### 2.1.3. Metodologia de avaliação dos resultados

Para analisar o resultado do ensaio com os registros obtidos, o avaliador deve compará-los e verificar repetibilidade entre eles. Ou seja, ao fim do ensaio, caso haja uma diferença, por exemplo, entre o impulso atmosférico reduzido e um impulso atmosférico pleno, há indícios que alguma falha tenha ocorrido.

Uma vez que o equipamento sob ensaio foi projetado, em teoria, para suportar 100% do NBI em um IAP e 110% em um IAC, entende-se que o equipamento deve suportar sem problemas os impulsos de valor reduzido. Assume-se então que essas formas de onda reduzidas são registros onde o equipamento não apresentou falhas.

Portanto, há uma premissa e uma hipótese<sup>6</sup> para que esta metodologia funcione. A premissa é assumir que o equipamento não sofreu falhas durante a aplicação dos impulsos de valores reduzidos. A hipótese é que o equipamento sob ensaio é linear em toda a faixa de tensão a qual ele foi submetido.

Para exemplificar a metodologia, comparando-se os sinais apresentados na Figura 5, dois impulsos plenos, pode-se observar uma diferença de oscilações nos sinais 4, o qual indica que na aplicação do segundo impulso houve alguma falha de isolamento no transformador.

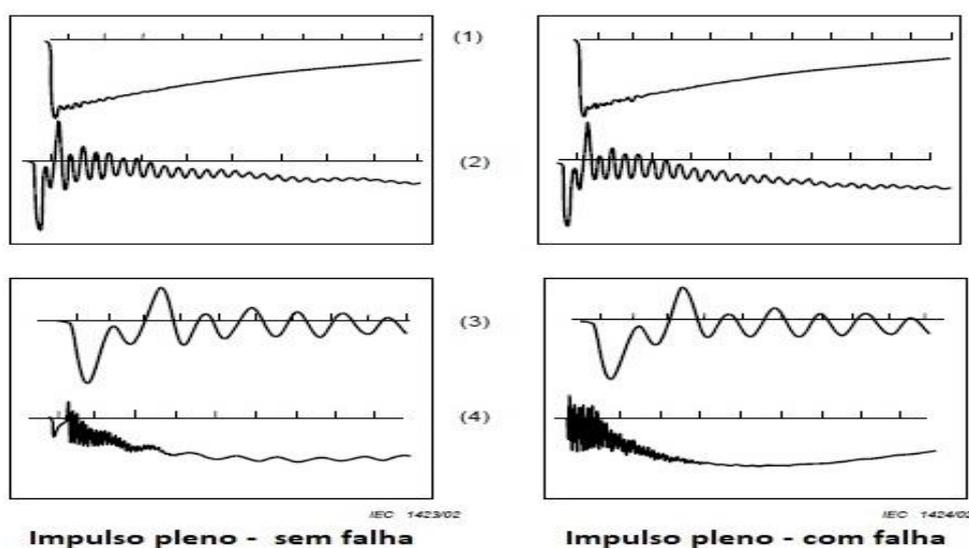


Figura 5 – Comparação entre impulsos atmosféricos. Fonte: Adaptado de [28].

Sendo:

- |  |  |
|--|--|
| 1 – Impulso aplicado, 100 $\mu$ s de varredura   | 3 – Corrente no neutro, 25 $\mu$ s de varredura  |
| 2 – Corrente no neutro, 100 $\mu$ s de varredura | 4 – Corrente no neutro, 250 $\mu$ s de varredura |

Durante a avaliação, pode ocorrer de não serem observadas diferenças entre os oscilogramas, portanto o equipamento suportou a todas as solicitações de tensão, ou o método utilizado não apresentou sensibilidade suficiente para detectar falhas, ou, por falta de experiência, o avaliador não detectou diferenças nas formas de onda.

<sup>6</sup> Entende-se que a premissa é uma proposição que não pode ser testada, enquanto a hipótese é uma proposição que pode ser testada.

No caso de diferença entre os sinais avaliados, podem ter ocorrido uma falha de isolamento do equipamento, alteração na geração da forma de onda, falha de medição no sistema de medição ou interferências externas nos sinais medidos.

Apesar da metodologia de detecção de falhas ser simples (no sentido de aplicá-la) ela exige um grau de experiência de quem avalia os resultados, confiabilidade do sistema utilizado (geração e medição) e conhecimento das possíveis influências externas as quais o sistema pode estar sujeito.

Deve-se então avaliar qual o melhor método de medição e qual apresenta a melhor sensibilidade para detectar falhas no equipamento. Em um passo mais adiante, deve-se avaliar as informações que podem ser extraídas destas falhas, qual a característica da falha detectada, por exemplo. Para realizar estas análises é necessário adotar um modelo de transformador que seja adequado para avaliar as falhas dielétricas durante o ensaio de impulso atmosférico.

## **2.2. Interpretação dos resultados**

### **2.2.1. Modelo do transformador**

Para prosseguir na interpretação dos resultados, é necessário adotar um modelo de transformador que seja suficiente para se entender os fenômenos que ocorrem durante o ensaio de impulso atmosférico. O impulso atmosférico é classificado como um transitório com frequências acima de 10 kHz [34]. Para essas frequências o transformador torna-se mais capacitivo, portanto, o modelo para frequência industrial não é adequado.

Com o intuito de obter um melhor entendimento das isolações que compõem o transformador, estas foram categorizadas da seguinte maneira:

- 1) Isolação entre espiras;
- 2) Isolação entre os enrolamentos de alta e baixa;
- 3) Isolação entre enrolamentos e carcaça, ou núcleo.

Estas isolações podem ser representadas por um capacitor (C), conforme Figura 6.

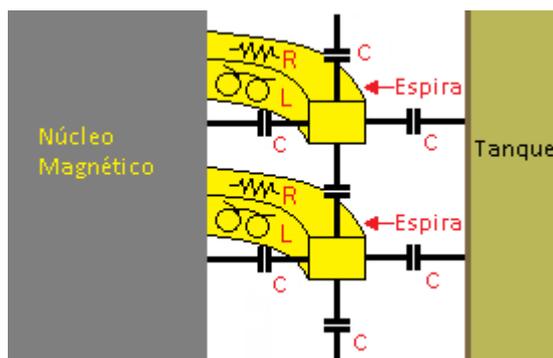


Figura 6 - Representação da isolação do transformador – Fonte: Adaptado de [35].

Como o ensaio é realizado em um enrolamento por vez, não será necessário o modelo de um transformador completo. Um modelo para um enrolamento de um transformador para altas frequências é apresentado por Tata [36]. Este modelo, para fins práticos de simulações computacionais, utiliza parâmetros concentrados.

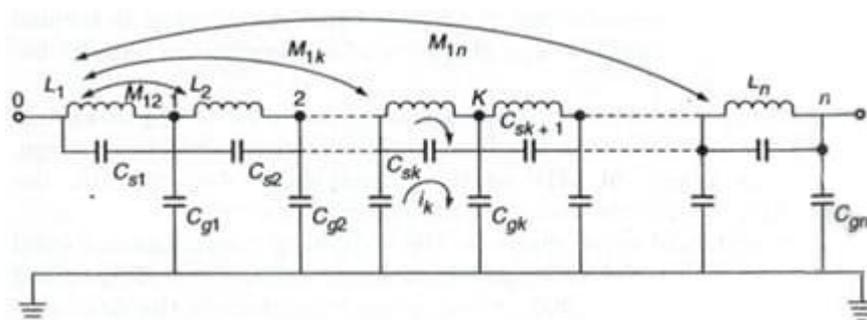


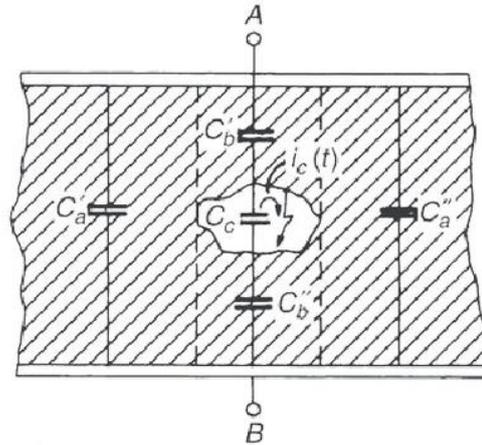
Figura 7 – Modelo de um enrolamento do transformador - Fonte: Adaptado de [36].

Sendo:

- $C_s$  – Capacitância série;
- $C_g$  – Capacitância terra;
- $L$  – Indutância própria;
- $M$  – Indutância mútua.

Com este modelo, é possível caracterizar as duas principais isolações que devem ser consideradas no ensaio de impulso atmosférico, a capacitância para a terra e a capacitância série, que pode ser considerada a capacitância entre as espiras do transformador. As faltas que ocorrerem em capacitâncias para a terra serão denominadas falta *shunt*, as faltas que ocorrerem nas capacitâncias série serão faltas séries.

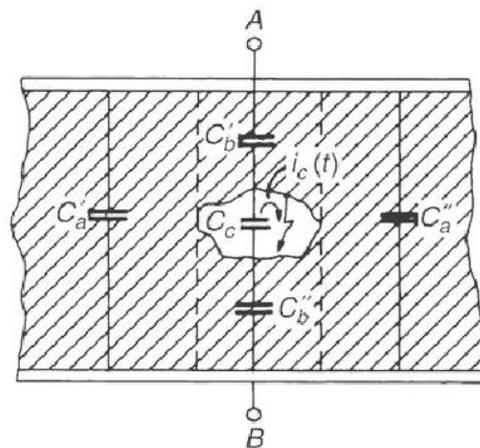
Outro tipo de falta que deve ser considerada são as descargas parciais. Descarga parcial por definição, é a “descarga elétrica localizada que curto-circuita apenas parcialmente o isolante entre condutores e que pode ou não ocorrer nas adjacências de um condutor” [37], conforme



exemplificado na

(a)

Figura 8 Figura 8. Em um transformador, as descargas parciais podem ocorrer, por exemplo, devida às bolhas de ar no óleo do transformador, algum defeito no papel isolante, ou devido ao efeito corona.



(a)

Figura 8: Descargas parciais em um meio isolante. Fonte: Retirado de [38].

### 2.2.2. Interpretação dos resultados

A norma ABNT 5356-4 [5] diferencia as falhas de acordo com a ocorrência nos sinais de tensão ou corrente.

Quando estas falhas são observadas nos sinais de tensão, geralmente são defeitos de maior porte. Estas foram categorizadas em 4 tipos: falhas para a terra (falta shunt); Descarga

disruptiva progressiva, porém total, ocorrendo através do enrolamento sob ensaio (curto-circuito das capacitâncias série ao invés da capacitância shunt); descarga disruptiva de parte do enrolamento (curto-circuito de uma parcela da capacitância série); e falhas entre espiras, que não são detectadas nos sinais de tensão.

Faltas shunt, quando ocorrem, são caracterizadas por um colapso total e rápido da tensão de ensaio. No caso da descarga disruptiva progressiva é observado um colapso progressivo da tensão, ou seja, uma disrupção mais lenta. Quando ocorre o terceiro tipo, disrupção de parte do enrolamento, entende-se que a impedância do enrolamento diminui, portanto, será observado no sinal de tensão a diminuição do tempo de cauda, ou seja, a queda será mais rápida. No último caso, falhas de menores portes, curto-circuito entre espiras por exemplo, espera-se observar, quando possível, oscilações de alta frequência [5].

Conforme mencionado anteriormente, a medição de corrente é mais sensível à detecção de falhas. Além disto, de acordo com o tipo de corrente medida e as características do sinal observado, é possível ter mais informações sobre o tipo de falha.

Mudanças de grande porte na corrente podem significar falhas shunt ou em grande parcela da capacitância série, e dependendo da medição escolhida é possível determinar o tipo da falha. Por exemplo, a amplitude da corrente de neutro diminuirá no caso de falhas shunt, e aumentará em falhas de parte do enrolamento, pois a corrente irá pelo caminho de menor impedância.

Para melhor exemplificar, na Figura 9, são apresentados os registros referentes a duas aplicações de IAP, nas quais é apresentada a medição da corrente de neutro. Os registros apresentam a ocorrência de um curto-circuito do enrolamento ensaiado e, conforme mencionado, na medição da corrente de neutro foi observado um aumento da corrente.

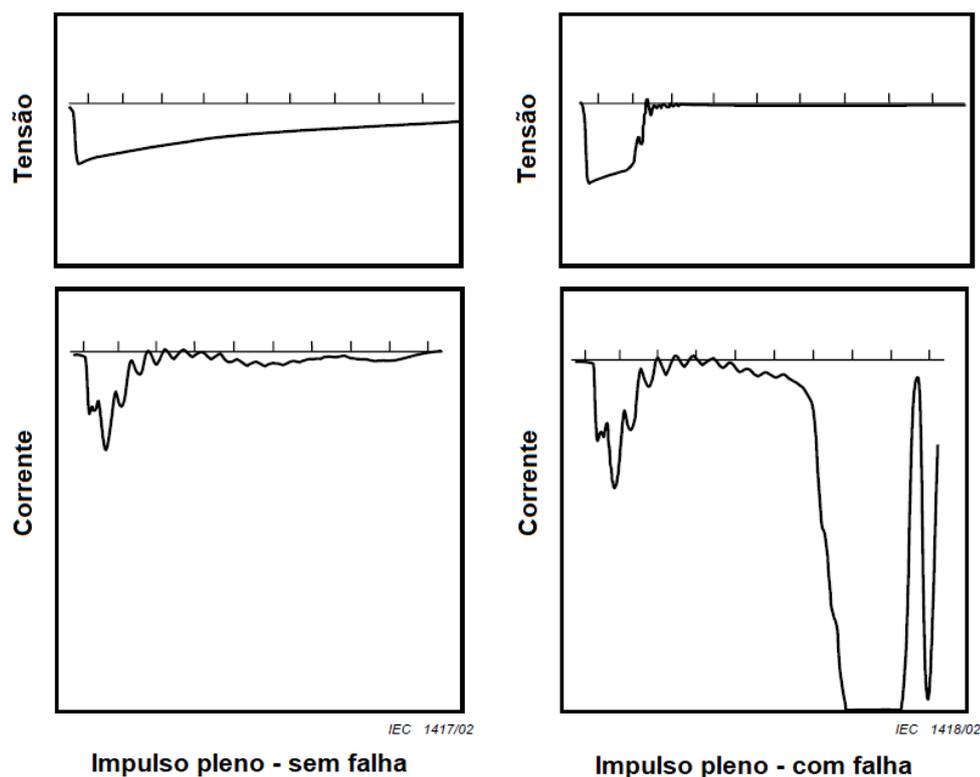


Figura 9 – Comparação entre impulsos atmosféricos com e sem falha, curto-circuito do enrolamento ensaiado. Fonte: Adaptado de [28].

Para medições de correntes transferidas capacitivamente, pode-se dizer que:

No caso de falhas de maior porte no enrolamento ensaiado, a corrente transferida capacitivamente geralmente mostra uma crista sobreposta; às vezes pode ocorrer também mudança na frequência básica. No caso de falhas para terra do enrolamento ensaiado, entre partes de maior porte do enrolamento ensaiado e um enrolamento não utilizado para medição de correntes capacitivas, a crista é de polaridade oposta à da tensão de ensaio. No caso de descargas disruptivas para o enrolamento não utilizado para indicação de falhas, a crista tem polaridade da tensão de ensaio. Todas estas falhas resultam em certo grau de oscilações de alta frequência sobrepostas nos registros [5].

Para exemplificar, na Figura 10, é apresentada a aplicação de dois IAP, nos quais foram realizadas a medição da corrente transferida capacitivamente. Conforme mencionado anteriormente, oscilações de alta frequência foram observadas na medição de corrente para o impulso com falha.

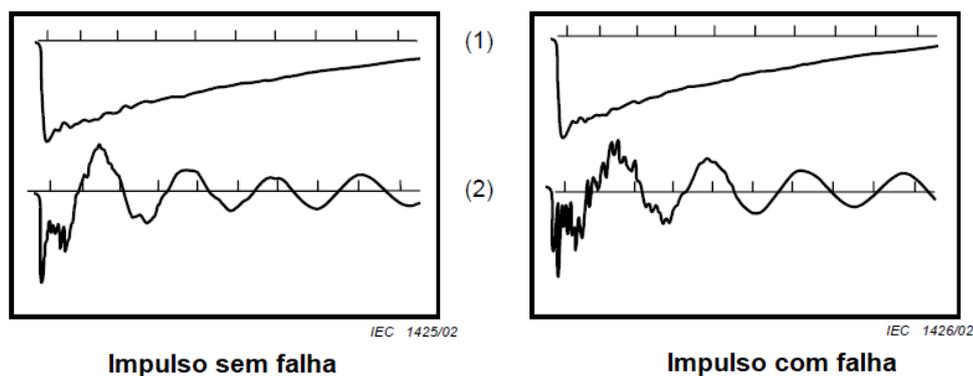


Figura 10 – Comparação entre impulsos atmosféricos com e sem falha, com medição da corrente transferida capacitivamente. Fonte: Adaptado de [28].

A norma brasileira também menciona que “pequenos sinais, de curta duração, esparsos por alguns microssegundos, podem indicar descargas parciais de grande intensidade na isolação entre espiras ou bobinas, ou ligações de bobinas” [5].

Em sua essência, a identificação de falhas é difícil de ser realizadas comparando-se impulsos de onda cortada, uma vez que o tempo de corte varia para cada impulso e a sobreposição das formas de onda torna-se inviável. Com tempos de corte diferentes, as oscilações de cada registro podem se alterar. No entanto, nos casos em que a falha ocorre antes do instante de corte, aplicam-se as mesmas considerações que para ensaios com impulso pleno.

Tanto na IEEE Std 57.98 [29] quanto na IEC 60076-4 [28], as caracterizações das falhas conforme as diferenças nas formas de onda são semelhantes às apresentadas na ABNT 5356-4 [5].

Adicionalmente, para analisar falhas, a IEEE Std 57.98 caracteriza os sinais de medição de corrente em três componentes: componente capacitiva; componente do acoplamento das indutâncias mútuas de seções de enrolamentos individuais; componente indutiva principal do enrolamento [29]. Deve-se mencionar que apesar desta classificação a própria norma diz que estas características podem variar de acordo com o tipo de enrolamento ensaiado.

A parte capacitiva é representada pelo início da forma de onda, ou tempo de subida, onde as capacitâncias séries são carregadas e a tensão distribuída por elas. “Essas capacitâncias, geralmente estão carregadas dentro de 2 a 10  $\mu$ s e a corrente tende a diminuir. Quando ocorrer alguma alteração após este período, uma falha por exemplo, há uma tendência em ocorrer uma redistribuição de carga no enrolamento ensaiado” [29].

A componente associada às indutâncias mútuas é caracterizada por “um período menor e mais lento de oscilações, esta componente ocorre entre os períodos de 6 a 20  $\mu\text{s}$ ” [29]. A componente indutiva principal do enrolamento “inclui muitas vezes oscilações de grandes amplitudes sobrepostas, devidas a ondas viajantes no enrolamento. É a componente mais lenta e a frequência fundamental da corrente do enrolamento, para transformadores de grande porte o pico desta corrente não deve ser atingido antes dos 100 a 200  $\mu\text{s}$ ” [29].

A partir destas categorizações é possível afirmar que sinais de baixas frequências causam alterações significativas na componente indutiva. “Alterações da impedância causadas por faltas séries, por exemplo, causam alterações em sua componente indutiva, o que é considerado um sinal confiável de problemas no enrolamento do transformador” [29].

A componente capacitiva da corrente pode dar um indício inicial de falhas, porém observar estas alterações dependerá da relação entre as capacitâncias série e shunt e da magnitude da falha. “A componente devida às indutâncias mútuas geralmente não é útil para detecção de faltas comparada às outras duas” [29].

Historicamente, a medição da corrente de neutro foi um dos primeiros métodos propostos [39], e demonstrou ser um dos métodos mais sensíveis na detecção de falhas, conforme apresentado por Rippon [40] e Hagenguth [41]. No trabalho apresentado por Beldi [42], o método mostrou-se capaz de detectar falhas que curta-circuitam 1% do enrolamento total.

Beldi [43] apresentou em seu trabalho que “tanto a medição da corrente de linha quanto a corrente de neutro são igualmente sensíveis, porém somente a primeira é adequada para localização de falhas analisando os registros oscilográficos”. Apesar da afirmação, ambas as medições apresentam a mesma sensibilidade, Aicher [44] afirma que incluir outras componentes de corrente à medição pode diminuir a sensibilidade para falhas entre espiras, uma vez que os sinais provenientes destas falhas serão proporcionalmente menores com a adição destas correntes.

Uma vez que o valor da corrente de linha representa a soma das componentes que circulam pelas capacitâncias série, shunt e indutância, a opção pela medição da corrente de neutro pode eliminar a possibilidade de detectar falhas shunt? Aicher [44] afirma que não, “pois falhas shunt geralmente resultam em mudanças grandes de impedância e são facilmente discernidas nos oscilogramas de tensão”. Esta afirmação está de acordo com o mencionado anteriormente, onde a falha shunt diminuirá a corrente no neutro.

As normas internacionais, apesar da abrangência dos tipos de medições que podem ser realizadas, apresentam as ferramentas que podem ser utilizadas para avaliar os sinais registrados. Cabe, portanto, aos responsáveis pelos ensaios determinar qual dessas técnicas são mais convenientes.

Porém, analisando-se somente os registros dos ensaios, não há método consistente para:

- Afirmar categoricamente que as diferenças entre os sinais são provenientes de falhas no transformador e não de influências externas, como diferença na geração da forma de onda;
- Comparar impulsos cortados com outros registros.

### **2.3. Hipóteses a serem testadas**

As hipóteses avaliadas neste trabalho, com base no exposto, são:

- I. O equipamento sob ensaio é linear em toda a faixa de tensão a qual ele foi submetido;
- II. Faltas séries aumentam a corrente de neutro;
- III. Faltas shunt diminuem a corrente de neutro;
- IV. Medição da corrente de linha e neutro são igualmente sensíveis na detecção de falhas;
- V. Sinais de alta frequência são indícios de descargas parciais.

Com o objetivo de comparar a sensibilidade na detecção de falhas entre a corrente de neutro e corrente de linha e por motivos práticos, este trabalho não avaliará a medição da corrente transferida capacitivamente. Adicionalmente, a escolha de utilizar somente as correntes de neutro e linha se deu pela maior utilização destas duas.

### **3. IDENTIFICAÇÃO DE FALHA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA**

O surgimento dos digitalizados, que surgiu ao longo dos anos com o desenvolvimento da tecnologia ao longo dos anos, possibilitou que os sinais registrados durante o ensaio de impulso atmosférico pudessem ser tratados e analisados. Este processo não era possível pois a análise era realizada por registros fotográficos.

Malewski e Poulin [12] propuseram analisar estes sinais calculando a função de transferência (FT). Este método solucionaria as duas dificuldades apresentadas no capítulo anterior: Afirmar que as diferenças entre os sinais são provenientes de falhas no transformador e não de influências externas e comparar impulsos cortados com outros registros. Adicionalmente, Malewski e Poulin [12] sugerem que é possível, pela análise da função de transferência, dissociar pequenas falhas entre espiras de sinais de descargas parciais.

Posteriormente, esta metodologia foi amplamente discutida por outros autores [45, 13, 46, 47, 48, 14] utilizando-a não apenas para detecção de falhas em laboratórios, durante ensaios de impulso atmosférico, como também para avaliação de transformadores já instalados em campo.

Após a consolidação deste método, as normas internacionais [28, 29] para ensaios de impulso atmosférico em transformadores incorporaram-na como uma opção para a análise de falhas. Nota-se que esta técnica ainda não foi incorporada à norma brasileira [5] até a presente data.

Semelhante ao capítulo anterior, neste capítulo serão introduzidos os conceitos necessários para entender a teoria que envolve a FT e sua metodologia, depois uma discussão e revisão das interpretações dos resultados utilizando esta metodologia.

#### **3.1. A Função de transferência**

O primeiro conceito que se deve entender é o de um sistema linear. Um sistema é considerado linear quando este possui duas propriedades matemáticas: homogeneidade e aditividades [49].

“Homogeneidade significa que uma mudança na amplitude do sinal de entrada corresponde a uma mudança correspondente no sinal de saída” [49]. Para a realidade do ensaio

de impulso atmosférico, quando se tem a aplicação de um IAP com valor reduzido e outro com valor pleno, os sinais de corrente (sinal de saída) devem ser correspondentes à amplitude do sinal de entrada. Em outras palavras, se o sinal de tensão é dobrado, o sinal de corrente também deve ser o dobro em comparação ao valor reduzido. Este conceito, como pode-se observar é a base para a detecção de falha pelo método apresentada no capítulo anterior.

O segundo conceito, aditividade, considera que “um sistema onde uma entrada  $x_1[n]$  produz uma saída  $y_1[n]$  e, adicionalmente, suponha que uma entrada diferente,  $x_2[n]$ , produza uma outra saída,  $y_2[n]$ . O sistema é considerado aditivo se a entrada  $x_1[n] + x_2[n]$  resultar em uma saída  $y_1[n] + y_2[n]$ , para qualquer sinal de entrada possível” [49]. Conforme exemplificado na Figura 11. Este conceito, que até então não se fazia necessário, é importante para o entendimento do conceito da função de transferência e sua utilização para detecção de falhas no ensaio de impulso.

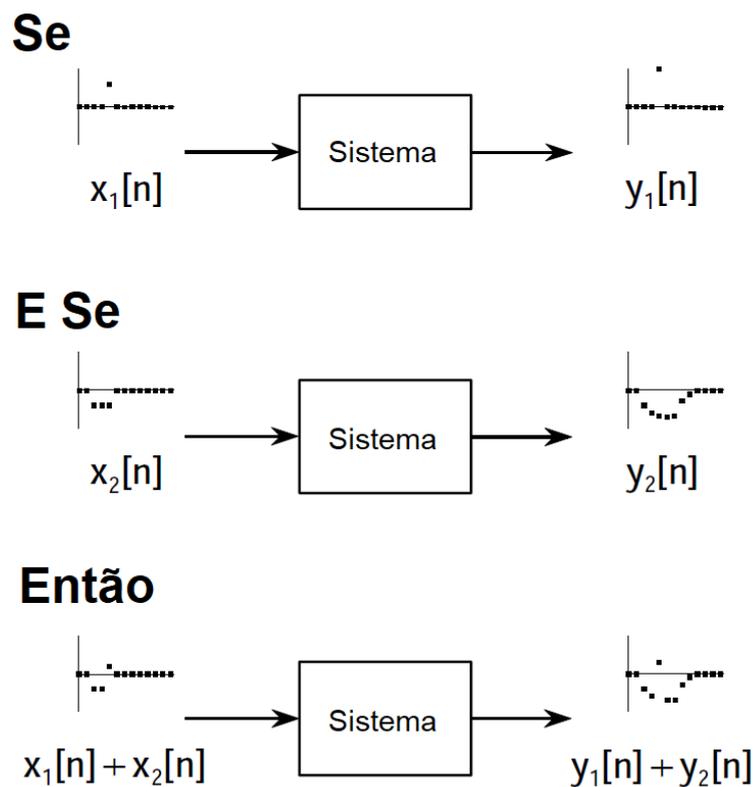


Figura 11 – Definição de aditividade. Adaptado de [49].

Considerando um sistema linear, Figura 12, o que define o seu comportamento no domínio do tempo pode ser descrito por uma resposta de impulso  $h(t)$  (“impulse response”) ou, no domínio da frequência, por sua função de transferência  $H(j\omega)$ . Ou seja, pode-se afirmar que

a FT é a caracterização do objeto em função da frequência, que também é chamada de resposta em frequência. A partir dos sinais de entrada e saída medidos, a FT é calculada pela Transformada Rápida de Fourier (FFT), e pode-se afirmar que a FT é a FFT da  $h(t)$ .

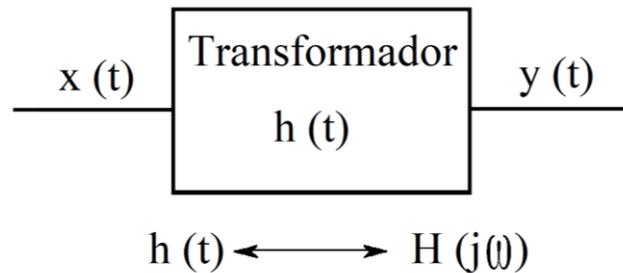


Figura 12 – Descrição de um sistema linear. Fonte: Retirado de [45].

A FFT, é um algoritmo que calcula a transformada de Fourier para sinais discretos. A transformada de Fourier constitui-se de uma ferramenta matemática que permite que qualquer sinal “possa ser representado por uma soma infinita de funções seno ou cossenos de frequências múltiplas” [50]. Para exemplificar este conceito, pode-se observar na Figura 13 um sinal aleatório composto por 16 pontos que pode ser decomposto em uma soma de sinais senos ou cossenos. Conforme apresentado na Figura 14 o sinal decomposto em uma soma de sinais senos, onde altera-se somente a amplitude e frequência de cada sinal seno.

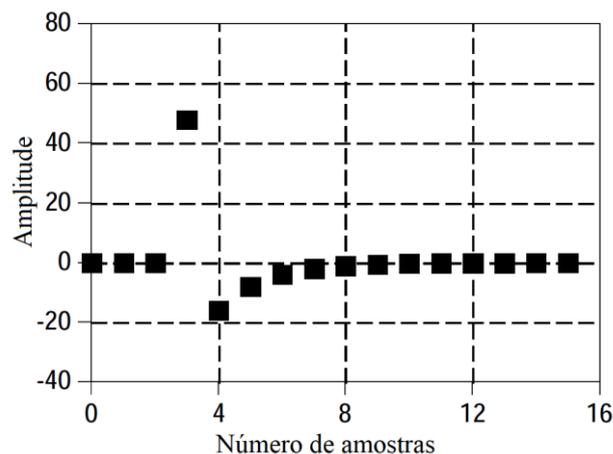


Figura 13 – Sinal com 16 pontos. Fonte: Adaptado de [49].

## Sinais Senos

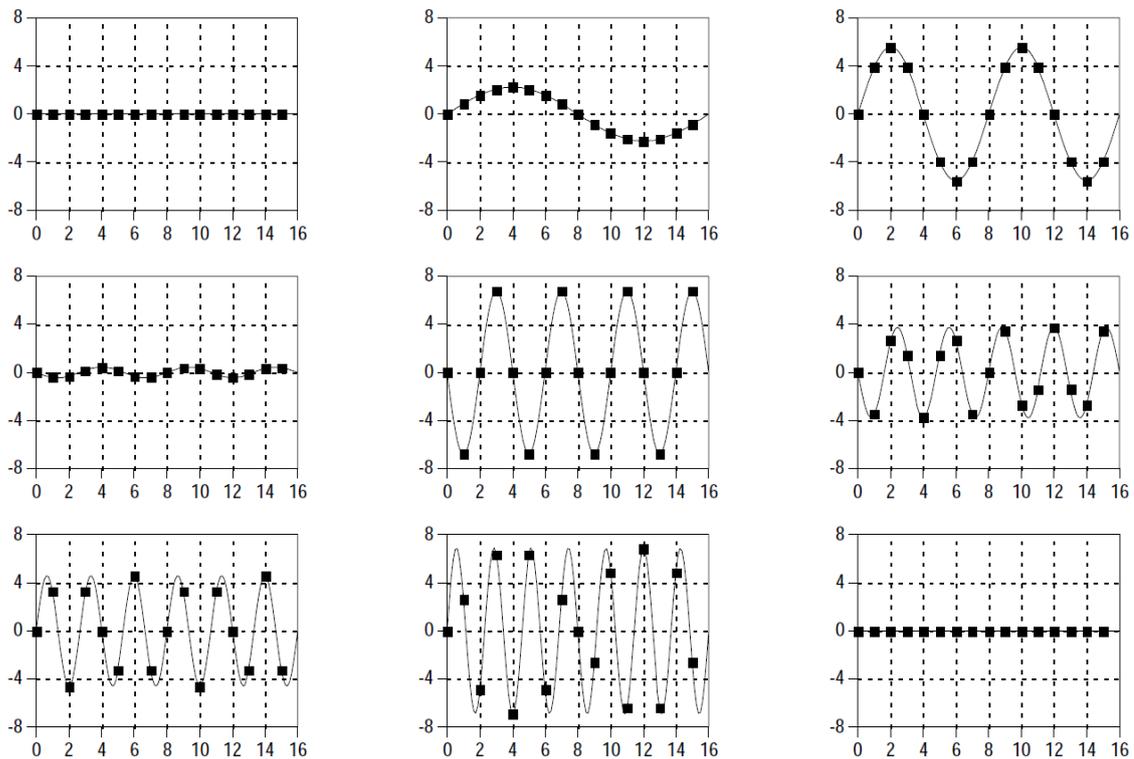


Figura 14 - Sinal da Figura 13 decomposto em sinais senos. Fonte: Adaptado de [49].

Mas qual seria a importância em transformar qualquer sinal em uma soma de senos ou cossenos? Esta resposta se encontra em uma importante propriedade dos sinais senos e cossenos em sistemas lineares:

“Os sinais seno e cosseno são mais simples do que o sinal original porque possuem uma propriedade que o sinal original não possui: fidelidade senoidal. Uma entrada senoidal em um sistema tem garantia de produzir uma saída senoidal. Apenas a amplitude e a fase do sinal podem mudar; a frequência e a forma de onda devem permanecer as mesmas” [49].

Por isso, pode-se afirmar que a FT é a resposta em frequência do sistema, pois cada sinal seno ou cosseno de frequência diferente, produzirá uma saída nesta mesma frequência, mudando somente a amplitude e fase do sinal de saída.

Trazendo estes conceitos para a realidade deste trabalho, pode-se afirmar que se for aplicada a FFT ao sinal de tensão e de corrente é possível obter a FT do transformador, para a configuração ensaiada, calculando-se a relação entre a tensão e corrente ou entre a corrente e tensão, conforme exemplificado em Figura 15. Portanto, como a FT é calculada com base na

tensão e corrente, o resultado será a admitância ou impedância do transformador, na configuração ensaiada.

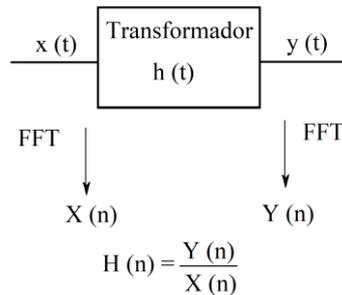


Figura 15 – FT de um transformador. Fonte: Adaptado de [45].

Este é o grande diferencial da análise no domínio da frequência, ser possível calcular a impedância ou admitância do equipamento, pois um equipamento que não apresentar falhas não pode ter sua característica de impedância ou admitância alterada. Portanto, conceitualmente falando, independente da forma de onda aplicada ao transformador, ao calcular a sua FT o valor da impedância e admitância não serão alterados, a menos que haja falhas. Desta forma, os dois problemas na detecção de falha pelo método apresentado no capítulo anterior estariam solucionados.

### 3.2. Tratamento digital dos sinais

Dada a metodologia apresentada, surgem algumas perguntas:

- Qual a faixa (espectro) de frequência é possível analisar?
- Qual a qualidade da resolução destas FT?

Iniciando pelo primeiro questionamento, pode-se determinar a frequência mínima que é possível analisar observando a Figura 13 e a Figura 14. Se o sinal é composto pela soma de sinais senoidais, a menor frequência será aquela senoide cujo período correspondente esteja dentro do limite de tempo do sinal analisado. Por exemplo, a menor frequência de uma FT de um sinal medido num período de 16,6 ms será 60 Hz, pois esta será a menor frequência possível para uma senoide neste intervalo. Uma senoide à frequência de 50 Hz já não seria possível pois o seu período correspondente é de 20 ms ( $\frac{1}{50}$ ), maior que os 16,6 ms medido.

O espectro de frequência será determinado pelo tipo de sinal injetado no sistema, os IAP e IAC. O IAP possui, teoricamente, um espectro que chega até frequências de aproximadamente 1 MHz, por sua vez o IAC possui um espectro até a faixa de 10 MHz.

Conforme pode ser observado pela Figura 16. Frequências maiores no impulso cortado são esperadas, pois o período da forma de onda é menor e devido às oscilações de altas frequências geradas durante o corte.

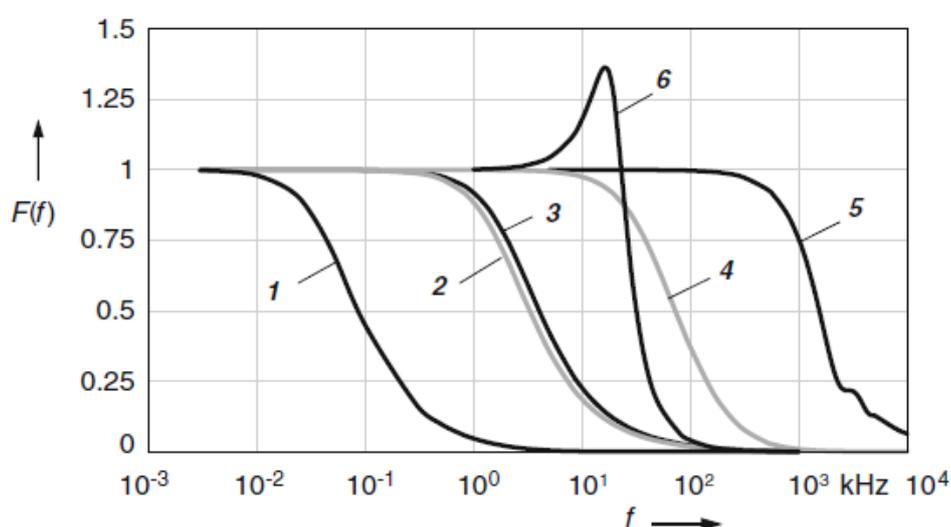


Figura 16 – Densidade de amplitude  $F(f)$  de diferentes tensões e correntes impulsivas. 1 – Impulso de manobra 250/2500  $\mu\text{s}$ ; 2 – Impulso atmosférico 0,84/60  $\mu\text{s}$ ; 3 – Impulso atmosférico 1,2/50  $\mu\text{s}$ ; 4 – Impulso atmosférico 1,2/5  $\mu\text{s}$ ; 5 – Função triangular ( $t_c = 0,5 \mu\text{s}$ ); 6 – Impulso de corrente 8/20  $\mu\text{s}$ . Fonte: Retirado de [51].

Os demais fatores limitantes serão determinados pela taxa de amostragem e pela resolução do sinal medido. Este último, por sua vez, será influenciado pela resolução do sistema de medição e pelos ruídos de interferência aos quais a medição estará submetida.

A taxa de amostragem é a frequência que o digitalizador registra o sinal, ou a periodicidade de aquisição. Um equipamento com uma taxa de 100MS/s (100 MHz), registrará 100 milhões de amostras (pontos) em um segundo, ou uma amostra a cada 0,01  $\mu\text{s}$ . Entende-se que um sinal é lido corretamente somente se atender ao teorema de *Nyquist*, o qual indica que “um sinal será amostrado corretamente somente se não contiver componentes de frequências acima da metade da taxa de amostragem” [49]. Portanto, o primeiro fator que limitará a frequência máxima do espectro será a metade da frequência da taxa de amostragem.

A resolução vertical de um equipamento é determinada pelo seu número de bits. Um digitalizador, por exemplo, com uma resolução de 3 bits terá na sua escala vertical 8 divisões ( $2^3$ ), conforme Figura 17. Desta forma o sinal medido poderá estar em uma destas 8 divisões. Nesse mesmo exemplo, caso o digitalizador esteja numa escala de 8 Volts, nesta resolução o equipamento poderá ler a tensão com uma resolução de somente 1 Volts (8 Volts / 8 divisões). Portanto, entende-se que quanto maior o número de bits, maior a resolução do equipamento.

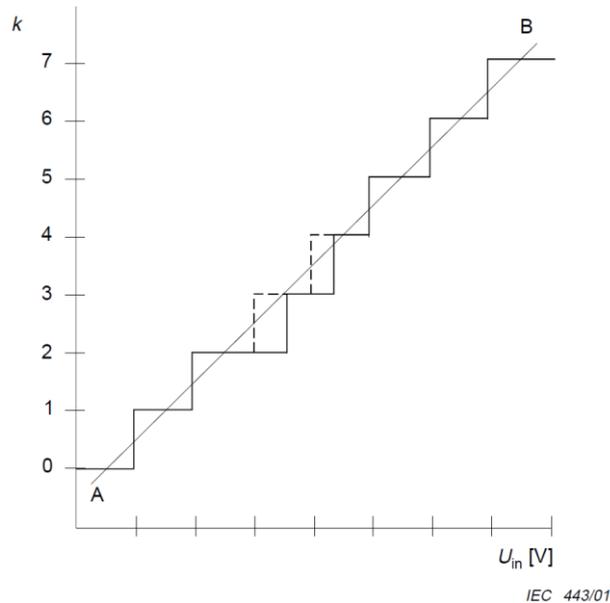


Figura 17 – Resolução vertical. Fonte: Adaptado de [52].

Conforme apresentado na Figura 16, a densidade de amplitude diminui com o aumento da frequência, então, a partir do momento que o sinal lido ficar menor que a resolução do equipamento já não será mais possível lê-lo devida à resolução do equipamento.

Outro impedimento é o ruído produzido pelas interferências eletromagnéticas durante o ensaio. Devido às elevadas tensões no ensaio de impulso atmosférico sinais de ruído no sistema de medição serão induzidos, e esses ruídos tendem a aumentar juntamente com o aumento da tensão de ensaio. Portanto, a partir do momento que o sinal analisado for menor que o ruído, já não será possível a sua leitura. Concluindo, a frequência máxima lida será limitada pelo sinal aplicado na amostra, pela metade da frequência da taxa de amostragem, pela resolução do equipamento, e pelo ruído devido às interferências eletromagnéticas durante o ensaio.

No domínio da frequência, a resolução horizontal será determinada pela relação entre a taxa de amostragem e o número de pontos ( $N$ ) obtidos no domínio do tempo: Exemplificando, um arquivo com 10000 pontos que foram obtidos com uma taxa de amostragem de 100 MHz,

terá uma resolução de 10 kHz na FFT. A resolução vertical, será determinada igualmente pelo número de bits do equipamento.

Para se comparar sinais no domínio da frequência, faz-se necessário saber a faixa de frequência confiável que não é influenciada por outros fatores, ruídos externos, por exemplo. Para isso, uma ferramenta matemática chamada função coerência é indicada para determinar este espectro de frequência confiável.

### 3.3. Função coerência

A função coerência (CF) é apresentada por Malewski [53] como uma ferramenta capaz de revelar o intervalo de frequência onde já não se é mais possível se comparar as funções de transferências, devido aos fatores citados no item 3.2. Essa função também foi indicada pela norma IEEE C57.98 [29] como um indicador de confiabilidade que auxilia na análise de falhas do transformador.

Esta função é um “algoritmo que calcula a coerência de dois ou mais sinais em função da frequência. O resultado é uma curva que relaciona o grau de coerência entre 1 e 0. Uma coerência de grau 1 indica que os dois sinais demonstram uma relação linear na frequência especificada” [29].

A CF pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$CF = \frac{|G_{xy}|^2}{G_{xx} * G_{yy}} \quad (1)$$

$$G_{xx} = \sum \frac{|U|^2}{n} \quad (2)$$

$$G_{yy} = \sum \frac{|I|^2}{n} \quad (3)$$

$$G_{xy} = \sum \frac{|U * I|^2}{n} \quad (4)$$

Sendo:

- U – Tensão no domínio da frequência;
- U\* – Conjugado complexo;
- I – Corrente no domínio da frequência;
- n – número de conjuntos de sinais medidos.

Desta forma, aplicando a função aos registros medidos, pode-se ter um indicativo de confiabilidade. Obviamente, é necessário que estes registros não apresentem sinais de falhas provenientes do transformador. Portanto, para utilizar este método, pode-se utilizar mais de um IAP com valor reduzido. Uma alternativa é que se tenha um histórico de medições e determinar, com base neste histórico, o espectro de frequência confiável.

Para exemplificar a ferramenta apresentada, na Figura 18, são apresentados dois IAP, que estão sobrepostos, e apresentam algumas diferenças entre eles. Ao analisar estes sinais no domínio da frequência, Figura 19, estas diferenças são observadas com maior clareza.

No entanto, essas diferenças devem vir acompanhadas pelo indicador de confiabilidade, Figura 20, o qual mostra a faixa de frequência onde é possível avaliar supostas falhas. Como pode ser visto, a falha pode ser detectada com um indicador de confiabilidade próxima a 1 numa faixa de aproximadamente 0,4 a 0,6 MHz. Diferenças também são observadas por volta de 0,7 Mhz, no entanto, o indicador de coerência neste ponto é menor. Caso diferenças fossem observadas somente em 0,7 MHz, uma maior investigação deveria ser feita para indicar se há realmente uma falha no equipamento.

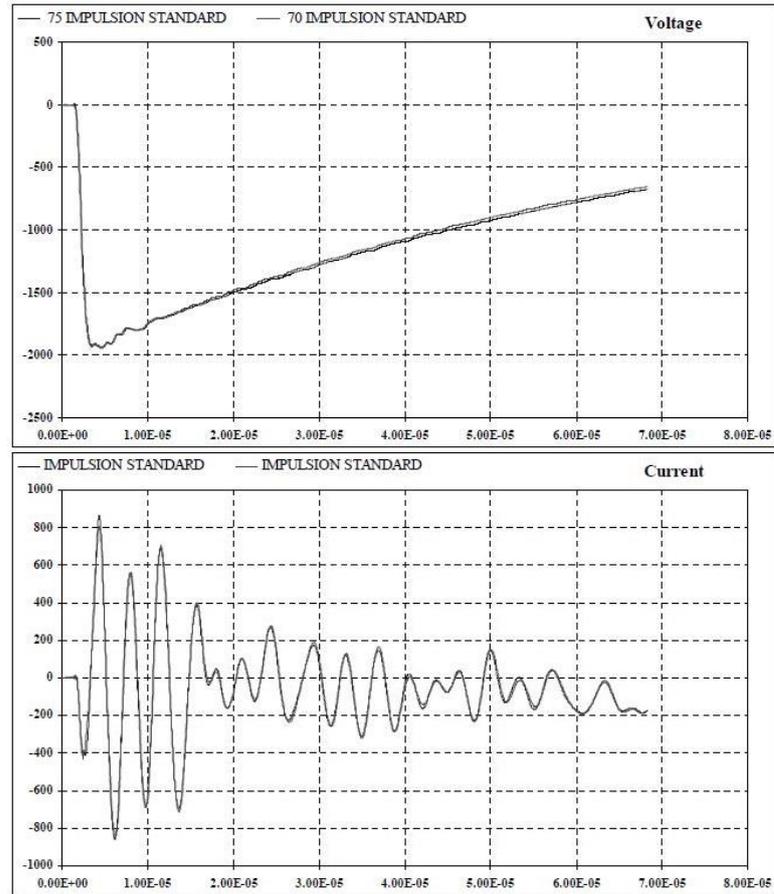


Figura 18 – Impulsos atmosféricos plenos. Fonte: Retirado de [29].

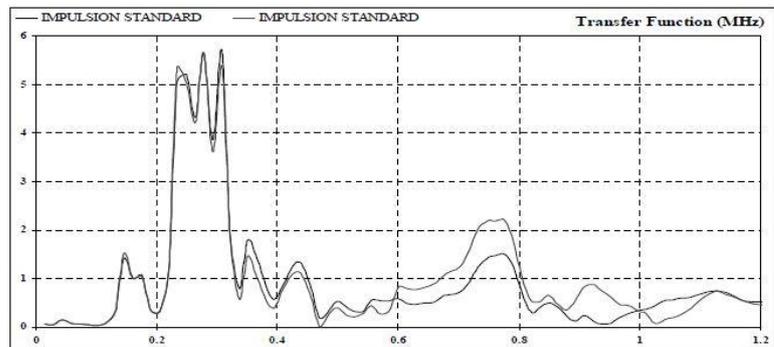


Figura 19 – FT dos IAP da Figura 18. Fonte: Retirado de [29].

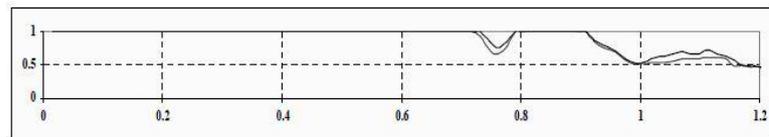


Figura 20 – Função coerência para analisar a FT, Figura 19. Fonte: Retirado de [29].

### 3.4. Caracterização de falhas no domínio da frequência

Conforme apresentado, é possível a detecção falhas no domínio da frequência, no entanto, um dos focos deste trabalho é caracterizar o tipo de falha. Essa caracterização consiste em determinar se a falha é proveniente de um curto-circuito série, uma falha shunt ou de descargas parciais. Para melhor entender essa caracterização deve-se lembrar o modelo de transformador adotado, conforme indicado em 2.2.1, o qual é composto por indutâncias e capacitâncias, séries e paralelas. Esse circuito, por sua vez, terá uma resposta em frequência e a falha de um desses elementos provocará uma alteração na sua resposta.

Deve-se então, entender o que a falha de cada elemento do circuito influencia na FT dos registros obtidos. Malewski e Poulin [12] demonstraram que, na ocorrência de falhas entre espiras, o ponto de ressonância do transformador sofre uma alteração. Este comportamento ocorre, pois a configuração de indutâncias e capacitâncias será alterada. Em consequência o ponto de ressonância também se alterará. A Figura 21 apresenta duas FT, sendo que a curva tracejada representa a FT de um enrolamento que apresentou curto-circuito entre espiras.

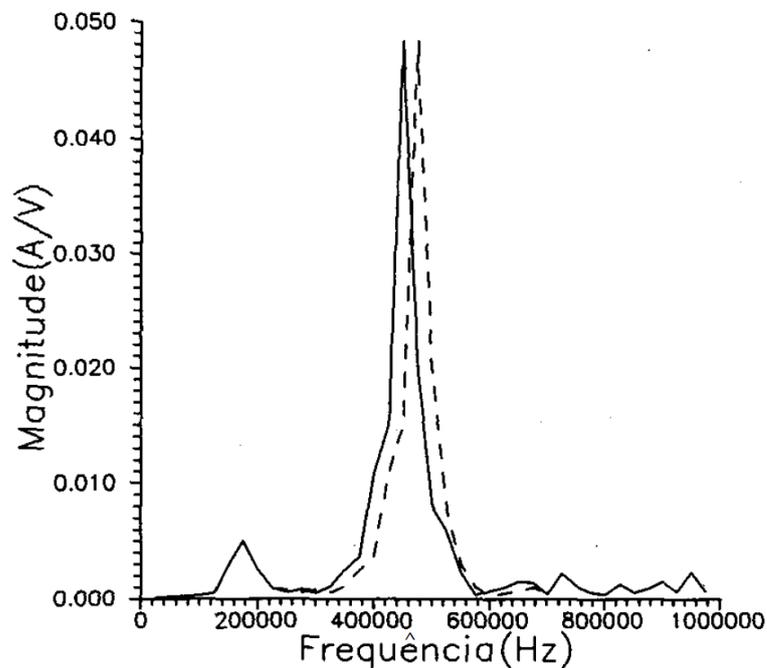


Figura 21 – FT sem falha e com falha entre espiras. Fonte: Adaptado de [46].

Em contrapartida às falhas entre espiras, na ocorrência de descargas parciais, o polo ressonante sofre uma atenuação do seu pico, sem alterar o ponto de ressonância [12]. As

descargas parciais podem ser interpretadas como a “inserção de uma resistência de alto valor (em comparação com uma resistência de valor quase 0 de um curto-circuito) entre a parte do enrolamento e terra, ou entre duas partes do enrolamento” [12]. A Figura 22 exemplifica o comportamento da FT que, na ocorrência de descargas parciais (sinal tracejado), apresenta uma atenuação em comparação ao sinal sem falha.

Ressalta-se que estas avaliações de falhas entre espiras e descargas parciais foram realizadas medindo-se a corrente de neutro e a FT foi calculada pela divisão entre a corrente de neutro e a tensão aplicada (admitância). Na literatura, a análise de falhas no domínio da frequência foi feita majoritariamente medindo-se a corrente de neutro.

No entanto, espera-se que os resultados sejam similares para medições com a corrente de linha. Para falhas entre espiras, espera-se que haja um deslocamento nos pontos ressonantes igualmente à análise feita para correntes de neutro. Da mesma forma, na ocorrência de descargas parciais, espera-se que os pontos ressonantes sofram alterações, pois ao circuito inicial seria apenas adicionada uma impedância de alto valor.

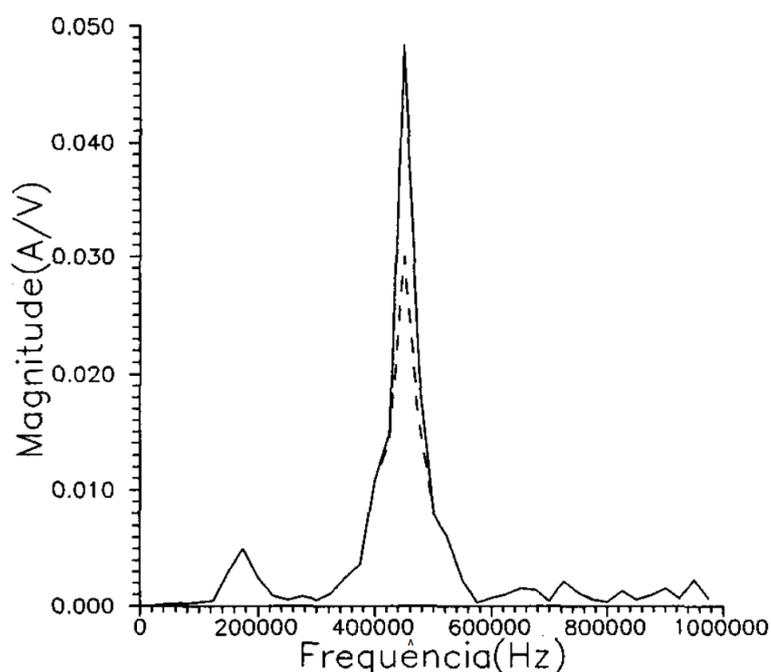


Figura 22 – FT sem falha e com descargas parciais. Fonte: Adaptado de [46].

Hanique [46] mostrou a possibilidade de se comparar impulsos cortados, independentemente do tempo de corte. Porém, deve-se entender que o fato do corte levar a

tensão a zero em poucos microsegundos implicará em um registro com intervalo de tempo menor que o IAP. Em consequência o espectro de frequência será menor quando comparado ao impulso pleno.

Malewski et al [13] corroboram as análises supracitadas e, adicionalmente, avaliam que a técnica de analisar os registros no domínio da frequência possuem a vantagem de identificar falhas de pequeno porte que podem não ser notadas pelos oscilogramas de tensão e corrente, pois sinais de falhas podem estar mascarados no domínio do tempo.

### **3.5. Hipóteses a serem testadas**

As hipóteses avaliadas neste trabalho, com base no exposto, são:

- VI. A resposta em frequência não é influenciada pela forma de onda aplicada. Impulsos cortados e plenos podem ser comparados no domínio da frequência para uma determinada faixa de frequência, por exemplo.
- VII. Falhas entre espiras provocam um deslocamento dos polos ressonantes da admitância calculada, utilizando a corrente de neutro e de linha.
- VIII. Descargas parciais são detectadas no domínio da frequência pela atenuação dos polos ressonantes da admitância calculada, utilizando a medição da corrente de linha.

Por motivos práticos, não foi possível avaliar a detecção de descargas parciais no domínio da frequência utilizando a medição da corrente de neutro.

## 4. METODOLOGIA E INSTRUMENTOS

Conforme apresentado na introdução, o objetivo da metodologia é testar as hipóteses apresentadas nos capítulos 2 e 3.

### 4.1. Hipótese I

Todo o conceito de análise de falhas no transformador durante o ensaio de impulso atmosférico tem o fundamento que o equipamento sob ensaio é linear para qualquer nível de tensão. No entanto, sabe-se que o transformador à frequência de operação (60 ou 50 Hz) apresenta não-linearidades devido ao efeito de saturação, levantando assim a dúvida deste comportamento para outras frequências, inclusive durante o ensaio de impulso atmosférico.

Porém, é necessário que o transformador tenha uma resposta linear durante o ensaio de impulso atmosférico. Serão abordadas duas técnicas para testar esta hipótese, a primeira será uma revisão teórica e literária sobre o tema, e com base nessa revisão verificar se esta afirmação se aplica aos transformadores de distribuição. A segunda, consistirá em uma comparação da resposta em frequência obtida por duas metodologias.

A primeira resposta em frequência pode ser obtida pelos sinais registrados durante o ensaio de impulso atmosférico, no qual foram aplicadas tensões elevadas e podem ter sido registrados sinais com o efeito da saturação. Uma forma de verificar a ocorrência do efeito de saturação, e conseqüentemente a não-linearidade do equipamento, é obtendo a resposta em frequência por um outro método no qual tensões de baixo valor são aplicadas.

O segundo método para obtenção da resposta em frequência é a técnica mais comum e amplamente utilizada, nomeada como análise de resposta em frequência de varredura (SFRA<sup>7</sup>). Esta técnica consiste na aplicação de sinais senoidais de frequência variada, separadamente, a um valor mínimo de tensão (geralmente entre 1 e 10 Volts) e, a cada aplicação desse sinal, é medida a resposta do equipamento. Ou seja, ao invés de usar a FFT em um impulso e separar o sinal em diversas senoides, este método aplica diretamente estas senoides para obter a resposta em frequência, conforme exemplificado na Figura 23.

---

<sup>7</sup> SFRA - Sweep frequency response analysis.

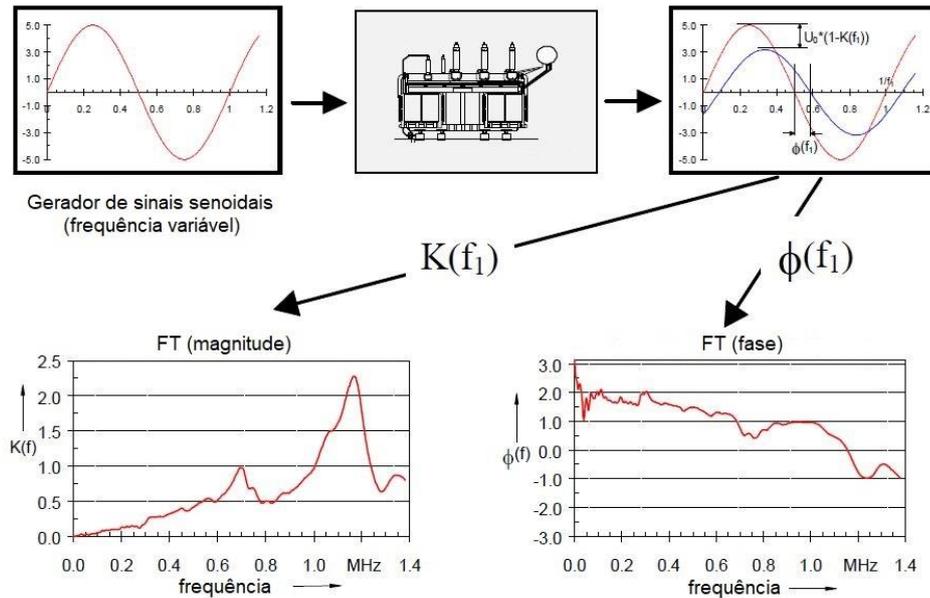


Figura 23 – Medição da FT pelo método SFRA. Fonte: Adaptado de [48].

Desta forma, serão obtidas FT por métodos e níveis de tensão diferentes, e caso haja uma diferença entre as FT a hipótese será rejeitada. No entanto, há a dificuldade para verificar o que será considerado “diferente” na comparação entre os sinais. Por isso, esta análise será feita de forma qualitativa e com base nos indícios apresentados na literatura sobre os efeitos da não-linearidade nas FT.

Adicionalmente a esta comparação entre as FT obtidas por métodos de diferentes, o transformador sob ensaio (TR8) foi submetido a uma sequência de 12 aplicações de IAP de aproximadamente 125 kV. O objetivo destas aplicações será submeter o equipamento a uma aplicação maior que a padronizada para forçar o equipamento a possíveis efeitos de saturação.

O equipamento sob ensaio foi um transformador trifásico de classe 15 kV, 225 kVA. As aplicações foram realizadas no enrolamento H1 e foi utilizada a corrente de linha como método para medição de corrente.

## 4.2. Hipóteses II, III, IV.

Ensaio de impulso com variáveis controladas foram realizados, para isso ensaiou-se um transformador (TR1) de distribuição trifásico de classe 15 kV, 150 kVA, no qual algumas falhas foram simuladas durante a aplicação dos impulsos.

Para a realização das falhas, foram utilizados diferentes pontos do enrolamento, conforme Figura 24 (letras de “a” a “h” representam os pontos dos enrolamentos acessíveis), a diferença entre os pontos adjacentes corresponde a 4,34 % do enrolamento, com exceção dos pontos “a” e “b” que conecta as duas partes do enrolamento. No entanto, com o objetivo de diminuir o percentual da falha provocada, dois enrolamentos foram conectados em série (enrolamentos H1 e H3), ou seja, a diferença entre os pontos adjacentes corresponde a 2,17 % dos dois enrolamentos conectados em série.

Portanto, apesar do transformador ser trifásico ele foi ensaiado como um transformador monofásico, sendo o enrolamento ensaiado a soma dos enrolamentos H1 e H3, o enrolamento H2 foi desconectado do circuito. A Figura 24 (1) apresenta a conexão original do transformador, a Figura 24 (2) apresenta o transformador após as modificações realizadas, os traços em vermelho são os pontos que foram curto-circuitados e os tracejados as conexões retiradas. As falhas simuladas são apresentadas na Tabela 1. As falhas de 1 a 4 são série, e as falhas de 5 a 8 são *shunts* provocadas de determinados pontos ao terra.

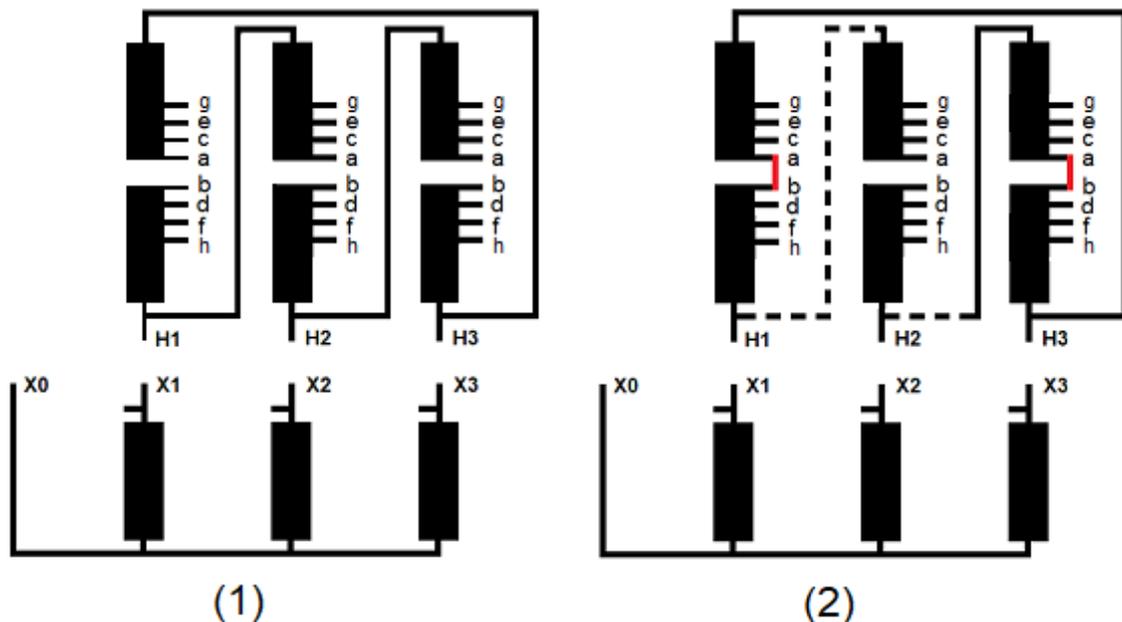


Figura 24 – Conexões do transformador TR1 ensaiado. Fonte: O autor.

Tabela 1 – Pontos das falhas.

	Pontos	Enrolamento	Localização
Falha 1	f-h	H1	13%
Falha 2	g-e	H1	25%
Falha 3	f-h	H3	63%
Falha 4	g-e	H3	75%
Falha 5	h-T	H1	13%
Falha 6	g-T	H1	26%
Falha 7	h-T	H3	63%
Falha 8	g-T	H3	76%

As falhas em um ensaio padronizado tendem a acontecer durante a aplicação dos impulsos atmosféricos, ou seja, ela não está consolidada e há a interrupção com o aumento da tensão de impulso. Por este motivo foram realizados dois pré-testes: a falha já consolidada antes da aplicação do ensaio de impulso atmosférico; e a aplicação de um *gap* entre os pontos da falha, para que estas ocorressem durante a aplicação do impulso.

Após uma análise prévia, notou-se que os resultados com a aplicação do *gap* e da falha previamente solidificada foram similares. Portanto, para padronização, foi decidido utilizar as falhas já solidificadas, desta forma evitou-se a variável da distância entre o *gap*, que seriam influenciadas pela tensão aplicada e pelo ponto em que a falha foi realizada.

A cada falha gerada, a configuração do transformador sofreu alterações de montagem, portanto, a cada alteração foram aplicados três impulsos de referência (sem falhas). A aplicação de mais de um impulso de referência teve por objetivo verificar a repetibilidade dos resultados e determinar, pela função de coerência, a faixa de frequência confiável para se comparar os resultados.

Apesar de não ser objetivo deste trabalho localizar o ponto do defeito no enrolamento, esta informação é importante para determinar se os métodos utilizados são sensíveis, independentemente do local em que a falha ocorre, e então a localização de cada falha é apresentada na Tabela 1.

A hipótese IV indica que a corrente de linha e neutro são igualmente sensíveis para detectar falhas. No entanto o critério para determinar a sensibilidade pode ser subjetivo. Uma falha no transformador é determinada caso haja uma discrepância entre os sinais obtidos e, tende-se a crer que, quanto maior esta diferença, mais sensível é o método utilizado. No entanto, a corrente de linha pode apresentar diferenças nos sinais menores que as correntes de neutro e, apesar dessa diferença ser menor, identificar um número de falhas maior que a corrente de neutro.

Portanto, o critério de sensibilidade será o método que possuir o maior número de falhas identificadas, independente da magnitude das discrepâncias. Ou seja, se todas as falhas forem identificadas em ambos os métodos, eles serão considerados igualmente sensíveis e a hipótese IV será considerada verdadeira. Devido à subjetividade do método de identificação de falhas, não é possível estabelecer um critério quantitativo para testar as hipóteses II, III e IV, portanto, elas serão avaliadas qualitativamente.

### **4.3. Hipótese V**

A hipótese V possui uma condicionante para ser testada, a identificação de sinais de alta frequência. A hipótese indica que sinais de alta frequência estão relacionadas às descargas parciais. No entanto, não é possível afirmar que a ocorrência de descargas parciais obrigatoriamente resultará em sinais de alta frequência nos registros de impulso.

Para testar a hipótese apresentada, decidiu-se por realizar a medição de descargas parciais em um grupo de transformadores que foram submetidos ao ensaio de impulso atmosférico. Desta forma, é possível analisar se há uma relação entre os sinais de alta frequência observados no impulso atmosférico com os sinais de descargas parciais que foram observados no ensaio de medição de descargas. Foram ensaiados os enrolamentos de 6 transformadores, conforme apresentado na Tabela 2.

Caso seja observada uma correlação entre os sinais observados no impulso atmosférico e a medição de descargas parciais a hipótese será considerada verdadeira, caso contrário ela será rejeitada. Não é esperado que todos os transformadores que apresentaram sinais de alta frequência apresentem sinais de descargas parciais, pois eles podem ter sofrido uma falha que foi solidificada durante as aplicações dos impulsos.

Tabela 2 - Transformadores ensaiados

Transformador	Nº fases	Classe (kV)	Potência (kVA)
TR2	3	36,2	112,5
TR3	1	36,2	10
TR4	3	15	75
TR5	1	36,2	15
TR6	1	15	25
TR7	3	15	75

#### 4.4. Hipótese VI

A comprovação da hipótese VI mostrará a possibilidade de diferenciar falhas no enrolamento do transformador de alterações nas formas de onda devido aos efeitos externos ao transformador, bem como a possibilidade de comparar IAP e IAC. Para isto, utilizou-se o transformador TR8 com diferentes formas de onda, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Característica das formas de onda aplicadas no TR1.

Aplicação	Forma de onda
1	$T_1 = 2,72 \mu s, T_2 = 46,37 \mu s$
2	$T_1 = 1,24 \mu s, T_2 = 43,31 \mu s$
3	$T_1 = 1,22 \mu s, T_c = 4,31 \mu s$

Espera-se que a resposta em frequência seja similar, independente da forma de onda aplicada. Devido às dificuldades de se definir o que é considerado similar ou não, esta análise será feita de forma qualitativa, mesma metodologia realizada na literatura.

Caso a hipótese seja considerada verdadeira, será comprovado que o método de análise no domínio da frequência pode distinguir diferenças nas formas de onda devido a efeitos externos de alterações no equipamento sob ensaio. Da mesma forma, a hipótese demonstrará a possibilidade de se comprar impulsos cortados e plenos.

Por questões práticas não é esperado que haja similaridade em toda faixa de frequência avaliada. Pois sabe-se que a FT será influenciada por diversos fatores, como a resolução do equipamento, por exemplo.

#### **4.5. Hipótese VII**

Para testar esta hipótese foram utilizados os resultados dos ensaios realizados em 4.2, no entanto estes serão analisados no domínio da frequência e somente para faltas séries. Desta forma, será possível analisar, tanto para medição da corrente de neutro quanto para corrente de linha, se na ocorrência de falhas séries há o deslocamento dos polos ressonantes da admitância calculada. A hipótese será considerada verdadeira se for observado o deslocamento dos polos ressonantes na ocorrência de falhas.

#### **4.6. Hipótese VIII**

Para avaliar a atenuação dos polos ressonantes na ocorrência das descargas parciais, os resultados dos ensaios relatados em 4.3 serão utilizados. No entanto, somente os transformadores que apresentaram sinais de alta frequência durante o ensaio de IA serão aproveitados.

É necessário que as hipóteses de 4.3 não sejam rejeitadas, desta forma entende-se que os sinais de alta frequência, por estarem correlacionados, tendem a ser efeitos das descargas parciais que ocorrem no transformador durante o ensaio de impulso atmosférico. Sendo assim, será possível avaliar se a atenuação dos polos ressonantes é um efeito causado pelas descargas parciais.

É importante que seja avaliado se é possível distinguir entre descargas parciais e falhas séries no domínio da frequência, ou seja, o deslocamento dos polos ressonantes deve acontecer somente nas falhas série. Espera-se que também ocorra atenuação dos polos ressonantes nas faltas séries, pois ao curto-circuitar trechos do circuito elétrico, este terá uma diminuição da sua impedância equivalente.

#### **4.7. Instrumentos**

Os equipamentos e softwares utilizados neste trabalho são descritos a seguir:

- Gerador de impulsos:
  - Fabricante: LAT-EFEI.
  - Configurações: 400 kV, 20 kJ,  $C_c = 1\mu\text{F}$ ,  $C_s=1300\text{ pF}$ .
- Sistema de medição:
  - Divisor de tensão: divisor resistivo, fabricante Highvolt.
  - Digitalizador: fabricante Yokogawa, modelo DL850E, 100 MA/s e 12 bits.
- Medição de descargas parciais e calibrador:
  - Medidor: fabricante Tettex, modelo DDX9121b.
  - Calibrador: fabricante Tettex, modelo KAL 9520.
- Medição de resposta em frequência, pelo método SFRA:
  - Medidor: Franalyzer, fabricante Omicron.
- Tratamentos dos sinais:
  - Software MATLAB, desenvolvedor Mathworks Inc.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Hipótese I: O equipamento sob ensaio é linear em toda a faixa de tensão a qual ele foi submetido

O IAP é unidirecional, e para o ensaio em transformadores de distribuição é realizado na polaridade negativa. Este fato, pode levar a um acúmulo da magnetização residual e conseqüentemente a alterações nos registros que podem ser interpretados como falha.

Pode-se considerar que o nível de magnetização do transformador depende da tensão aplicada, da forma de onda, do número de impulsos aplicados e das características magnéticas do núcleo. O fluxo produzido é calculado pela integral no tempo da forma de onda da tensão aplicada, conforme a lei da indução:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} \quad (5)$$

$$\Phi = \frac{-10^8}{N} \int_0^t e dt \quad (6)$$

Sendo:

- $\Phi$  - Linhas totais de fluxo, maxwells
- $e$  - Tensão, em volts
- $N$  – Número de voltas
- $t$  – Tempo, em segundos

Pode-se comparar os fluxos produzidos por um impulso e um ciclo de 60 Hz:

$$\begin{aligned} \Phi_{60} &= \frac{10^8}{N} \int_0^{1/240} 1.414 E_{rms} \sin \omega t dt \\ &= 375.000 \frac{E_{rms}}{N} \text{ linhas de fluxo} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta\Phi_i = \frac{10^8}{N} \int_0^t e dt = 140 \frac{E_i T_2}{N} \quad (8)$$

Sendo:

- $E_i$  – Tensão de crista
- $T_2$  – Tempo até meio valor

Ao analisar os valores de tensão nominal e NBI de alguns transformadores de distribuição, conforme Tabela 4, observa-se que o fluxo produzido na aplicação de um impulso apresenta um valor menor que aquele produzido quando o transformador opera à frequência e tensão nominal. Observa-se também que o maior fluxo produzido ocorre quando há uma relação maior entre a tensão nominal e o NBI do equipamento. Os valores foram calculados considerando um tempo de meio valor de 50  $\mu$ s.

Tabela 4 – Relação do fluxo

Um (kV)	NBI (kV)	$E_i / E_{rms}$	Relação $\Delta\Phi_i / \Phi_{60}$	Característica
7,97	95	11,924	0,223	1 $\phi$
13,8	95	6,884	0,129	3 $\phi$ $\Delta$ -Y
23,1	150	6,494	0,121	3 $\phi$ $\Delta$ -Y
20,9	170	8,134	0,152	1 $\phi$
18,2	170	9,347	0,174	1 $\phi$ derivação
34,5	170	4,928	0,092	3 $\phi$ $\Delta$ -Y

Ao fim de cada aplicação o fluxo não necessariamente retornará ao zero, dependendo das características magnéticas do transformador. O fluxo decairá então até um valor residual que será acrescentado ao fluxo gerado nas aplicações seguintes e, desta forma, após uma sequência de aplicações este acúmulo poderá saturar o núcleo do equipamento e, conseqüentemente, surgir não linearidades.

Supondo que o fluxo residual se mantenha no seu maior valor, considerando o pior caso apresentado na Tabela 4 e uma sequência de ensaios padronizadas, a Tabela 5 apresenta a soma dos fluxos após o ensaio. Mesmo após as aplicações os valores gerados não chegariam ao valor nominal em regime permanente. Para o cálculo dos valores da Tabela 5, foi considerado o tempo de meio valor de 50  $\mu$ s e o tempo de corte de 5  $\mu$ s.

Tabela 5 – Soma dos fluxos após uma sequência de aplicações

Aplicação	NBI (kV)	Relacao $\Delta\Phi_i / \Phi_{60}$
IAP reduzido	47,5	0,111
IAP	95	0,223
IAC reduzido	52,25	0,012
2x IAC	104,5	0,049
2x IAP	104,5	0,490
Total:		0,885

Com estas considerações é possível inferir que dificilmente o núcleo do equipamento irá saturar durante o ensaio de impulso atmosférico. Soma-se a esta análise o fato de o espectro de frequência majoritário durante o ensaio de impulso atmosférico ser acima de 10 kHz, e nesta faixa de frequência o transformador tornar-se mais capacitivo. Desta forma, a maior parte da corrente circulará pelas componentes capacitivas ao invés das componentes indutivas, diminuindo assim o fluxo induzido no núcleo do transformador.

Em um estudo [54] sobre o efeito da saturação durante o ensaio de impulso atmosférico, os autores reproduziram este efeito em um transformador de tensão nominal 4,16 kV e NBI de 60 kV e 250 kVA. Nota-se o estudo foi realizado em um transformador com nível de tensão abaixo do escopo deste trabalho (15 kV a 36,2 kV).

Portanto, com base teórica e resultados de outros trabalhos entende-se que o fenômeno de saturação no ensaio de transformadores de distribuição é possível, porém dificilmente poderá ser observado e é de difícil reprodução.

Para testar a hipótese da linearidade do transformador, um equipamento foi submetido a uma sequência de impulsos e então, comparado os resultados. Esta sequência consistiu na aplicação de 12 impulsos consecutivos de 125 kV.

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos do 1º e 12º impulsos, foi aplicado um *offset* à 12ª aplicação para melhor visualização dos registros. Devido à semelhança entre os sinais, foi calculada a diferença entre eles para que fossem mais bem analisados. Como pode-se observar, a diferença entre os sinais, tanto na tensão quanto na corrente está em torno de 0.

Analisando visualmente os gráficos gerados, não houve mudanças nas características do transformador após 12 aplicações, quantidade acima que o normalizado para um transformador. Ao analisar os registros no domínio da frequência, Figura 26, constata-se também que os sinais são similares não sendo possível notar diferenças visíveis.

Porém, os registros obtidos durante o impulso também foram comparados com a resposta em frequência obtida pelo método SFRA onde observou-se a semelhança dos sinais após a frequência de ressonância (em torno de 7kHz) e uma diferença visível antes do ponto ressonante. Surgem duas possibilidades para essa diferença: a primeira relacionada às alterações nas características do transformador, e a segunda devido aos distintos métodos utilizados para o cálculo de cada FFT.

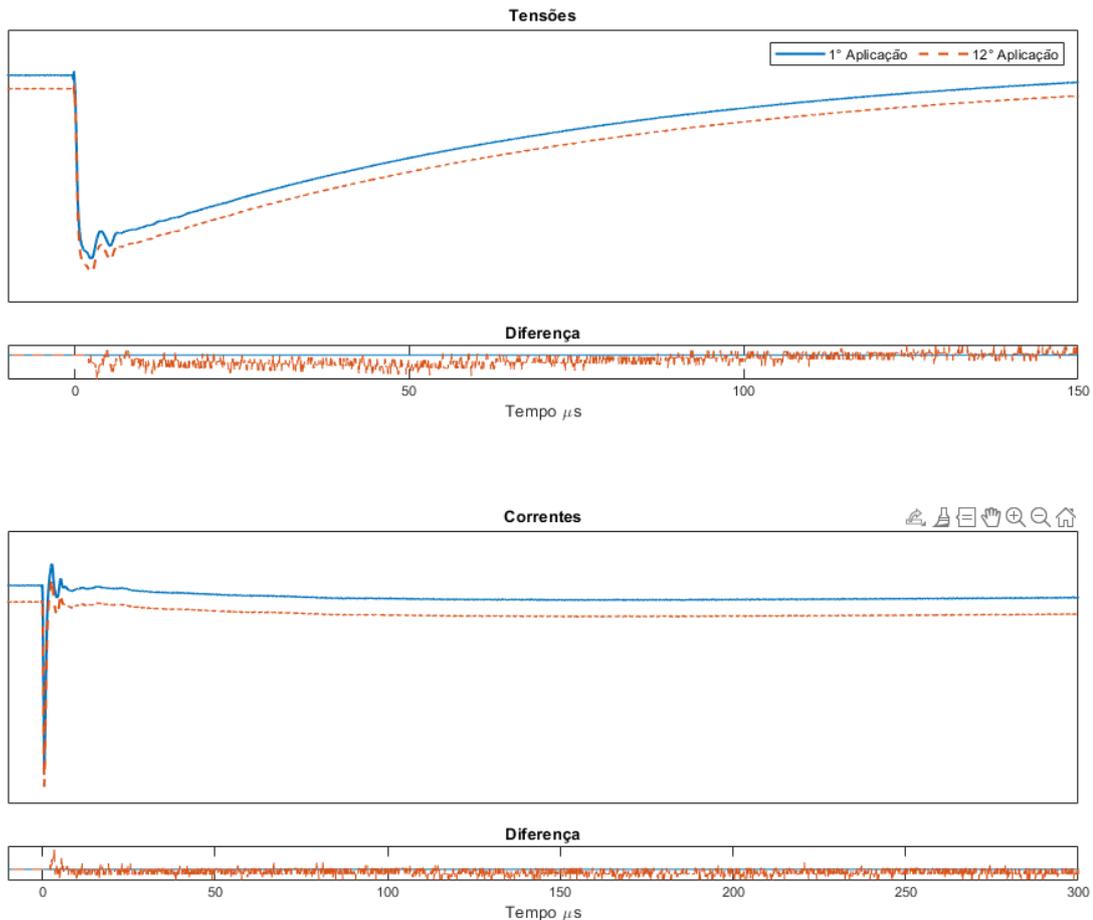


Figura 25 – Tensões e correntes da 1ª e 12ª aplicação. Fonte: O autor.

Se a primeira possibilidade fosse verdadeira, deveria se assumir que o transformador alterou suas características logo após a primeira aplicação, no entanto, pelas análises anteriores, o núcleo do equipamento não iria se saturar com apenas uma aplicação. O mais importante é que, ainda que houvesse ocorrido esta alteração, não houve diferença entre os impulsos e isto mais do que validaria o método para detecção de falhas no transformador.

Portanto, pode-se afirmar que a diferença entre o registro obtido antes do ponto de ressonância é oriunda das diferentes métodos utilizadas para o cálculo das FFT. Porém, esta comparação foi importante para mostrar que, a partir do ponto de ressonância, há uma

similaridade dos sinais. Sabe-se que o ponto de ressonância caracteriza uma mudança do transformador, onde o equipamento torna-se predominantemente capacitivo. Isto permitiria saber, em casos de diferenças, se o equipamento sofreu falhas dielétricas logo na primeira aplicação do impulso.

Conclui-se, portanto, que, apesar das análises teóricas mostrarem a possibilidade de ocorrer não-linearidades no equipamento, na prática, é inviável que este efeito ocorra durante o ensaio de impulso atmosférico. Por estes motivos, a hipótese foi considerada verdadeira.

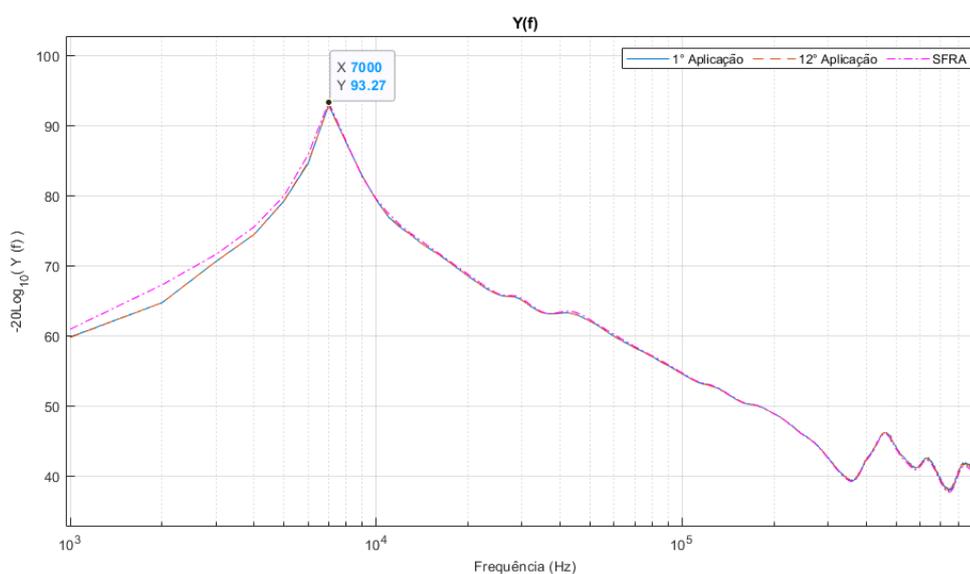


Figura 26 - Resposta em frequência dos registros e pelo método SFRA. Fonte: O autor.

## 5.2. Hipóteses II, III e IV

A Figura 27 apresenta os resultados para as faltas séries. Os registros foram sobrepostos sem o *offset*, pois somente desta forma é possível visualizar as diferenças entre os diversos sinais. Foi calculada a diferença entre os sinais e a referência, no caso o sinal sem falha. Observa-se que não se fizeram necessárias as grandezas verticais nos gráficos, pois estas não são relevantes para as análises.

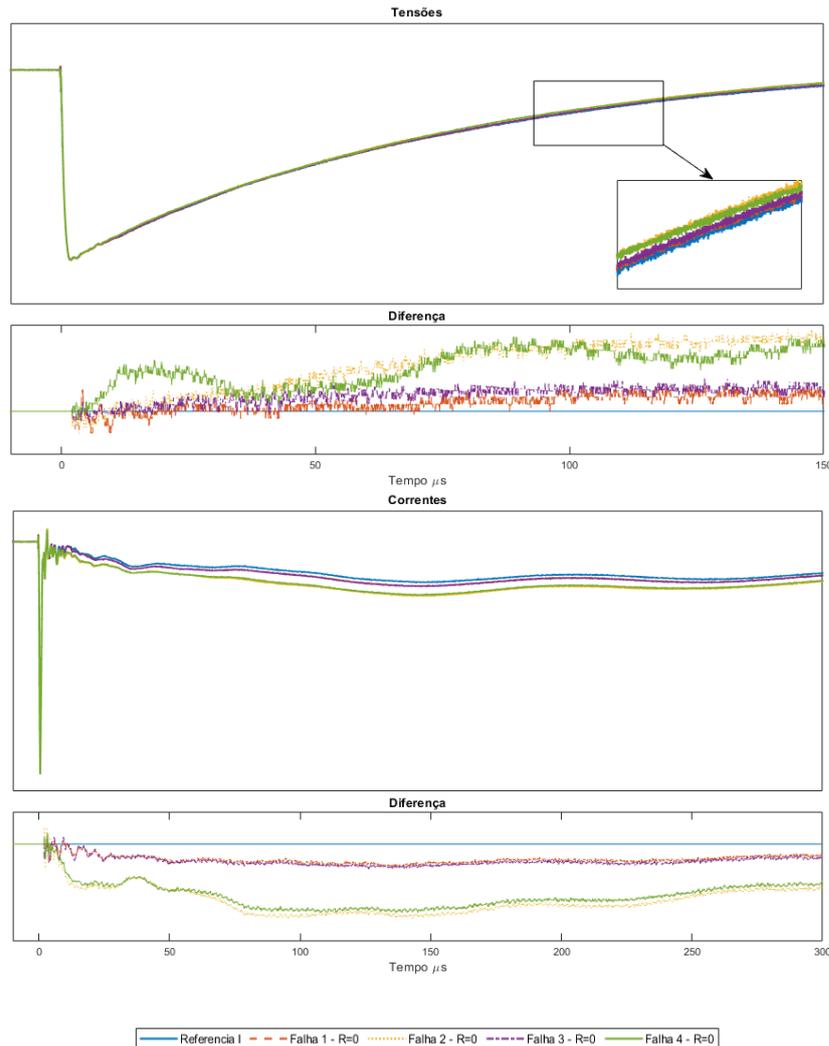


Figura 27 -Sinais de tensão e corrente para faltas série, corrente de neutro. Fonte: O autor.

É nítida, nos sinais de corrente, a diferença entre os sinais medidos com a referência. No caso, os registros com falhas apresentaram um aumento da magnitude e atingiram seu máximo valor entre 100 us e 150 us. Na revisão literária, foi mostrado que, para transformadores de grande porte, este pico é referente à componente indutiva principal do enrolamento e não é esperado que ocorra antes dos 100 us a 200  $\mu$ s [29]. Apesar do transformador ensaiado não ser considerado de grande porte, os resultados apresentam concordância com a literatura.

Observou-se também que a magnitude das falhas não apresentou necessariamente uma relação com o local da falha. No caso, as maiores diferenças foram observadas nas falhas 2 e 4, localizadas a 25 % e 75 % do enrolamento, respectivamente.

Nos sinais de tensão, a divergência entre os registros é menor. Porém com o auxílio do gráfico da diferença é possível observar que houve uma queda nos valores de tensão em torno de 100 us. Ao utilizar o recurso do *zoom*, nota-se que houve de fato uma pequena queda de tensão. Esta queda de tensão justifica-se pelo aumento de corrente provocada pelas faltas geradas.

Conforme esperado, foi observado o aumento da corrente de neutro e o mais importante para estes resultados é que não houve uma diminuição da corrente, pois caso a hipótese III seja verdadeira, será possível distinguir, ao analisar os sinais de corrente, se a falha é uma falta série ou *shunt*. Portanto, frente aos resultados obtidos pode-se considerar a hipótese II verdadeira para as situações apresentadas.

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos para as falhas *shunt*. Conforme pode-se observar, houve um claro afundamento da tensão medida e uma queda do tempo de meio valor, o que era esperado conforme apresentado nos capítulos anteriores, devido à magnitude da falta *shunt*, que, na sua ocorrência, curto-circuita uma parcela grande do enrolamento.

Há também uma diminuição da corrente medida, isto ocorre pois a corrente tende a percorrer o caminho de menor impedância, o qual não passa pelo medidor de corrente e, conseqüentemente, foi observado este efeito. Ou seja, ao contrário da medição de corrente de linha, a corrente de neutro mede somente a corrente que circula no enrolamento, desta forma é possível realizar a distinção entre uma falta série ou *shunt*.

As maiores alterações nos sinais ocorreram nas falhas 5 e 6, as quais estavam mais próximas do início do enrolamento e da aplicação do impulso. As falhas 7 e 8, por estarem mais distantes do ponto de aplicação da tensão, tiveram uma queda de tensão menor e, conseqüentemente, mudanças de menor porte, principalmente nos sinais de tensão.

Geralmente, as faltas *shunt* são fáceis de se distinguir, porém, conforme resultados apresentados, quanto mais distante do ponto de aplicação da tensão, menor é a magnitude da falha. Desta forma, falhas *shunt* e série podem ser confundidas, e a distinção do defeito poderá ser feita através da tendência dos sinais. A falha será série se a corrente aumentar, e *shunt* se a corrente diminuir.

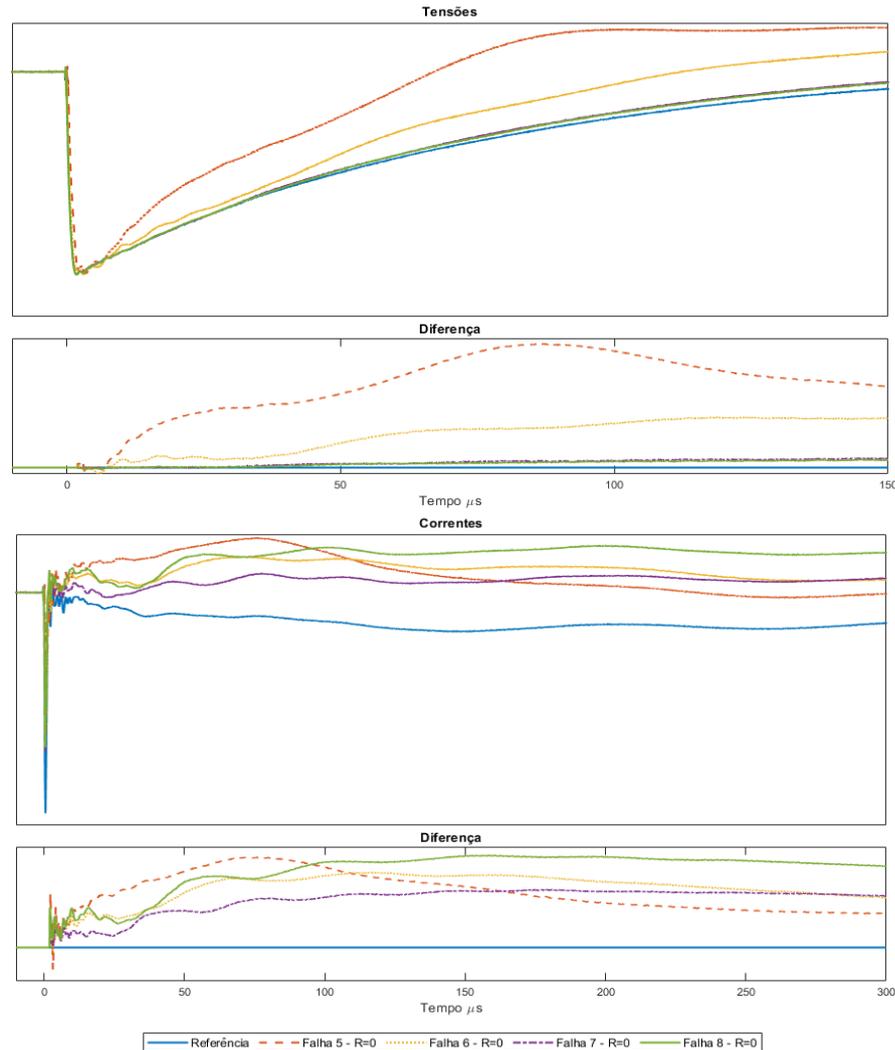


Figura 28 - Sinais de tensão e corrente para faltas *shunt*, corrente de neutro. Fonte: O autor.

As figuras 29 e 30 apresentam os resultados referentes às faltas série e *shunt*, respectivamente, medidas com a corrente de linha. Independente da magnitude das alterações que ocorreram nos registros, todas elas, tanto na corrente quanto na tensão, são facilmente observadas a olho nu. Ou seja, ainda que a medição de corrente de linha ou de neutro possa ter uma alteração nos sinais maior do que a outra, ambas atingiram o seu objetivo de detectar as falhas. Caso as mudanças nos sinais não fossem o suficiente para detectar uma falha específica, seria então possível afirmar que um método é preferível em relação ao outro, o que não aparenta ser o caso.

Dado os resultados apresentados e o exposto nesta seção, as hipóteses II, III e IV foram consideradas verdadeiras. Ou seja, as faltas série sofrem um aumento na corrente medida, enquanto as faltas *shunt* sofrem uma diminuição. Foi constatado também, que a medição de

corrente utilizando o método da corrente de linha possui sensibilidade igual à corrente de neutro, porém a última possibilita diferenciar o tipo de falha.

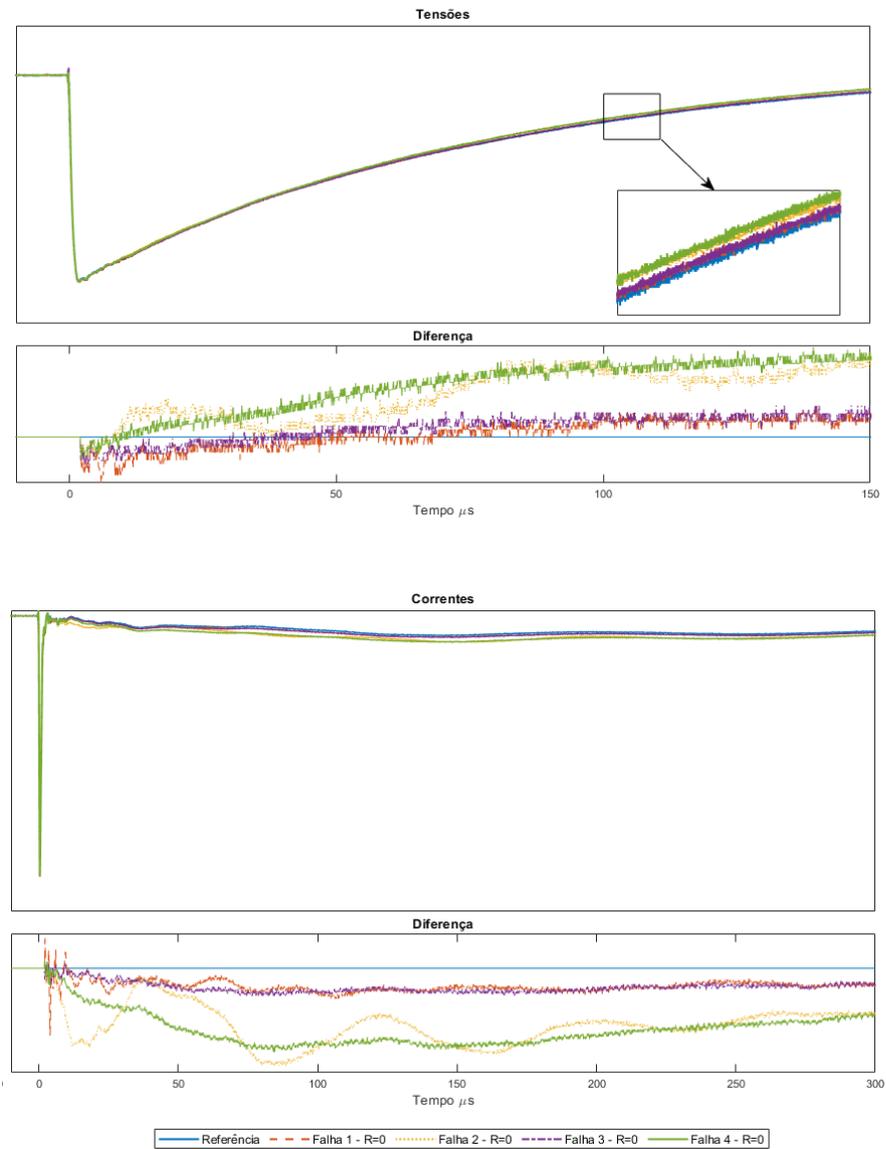


Figura 29 - Sinais de tensão e corrente para faltas série, corrente de linha. Fonte: O autor.

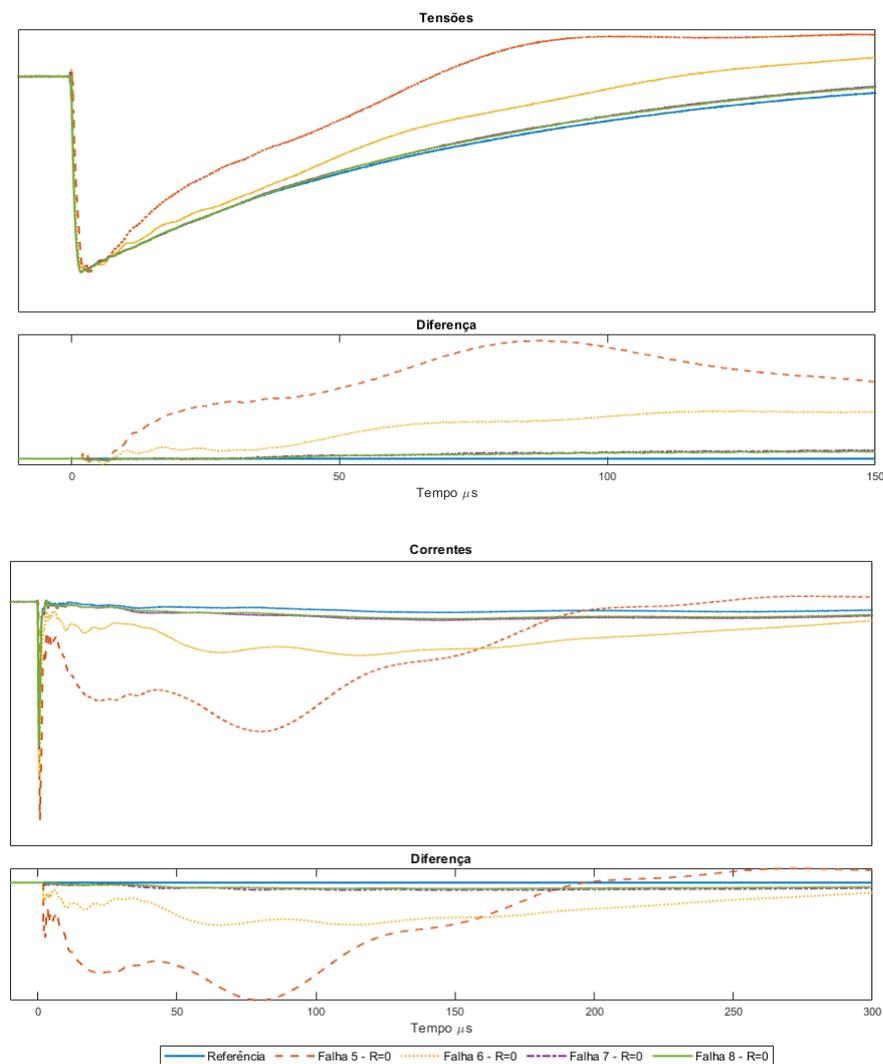


Figura 30 - Sinais de tensão e corrente para faltas *shunt*, corrente de linha. Fonte: O autor.

### 5.3. Hipótese V: Sinais de alta frequência são indícios de descargas parciais

A Tabela 6 apresenta uma compilação das medições de descargas parciais nos transformadores e uma análise se os transformadores apresentaram ou não sinais de alta frequência durante o ensaio de impulso atmosférico. Os sinais de alta frequência surgiram nos registros de corrente, e nenhuma das formas de onda analisadas tiveram alterações significativas a não ser pelos sinais de alta frequência observados. Estes sinais são caracterizados por oscilações que ocorrem em um intervalo de cerca de 1  $\mu$ s, conforme Figura 31, e as correntes apresentadas são medições da corrente de linha.

Tabela 6 – Medições de descargas parciais e sinais de alta frequência

Transformador	Enrolamento	Sinais de Alta Frequência?	Nível de DP (pC)
TR2	H1	Sim	28104
TR2	H2	Sim	31813
TR2	H3	Sim	28158
TR3	H1	Sim	17388
TR4	H1	Não	5
TR4	H2	Não	6
TR4	H3	Não	6
TR5	H1	Sim	14645
TR6	H1	Não	3
TR7	H1	Sim	5
TR7	H2	Sim	235
TR7	H3	Sim	6

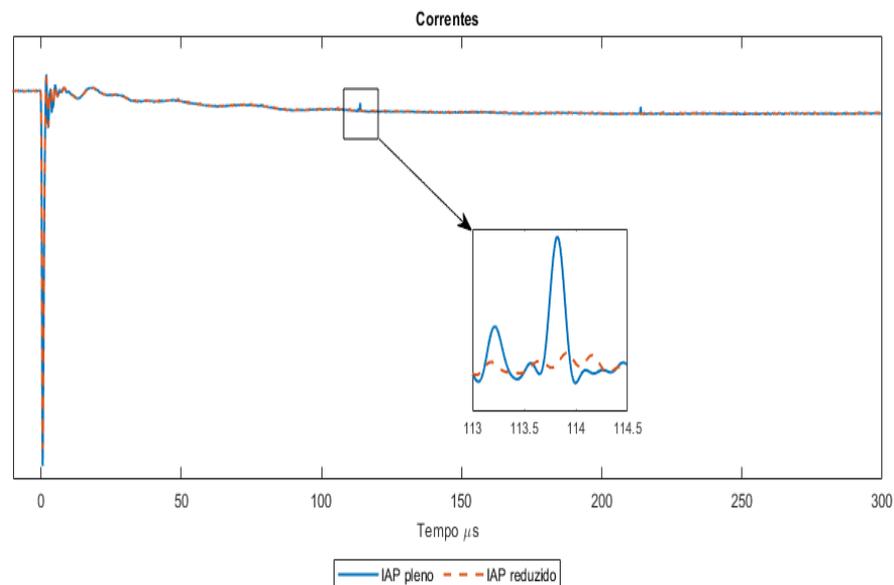


Figura 31 - Sinais de alta frequência no transformador TR5. Fonte: O autor.

O objetivo é observar uma correlação entre os resultados obtidos no ensaio de impulso atmosférico e na medição de descargas parciais. Para melhor análise, os resultados da Tabela 6 foram agrupados de acordo com os sinais de alta frequência, conforme Tabela 7, sendo o primeiro grupo para enrolamentos que resultaram em oscilações durante o impulso atmosférico e o segundo grupo, aqueles que não tiveram.

Tabela 7 – Medições de descargas parciais e sinais de alta frequência agrupados.

Sinais de Alta Frequência	Qtd. de enrolamentos	Enrolamentos acima de 235 pC
Sim	8	6 de 8
Não	4	0 de 4

Todos os transformadores que não tiveram oscilações de alta frequência durante o ensaio de impulso atmosférico não obtiveram um nível de DP maior do que 6 pC, valor que pode ser considerado baixo e, muitas vezes, é o nível de ruído ambiente de muitos laboratórios de ensaio.

O segundo grupo, enrolamentos que apresentaram sinais de alta frequência, mostrou que 6 dos 8 enrolamentos tiveram um nível de descargas parciais acima de 235 pC, o que mostra uma clara correlação entre os resultados dos ensaios. Os dois enrolamentos que não tiveram um nível de DP maior que 235 pC pertencem ao mesmo transformador, e o 3º enrolamento deste equipamento é o que resultou em um nível de DP de 235 pC. Desta forma, tem-se neste equipamento um resultado que difere dos outros, pois todos os outros tiveram níveis de DP de até 6 pC ou acima de 17 nC.

Porém, ainda que 2 dos 3 enrolamentos não tenham apresentado um nível de DP acima de 235 pC, os resultados do impulso atmosférico em todos os enrolamentos mostraram indícios de descargas parciais no equipamento. Portanto, pode-se considerar que todos os transformadores que tiveram sinais de alta frequência durante o ensaio de impulso atmosférico apresentaram um nível de descargas parciais significativo.

Desta forma, pode-se concluir que os sinais de alta frequência durante o ensaio de impulso atmosférico são característicos de descargas parciais que ocorrem no enrolamento durante o ensaio. As faltas *shunt* e *série*, muitas vezes podem vir acompanhadas de oscilações de alta frequência, porém são acompanhadas de alterações significativas nos sinais de corrente e tensão.

Ressalta-se que o objetivo deste trabalho é discutir e analisar os resultados do ensaio de impulso atmosférico, principalmente no sentido das técnicas de análise de falha e sua caracterização. Portanto, não é objetivo usar ou avaliar o ensaio de impulso atmosférico como método alternativo ao ensaio de medição de descargas parciais.

Com base nos resultados obtidos e sua coerência com a literatura sobre o assunto, a hipótese V foi considerada verdadeira, e sinais de alta frequência são características de descargas parciais durante o ensaio de impulso atmosférico.

#### 5.4. Hipótese VI: Resposta em frequência não é influenciada pela forma de onda aplicada para uma determinada faixa de frequência.

Foram aplicadas ao transformador TR8 diferentes formas de onda. O resultado no domínio do tempo é apresentado na Figura 32, com diferentes tempos de frente e cauda e diferentes oscilações, incluindo um impulso cortado. Todos os impulsos foram aplicados ao mesmo transformador em um nível de aproximadamente 40 kV. Este equipamento foi o mesmo utilizado posteriormente para os ensaios para o teste da hipótese I, que indiretamente demonstrou a integridade do equipamento. Portanto, os resultados neste item (5.4) não apresentam falhas.

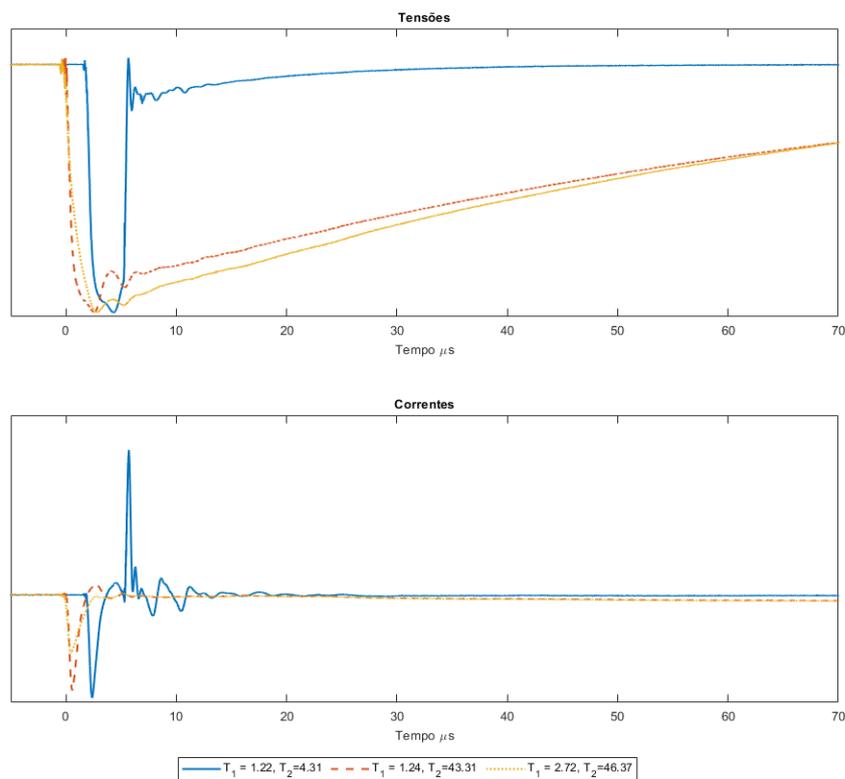


Figura 32 - Diferentes formas de onda no domínio do tempo. Fonte: O autor.

A Figura 33 apresenta os resultados dos impulsos aplicados no domínio da frequência. Como pode ser observado, os impulsos plenos (traços azul e amarelo) apresentam poucas diferenças visíveis, que são mais notáveis em torno de 1 MHz. Porém, ao se comparar com o impulso cortado (traço vermelho), estas diferenças são maiores e visíveis, em torno de 1 kHz e 7 kHz (ponto de ressonância).

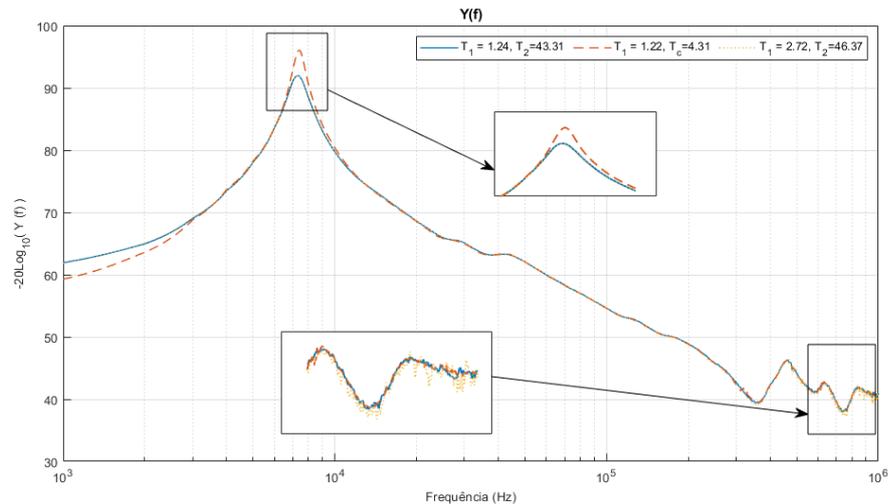


Figura 33 – Resposta em frequência dos impulsos aplicados. Fonte: O autor.

O nível de tensão em cada frequência pode variar, conforme a forma de onda, e consequentemente esses valores podem estar abaixo da resolução do equipamento utilizado para se medir as formas de onda. Desta forma, é interessante que sejam analisados os espectros de tensão e corrente, Figura 34 e Figura 35.

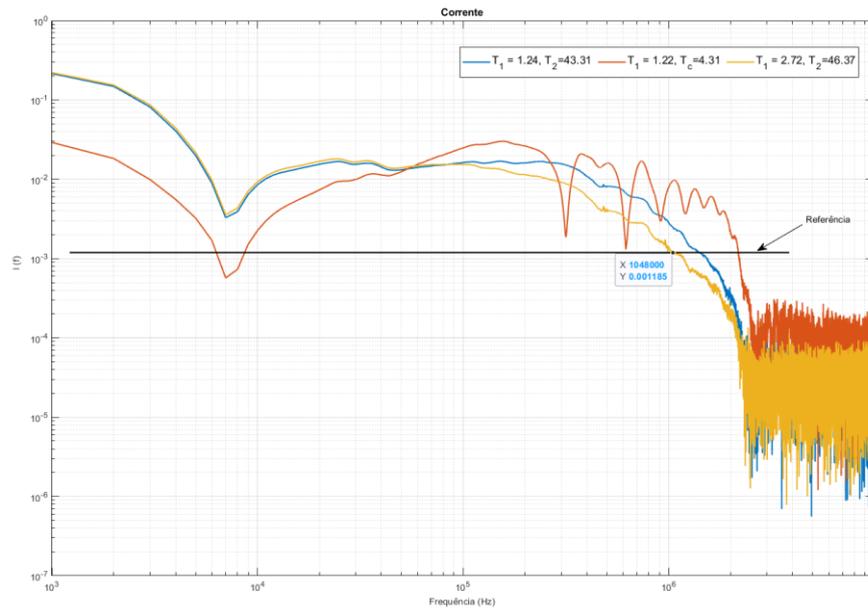


Figura 34 – Corrente no domínio da frequência. Fonte: O autor.

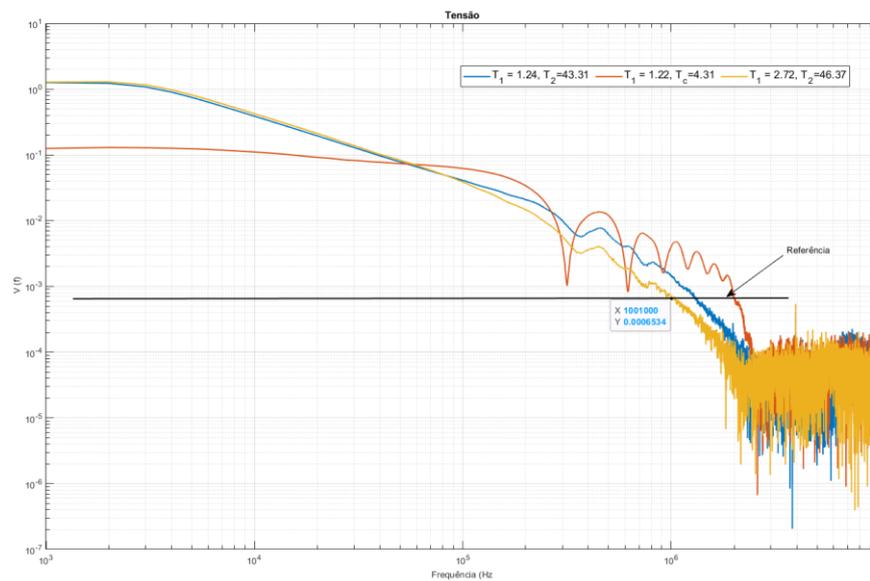


Figura 35 – Tensão no domínio da frequência. Fonte: O autor.

As linhas de referência presentes em ambas as figuras interceptam o traço amarelo em torno de 1 MHz, ponto onde há divergência das FT, o qual apresenta um nível de tensão e corrente menor que os traços azul e vermelho (impulso pleno com  $T_1=1.24$  us e cortado com  $T_c=4.31$  us). Um nível de tensão menor nesta frequência é esperado pois o IAP com tempo de

frente de 2,72 us é mais lento que os outros impulsos, conseqüentemente, a tensão nesta faixa se aproxima do erro devido à resolução do equipamento.

Na frequência de ressonância da corrente, o traço vermelho está abaixo da linha de referência e é justamente o sinal que apresenta uma divergência na frequência de ressonância das funções de transferências. Portanto, entende-se que uma das explicações para estas divergências entre os sinais são provenientes da resolução do equipamento para estes níveis de tensão.

Deve-se considerar que as divergências no ponto de ressonância ocorreram nos registros do impulso cortado, que após alguns microssegundos do instante de corte, tanto a tensão quanto a corrente tendem a zero rapidamente, ao contrário dos impulsos plenos, que possuem valores de tensão e corrente relevantes por algumas centenas de microssegundos. Ou seja, as componentes de baixa frequência tendem a diminuir em comparação aos impulsos plenos.

Porém, ainda assim, nos registros do impulso cortado há uma diferença em torno de 1 k Hz, o qual apresenta um nível de tensão e corrente maiores que a linha de referência traçada nos gráficos. Desta forma, não seria possível afirmar que estas diferenças são provocadas por erros de medição devido à resolução do equipamento.

Excluindo a possibilidade da resolução do equipamento de medição, outras possibilidades para esta diferença devem ser investigadas. No entanto, ressalta-se que esta diferença ocorreu somente com o impulso cortado e a faixa de frequência de maior interesse é prioritariamente aquela onde as isolações são mais bem avaliadas, frequências após o ponto de ressonância, e nesta faixa as FT não possuíram diferenças visíveis.

Desta forma, a hipótese proposta dependerá do sistema de medição, da faixa de frequência de interesse e das formas de onda aplicadas. Tendo conhecimento destas variáveis o avaliador poderá comparar sinais de diferentes formas de onda.

Ainda que tenham sido demonstradas algumas limitações ao comparar os impulsos plenos e cortados, o mais importante é demonstrar que, em casos de alterações nos impulsos plenos, o operador ou avaliador poderá determinar se essas diferenças são provenientes de falhas no equipamento sob ensaio ou na geração da forma de onda. Ainda assim, apesar das limitações ao se comparar os IAP e IAC, este trabalho mostrou a possibilidade de comparar estes impulsos sendo ainda necessária uma maior investigação neste sentido.

## 5.5. Hipóteses VII: Falhas entre espiras provocam um deslocamento dos polos ressonantes da admitância calculada

As figuras 36 e 37 apresentam as FT das medições realizadas para corrente de neutro e linha, respectivamente. Com base na literatura, espera-se que, para falhas entre espiras, haja um deslocamento dos polos ressonantes ou até mesmo o surgimento de novos polos.

Em ambas as medições foram observados os dois efeitos, o deslocamento e surgimento de novos polos. Para as falhas medidas com a corrente de neutro houve o surgimento de novos polos nas falhas 2 e 4, enquanto as falhas 1 e 2 apresentaram um deslocamento do polo ressonante. Nota-se que estes efeitos foram constatados no segundo polo ressonante (ponto 2). Outras diferenças também foram observadas nos pontos 1, 3, 4 e 5.

Em contrapartida à corrente de neutro, a corrente de linha apresentou um deslocamento dos polos ressonantes no ponto 1 e somente na falha 2 teve o surgimento de um novo polo ressonante. Semelhantemente à medição de neutro, as falhas 1 e 2 foram similares em seu padrão, enquanto as falhas 2 e 4 divergiram mais, uma vez que, na falha 4, não houve o surgimento de um novo polo.

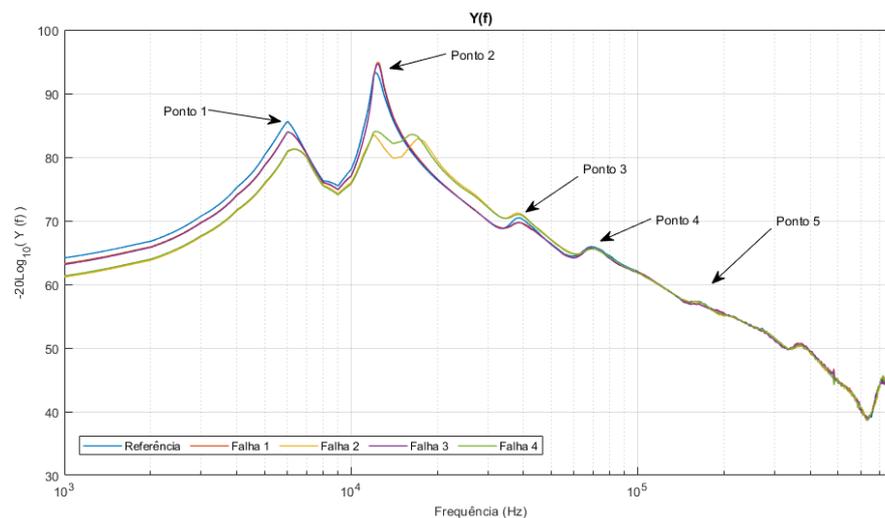


Figura 36 – FT dos impulsos com medição da corrente de neutro. Fonte: O autor.

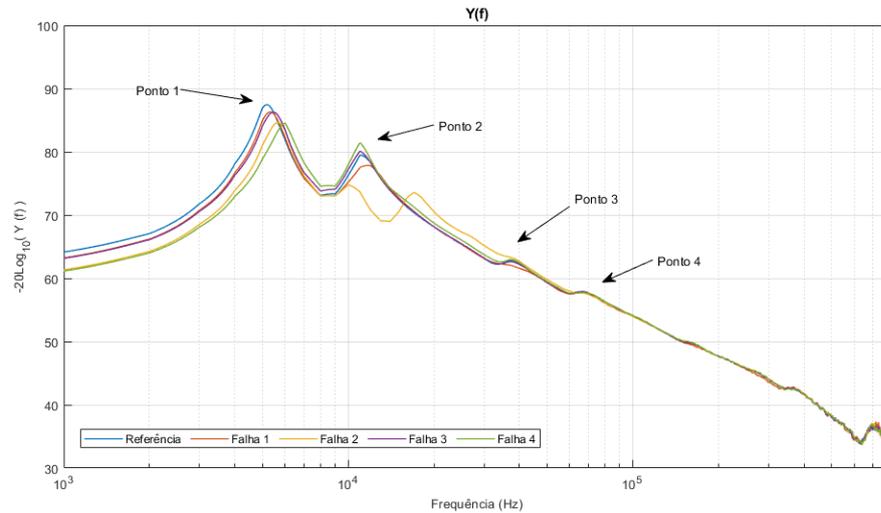


Figura 37 – FT dos impulsos com medição da corrente de linha. Fonte: O autor.

As diferenças entre as falhas são visíveis e, para as situações em questão, não se fez necessário a utilização de outros recursos para identificação da falha, como a função coerência. Portanto para demonstrar a utilização da função coerência, uma falha foi gerada com a inserção de uma resistência de falha de  $350 \Omega$ , para que os efeitos fossem atenuados e menos perceptíveis. As figuras 38 e 39 apresentam os resultados obtidos.

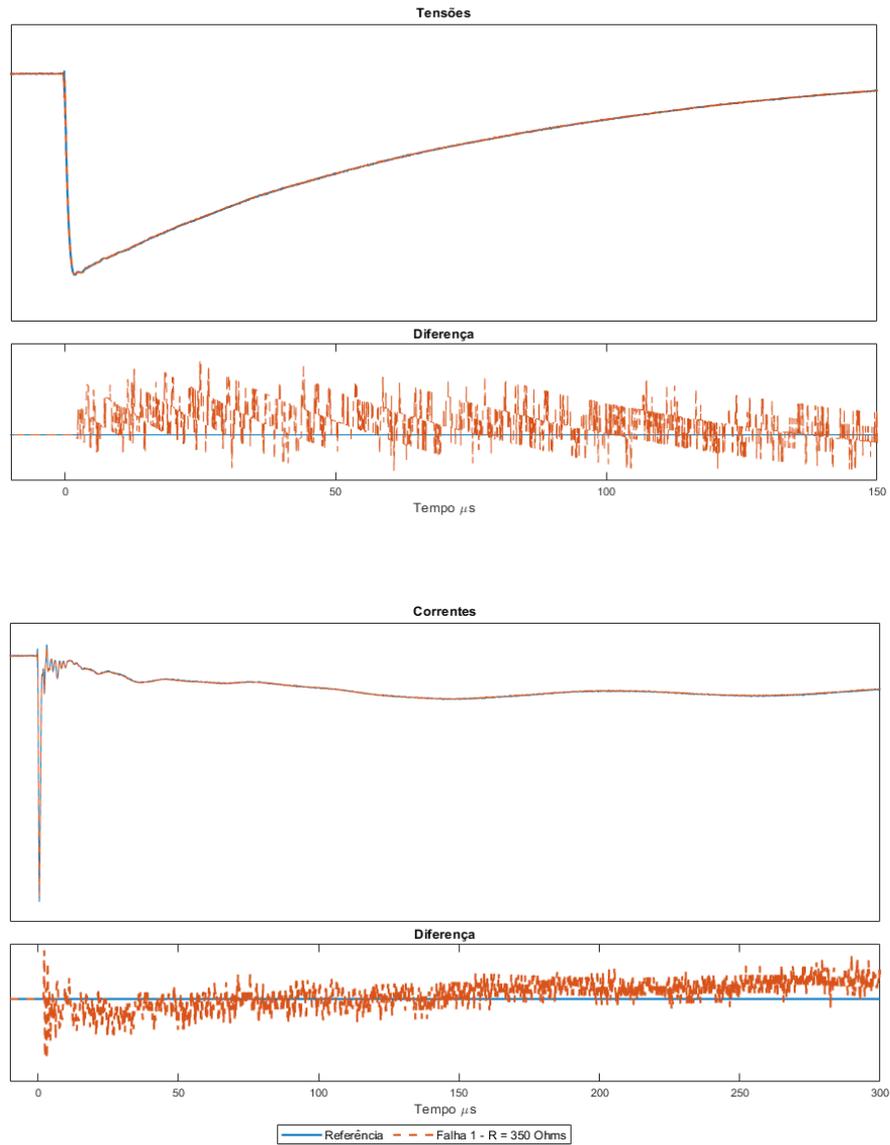


Figura 38 – Tensão e corrente para falha com resistência de  $350 \Omega$ , medição da corrente de neutro. Fonte: O autor.

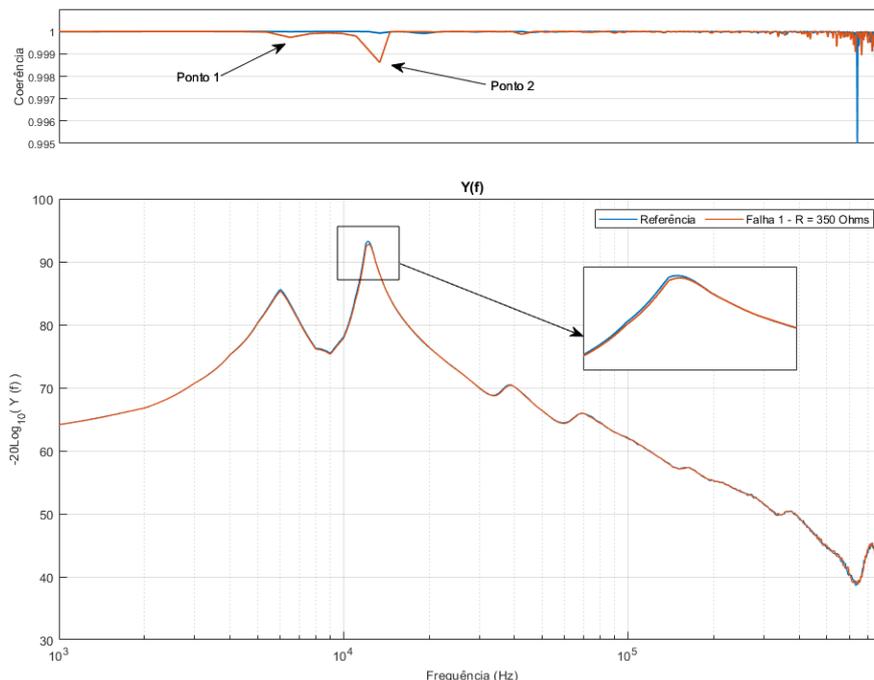


Figura 39 – FT e função coerência para falha com resistência de 350  $\Omega$ , medição da corrente de neutro. Fonte: O autor.

Conforme esperado, a resistência de falta atenuou os efeitos causados pela falta a ponto de ser praticamente imperceptível no domínio do tempo, enquanto no domínio da frequência surgem algumas diferenças (principalmente no ponto de ressonância onde está o *zoom*). Neste caso, as poucas diferenças entre os sinais torna o diagnóstico mais difícil, e o uso da função coerência se apresenta como uma ferramenta auxiliar nesta avaliação.

Duas funções coerência foram calculadas, a primeira (em azul) é o resultado da comparação de dois impulsos de referência e a segunda (em vermelho) é referente ao cálculo entre um impulso de referência e aquele onde suspeita-se que haja uma falha. Os pontos 1 e 2 são onde a função coerência apresenta uma diminuição considerável do seu valor quando comparada ao sinal de referência, o que indica que nestes pontos os sinais divergiram, provavelmente, devido à alterações no transformador.

Porém, este tipo de análise deve ser feita com um certo conhecimento do sistema de medição, pois uma diminuição da função coerência pode ser provocado pelo nível de tensão abaixo da resolução do equipamento, conforme foi observado na faixa de 600 kHz a 700 kHz. Apesar da função coerência demonstrar ser uma ferramenta capaz de auxiliar na detecção de falha, esta não pode ser um fator determinante em situações de aprovação ou reprovação.

Porém, esta técnica abre caminhos para uma metodologia que atenua a subjetividade na identificação de falhas em transformadores a partir do momento em que é possível estabelecer um indicador numérico na análise dos resultados.

Ainda que não seja possível utilizar a ferramenta como critério de aprovação ou reprovação, a função coerência pode ser utilizada em laboratórios como um controle de qualidade, principalmente os fabricantes de transformadores, que teriam um indicador de qualidade dos equipamentos.

O valor de  $350 \Omega$  foi um valor extrapolado para demonstrar simplesmente a sensibilidade do método de detecção pela função coerência. No entanto, segundo a literatura [12], a inserção de uma resistência de alta impedância pode se caracterizar como a simulação de descargas parciais.

## **5.6. Hipóteses VIII: Descargas parciais são detectadas no domínio da frequência pela atenuação dos polos ressonantes da admitância calculada**

No item 5.3, foi demonstrado que sinais de alta frequência são indícios de descargas parciais no transformador. Desta forma, os resultados apresentados serão utilizados para avaliar se a ocorrência de descargas parciais pode ser relacionada à atenuação dos polos ressonantes no domínio da frequência.

A Figura 40 apresenta os resultados referentes ao transformador TR5, o qual, pela FT, apresenta uma atenuação do primeiro ponto ressonante (em torno de 10 kHz) até aproximadamente 100 kHz. Com o auxílio da função coerência é mais fácil verificar uma diminuição do indicador nesta faixa de frequência. A queda deste indicador apresentou concordância com os índices apresentados na Figura 39, quando o valor do indicador caiu a um valor similar na ocorrência de uma falha gerada com uma resistência de falta.

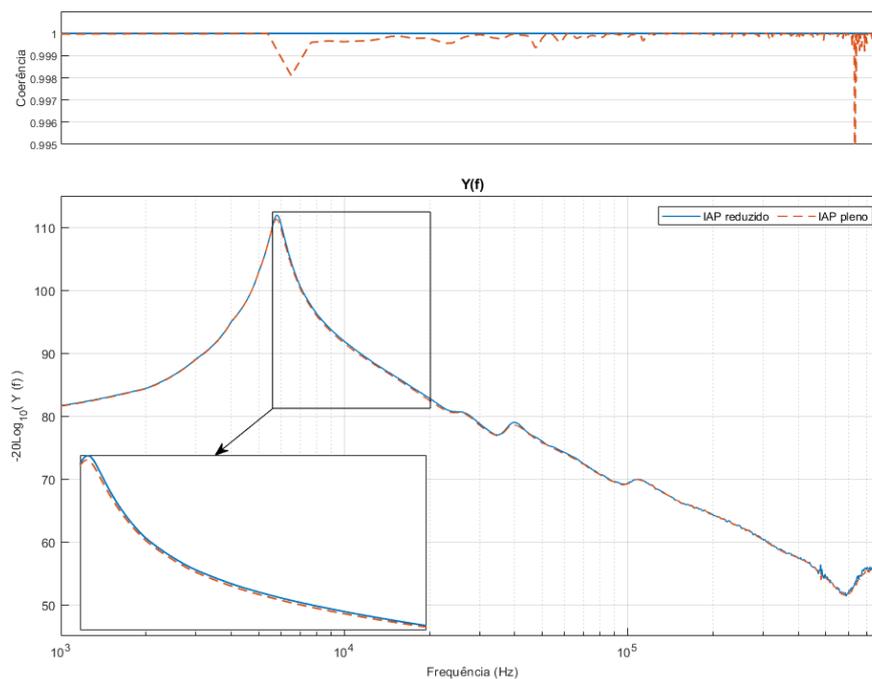


Figura 40 – FT e função coerência do transformador TR5. Fonte: O autor.

Ao analisar os outros transformadores que constam no item 5.3, surgem resultados nos quais há tanto a atenuação quanto o deslocamento do polo ressonante, conforme apresentado na Figura 41. Ao considerar que estes registros não apresentam outras falhas a não ser descargas parciais, tem-se então que descargas parciais podem de fato provocar o deslocamento dos polos ressonantes.

Entende-se que esses registros podem ser interpretados como falhas entre espiras, no entanto não há evidências suficientes para isso. Conforme apresentado durante este trabalho e com base na literatura existente, as falhas série, quando ocorrem, geralmente são acompanhadas de alterações significativas nos registros de corrente.

Deve-se ressaltar que as falhas série apresentadas neste trabalho correspondem a 2,17 % do enrolamento total. No caso de falhas com um percentual menor de espiras curto-circuitadas, poderia haver sinais nos quais estas alterações não fossem tão significativas e visíveis? Caso isto ocorresse, estas poderiam ser registros similares ao apresentado no item 5.3?

Caso haja semelhanças entre descargas parciais e falhas entre espiras em algumas situações, surge o dilema de como diagnosticar o equipamento. Quando há a ocorrência de sinais de alta frequência sem outras alterações significativas nas formas de onda, esta será

considerada uma falha entre espiras ou descargas parciais? Quais critérios devem ser considerados na aprovação ou reprovação do equipamento?

Descargas parciais não podem ser critérios de reprovação devido ao nível de tensão elevado que é aplicado ao equipamento e por existir um ensaio específico para determinar o nível de descargas parciais aceitáveis. No entanto, se o equipamento for aprovado, há o risco deste estar com falhas de isolamento mais críticas ao invés de descargas parciais.

Conforme a hipótese apresentada, de fato há uma atenuação dos polos ressonantes nos resultados analisados, porém, para alguns casos, foi também observado o seu deslocamento no domínio da frequência. Desta forma, não é possível distinguir, analisando somente a FT, se a falha observada é de uma falta série ou descargas parciais.

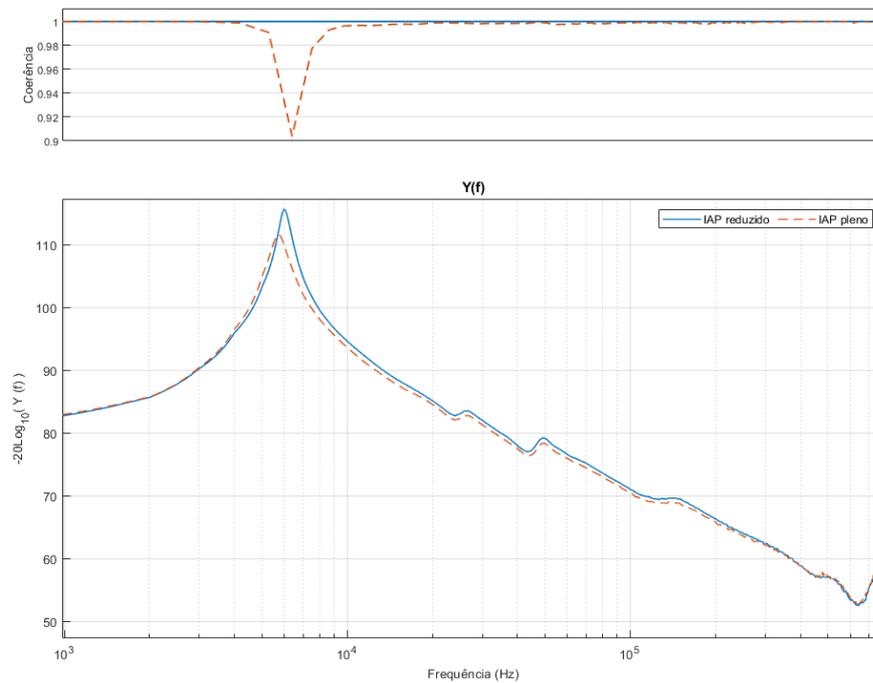


Figura 41– FT e função coerência do transformador TR3. Fonte: O autor.

## 6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1. Conclusão

A proposta deste trabalho foi realizar uma revisão literária e testar algumas hipóteses encontradas a fim de reforçá-las. Como a literatura muitas vezes não faz uma distinção de acordo com o transformador sob ensaio, este trabalho buscou testar e corroborar as hipóteses levantadas em transformadores de distribuição.

Foi comprovado que o transformador se comporta de forma linear durante o ensaio de impulso atmosférico. Apesar de ocorrerem induções no equipamento capaz de saturá-lo, estas induções são menores que aquelas observadas quando em regime permanente (60 ou 50 Hz). Além disto, as altas frequências durante o ensaio de impulso, tornam o transformador mais capacitivo e as correntes que circulam pelos elementos indutivos são muito menores, impedindo assim a saturação e o comportamento não-linear.

Alguns resultados [54] demonstraram a saturação de transformadores durante a aplicação do impulso atmosférico, estes foram realizados em um equipamento com nível de tensão menor que o escopo deste trabalho. Desta forma, apesar de não ser teoricamente impossível, a hipótese foi considerada verdadeira pois é muito difícil que este fenômeno ocorra na prática.

Foi demonstrado que a medição de corrente de neutro possui a vantagem de permitir a distinção entre falha série e falta *shunt* analisando a tendência da magnitude da corrente, ou seja, se a falta for série a corrente tende a aumentar enquanto se a falta for *shunt* a tendência é que diminua o seu valor. Esta característica demonstrou uma vantagem em relação a corrente de linha, uma vez ambas apresentaram sensibilidade semelhantes para detecção de falhas.

Foi demonstrado na hipótese V que os sinais de alta frequência que surgem nos registros durante o ensaio de impulso atmosférico estão relacionados a descargas parciais que ocorrem no equipamento durante o ensaio. Esta conclusão foi feita comparando os registros durante o ensaio de impulso atmosférico com o ensaio de descargas parciais realizado posteriormente nestes equipamentos, o que mostrou a correlação entre sinais de alta frequência com as descargas parciais.

O interesse da análise no domínio da frequência surge a partir do momento em que não é possível determinar, no domínio do tempo, se certas alterações nas formas de onda são

resultados de falhas transformador ou simplesmente alterações nas formas de onda geradas. Desta forma, impulsos com diferentes formas de onda foram aplicados em um transformador e analisados no domínio da frequência. Após análise, foi comprovado que, de fato, o método é válido e a comparação pode ser feita, porém com algumas ressalvas. Como as diferentes formas de onda possuem diferentes níveis de tensão para diferentes espectros de frequência, há faixas em que a comparação não é possível pois o nível de tensão pode ficar abaixo da resolução do equipamento.

O operador e o laboratório que utilizam esta técnica devem ter conhecimento dos seus equipamentos, principalmente o sistema de medição, para saber quando as diferenças na FT são provocadas pela baixa sensibilidade de medição naquele ponto da frequência. Esta análise pode ser feita facilmente observando os gráficos de tensão e corrente no domínio da frequência, onde é possível ver os pontos em que as grandezas elétricas ficam abaixo da resolução da medição.

Todos estes fatores mostraram que a comparação entre um impulso pleno e cortado é possível para uma faixa de frequência, porém devido às grandes diferenças entre as formas de onda, determinados espectros apresentam divergências quando comparados, principalmente em frequências mais baixas.

Os resultados das falhas geradas mostraram que as faltas séries geram de fato um deslocamento do polo ressonante, pois elas alteram a configuração RLC do equipamento e, conseqüentemente, a sua frequência de ressonância. Isto foi observado tanto na medição da corrente de neutro quanto na corrente de linha.

Era esperado que na ocorrência de descargas parciais fossem observadas a atenuação dos polos ressonantes da FT, o que de fato ocorreu. Contudo, esta não foi a única característica identificada, também ocorreu, em alguns equipamentos, deslocamento da frequência de ressonância. Ou seja, não foi possível determinar critérios que diferenciam as falhas séries das descargas parciais.

Não obstante, foi apresentada a função coerência como uma ferramenta que auxilia o avaliador na detenção de falta no domínio da frequência. A técnica foi sensível para falhas que visualmente são difíceis de serem identificadas. Ademais, a função coerência se apresenta como uma ferramenta na qual há um indicador numérico e que pode futuramente, se corretamente utilizada, diminuir a subjetividade da análise de falhas nos transformadores durante o ensaio de impulso atmosférico.

A técnica de análise no domínio de frequência colabora para a identificação de falha, porém mostra que há um grau de incerteza tanto no sistema de medição quanto na diferenciação no tipo de defeito. Portanto, mais estudos devem ser realizados para aplicação desta técnica, ainda que estejam presentes em normas internacionais.

Por fim, além da importância metodológica de reproduzir os resultados divulgados por outros autores, este trabalho se apresenta como uma contribuição à literatura nacional, onde há poucas publicações sobre o assunto. Desta forma, espera-se que este texto contribua tanto para pesquisadores quanto para aqueles que necessitam analisar resultados de impulso atmosférico, sejam estes laboratórios independentes, fabricantes, inspetores ou compradores do equipamento.

## **6.2. Trabalhos futuros**

Devido à dificuldade de diferenciar falhas série e descargas parciais no domínio da frequência, surgem questionamentos se falhas séries podem ser confundidas com descargas parciais. As evidências apresentadas neste trabalho concordam com os resultados encontrados na literatura, onde falhas entre espiras geralmente provocam alterações significativas nas formas de onda. No entanto, sugere-se que mais trabalhos sejam realizados, onde percentuais menores do enrolamento são curto-circuitados para verificar se de fato essa confusão de diagnóstico pode ocorrer. Esta investigação se torna necessária pois uma confusão de diagnóstico pode resultar na aprovação de um equipamento com falhas de isolamento, bem como a reprovação de um equipamento em condições adequadas de funcionamento.

Recomenda-se que outros transitórios diferentes da corrente de linha e de neutro sejam estudados para se avaliar suas sensibilidades e capacidade de caracterizar os tipos de falhas que ocorrem no transformador. É interessante que seja estudada também, a viabilidade ou vantagem de se utilizar mais de uma técnica de identificação de falhas.

Recomenda-se um estudo para a utilização da função coerência como um indicador quantitativo para identificação de falha. É interessante que um mapeamento seja realizado com diferentes percentuais de falhas em diferentes locais do transformador, a fim de encontrar uma relação entre essas falhas com os indicadores encontrados.

## REFERÊNCIAS

- [1] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 5356-1: Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades.*, Rio de Janeiro, 2007.
- [2] IEC - International Electrotechnical Commission, *IEC 60076-1, Power transformers - Part 1: General*, 2000.
- [3] IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformer*, 2016, pp. 1-74.
- [4] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 5356-3: Transformadores de potência - Parte 3: Níveis de Isolamento, Ensaios Dielétricos e Espaçamentos Externos em Ar*, Rio de Janeiro, 2007.
- [5] ABNT - 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, 2007.
- [6] S. Chakravorti, D. Dey e B. Chatterjee, "Impulse Fault Analysis," em *Recent trends in the condition monitoring of transformers*, London, Springer, 2013, pp. 27-60.
- [7] P. A. Abetti, "Bibliography on the surge performance of transformers and rotating machines," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 77, pp. 1150-1168, 1958.
- [8] P. A. Abetti, "Bibliography on the Surge Performance of Transformers and Rotating Machines - Second Supplement," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 83, pp. 855-858, 1964.
- [9] AIEE COMMITTEE REPORT, "Lightning Reference Bibliography, 1950-1960," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 81, pp. 944-952, 1962.

- [10] R. Malewski e A. Dechamplain, "Digital impulse recorder for high-voltage laboratories," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 636-649, 1980.
- [11] IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Standard for Digital Recorders for Measurements in High-Voltage Impulse Tests*, 1988.
- [12] R. Malewski e B. Poulin, "Impulse testing of power transformers using the transfer function method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, pp. 476-489, 1988.
- [13] R. Malewski, E. Gockenbach, R. Maier, K. Fellmann e A. Claudi, *Five years of monitoring the impulse test of power transformers with digital recorders and the transfer function method*, Paris: Cigré, 1992.
- [14] T. Leibfried e K. Feser, "Off-line- and on-line-monitoring of power transformers using the transfer function method," em *Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Montreal, 1996, pp. 34-37 vol. 1.
- [15] S. K. Pandey e L. Satish, "Multiresolution signal decomposition: A new tool for fault detection in power transformers during impulse tests," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, pp. 1194-1200, 1998.
- [16] L. Satish, "Short-time Fourier and wavelet transforms for fault detection in power transformers during impulse tests," *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, vol. 145, pp. 77-84, 1998.
- [17] R. Vanaja e K. Udayakumar, "A new paradigm for impulse testing of power transformers," em *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077)*, IEEE, 2000, pp. 2206-2210.
- [18] S. N. Fernando, M. R. Raghuveer e W. Ziomek, "Detection of temporary faults during impulse tests using wavelets," em *2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, 2003, pp. 478-481.

- [19] S. N. Fernando e M. R. Raghuveer, "Application of Wavelets to Identify Faults During Impulse Tests," em *CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005.*, IEEE, 2005, pp. 581-584.
- [20] N. P. Kumar, J. Amarnath, K. D. Shrivastava e B. P. Singh, "Identification of winding faults in power transformers by low voltage impulse test and neutral current method using wavelet transform approach," em *CEIDP'05. 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005.*, IEEE, 2005, pp. 140-143.
- [21] E. Al-Ammar e G. G. Karady, "Transfer function analysis using STFT for improvement of the fault detection sensitivity in transformer impulse test," em *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, IEEE, 2005, pp. 1855-1862.
- [22] S. N. Fernando, M. R. Raghuveer e W. Ziomek, "Optimal wavelet selection to identify faults during impulse tests," em *2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, 2006, pp. 77-80.
- [23] E. Al-Ammar, G. G. Karady e H. J. Sim, "Novel Technique to Improve the Fault Detection Sensitivity in Transformer Impulse Test," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 717-725, 2008.
- [24] P. Rajamani, D. Dey e S. Chakravorti, "Classification of dynamic insulation failures in transformer winding during impulse test using cross-wavelet transform aided foraging algorithm," *IET electric power applications*, vol. 4, pp. 715-726, 2010.
- [25] A. De e N. Chatterjee, "Recognition of impulse fault patterns in transformers using Kohonen's self-organizing feature map," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, pp. 489-494, 2002.
- [26] P. Purkait, A. Chatterjee, S. Chakravorti e K. Bhattacharya, "Translationally adaptive fuzzy classifier for transformer impulse fault identification," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, pp. 33-40, 2003.

- [27] A. De e N. Chatterjee, "A fuzzy ARTMAP fault classifier for impulse testing of power transformers," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 11, pp. 1026-1036, 2004.
- [28] IEC - International Electrotechnical Commission, *IEC 60076-4, Power transformers - Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing - Power transformers and reactor*, 2002.
- [29] IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Guide for Transformer Impulse Tests," *IEEE Std C57.98-2011 (Revision of IEEE Std C57.98-1993)*, pp. 1-92, 2012.
- [30] M. A. d. A. Romano, *Software e Hardware para Análise de Ensaio de Impulsos Atmosféricos em Equipamentos para Média Tensão*, Itajubá, 2014.
- [31] M. de Andrade Marconi e E. M. Lakatos, *Fundamentos de metodologia científica*, 5ª ed., São Paulo: Atlas S.A., 2003.
- [32] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *ABNT NBR IEC 60060-1, Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão - Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio*, 2013.
- [33] IEC - International Electrotechnical Commission, *IEC 60076-3, Power transformers - Part 3: Insulation Levels, Dielectric Tests and External Clearances in Air*, 2000.
- [34] A. D'Ajuz, C. dos S. Fonseca, F. Salgado Carvalho, J. Amon Filho, L. E. Nora Dias, M. Polo Pereira, P. C. V. Esmeraldo, R. Vaisman e S. de O. Frontin, *Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - aplicação em sistemas de potência de alta tensão*, Niterói, 1987.
- [35] M. E. de Carvalho Paulino, "O Setor Elétrico," Setembro 2009. [Online]. Available: [http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/04/fas\\_aval\\_i\\_transf\\_utiliz\\_analis\\_resp\\_em\\_freq\\_cap1.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/04/fas_aval_i_transf_utiliz_analis_resp_em_freq_cap1.pdf). [Acesso em 19 09 2019].

- [36] McGraw, Tata, *Transformers - bharat heavy electrical limited*, New Delhi: Hill Publishing Company, 2003.
- [37] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *ABNT NBR IEC 60270 Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão - Medição de descargas parciais*, Rio de Janeiro, 2017.
- [38] J. a. P. K. Kuffel, *High voltage engineering fundamentals*, Elsevier, 2000.
- [39] J. H. Hagenguth, "Progress in impulse testing of transformers," *Electrical Engineering*, vol. 63, pp. 999-1005, 1944.
- [40] E. C. a. G. H. H. Rippon, "The detection by oscillographic methods of winding failures during impulse tests on transformers.," *Proceedings of the IEE- Part II: Power Engineering*, Vols. %1 de %2v. 96, n. 53, pp. 769-778, 1949.
- [41] J. H. a. J. R. M. Hagenguth, "Impulse Testing of Power Transformers," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, Vols. %1 de %2v. 71, n. 3, pp. 697-704, 1952.
- [42] F. Beldi, "Impulse testing of transformers measuring procedures and test circuits.," CIGRE, 1952.
- [43] E. Stenkvist, *Study of fault detection and failure location during surge testing of transformers.*, Paris: CIGRE, 1952.
- [44] L. C. Aicher, "Some Aspects of Ground-Current Measurements during Transformer Impulse Tests.," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, Vols. %1 de %2v. 79, n. 3, pp. 1101-1103, 1960.
- [45] P. T. M. VAESSEN e E. HANIQUE, "A new frequency response analysis method for power transformers.," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, pp. 384-391, 1992.

- [46] E. Hanique, "A transfer function is a reliable tool for comparison of full- and chopped lightning impulse tests," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 9, pp. 1261-1266, 1994.
- [47] T. Leibfried e K. Feser, "Monitoring of power transformers using the transfer function method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, pp. 1333-1341, 1999.
- [48] K. Feser e e. al., "The transfer function method for detection of winding displacements on power transformers after transport, short circuit or 30 years of service," *CIGRÈ*, vol. 12, 2000.
- [49] S. W. Smith, *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*, 1997.
- [50] J. W. NILSSON e S. A. RIEDEL, *Circuitos Elétrico*, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [51] W. Hauschild e E. Lemke, *High-voltage test and measuring techniques*, Springer, 2014.
- [52] IEC - International Electrotechnical Commission, *IEC 61083-1, Instruments and software used for measurement - Part 1: Requirements for instruments*, IEC, 2001.
- [53] R. Malewski e e. al., "Checking electromagnetic compatibility of a HV impulse measuring circuit with coherence functions," em *High Voltage Measurements and Calibration*, Arnhem, 1994.
- [54] M. P. Pereira, *Desenvolvimento de Sistema Automático para Ensaios de Impulsos de Tensão em Equipamentos Elétricos*, Itajubá, 2017.