

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEEL

GUILHERME DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE ENSAIOS DE SURTO DE TENSÃO EM ESTADORES DE
MOTORES DE INDUÇÃO POR SIMULAÇÃO DE ALTA FREQUÊNCIA**

JOINVILLE

2024

GUILHERME DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE ENSAIOS DE SURTO DE TENSÃO EM ESTADORES DE
MOTORES DE INDUÇÃO POR SIMULAÇÃO DE ALTA FREQUÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ademir Nied

JOINVILLE

2024

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

da Silva, Guilherme

Caracterização de Ensaio de Surto de Tensão em
Estatores de Motores de Indução por Simulação de Alta
Frequência / Guilherme da Silva. -- 2024.
83 p.

Orientador: Ademir Nied

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2024.

1. Ensaio de surto de tensão. 2. Estator bobinado. 3.
Ensaio elétricos. I. Nied, Ademir. II. Universidade do Estado
de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

GUILHERME DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE ENSAIOS DE SURTO DE TENSÃO EM ESTADORES DE
MOTORES DE INDUÇÃO POR SIMULAÇÃO DE ALTA FREQUÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ademir Nied

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ademir Nied
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

Prof. Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Prof. Dr-Ing. Luís Alberto Pereira
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Joinville, 30 de janeiro de 2024

Aos mestres, professores e educadores, pois se pude enxergar mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo apoio incondicional e orientação inestimável durante todos esse anos, cada conquista na minha vida tem um pedaço de vocês.

Agradeço a cada um dos professores que fizeram parte dessa jornada, que me mostraram como a educação pode ser transformadora e que transformaram minha vida, em especial, nessa etapa, aos professores da Universidade Estadual de Santa Catarina.

Deixo um agradecimento mais especial ainda ao meu orientador, Prof. Dr. Ademir Nied, pelo incentivo e pela dedicação ao meu projeto de pesquisa, e principalmente pela paciência com meus horários alternativos durante as viagens do ano de 2023.

Agradeço a WEG Equipamentos Elétricos S/A pelo fornecimento de toda a estrutura e tempo para a realização das atividades experimentais do mestrado nas suas instalações e pelo apoio dos meus colegas de trabalho, que foram essenciais para o andamento das atividades, em especial aos colaboradores Agnaldo Reus Medeiros Rodrigues, Gustavo Ugioni, Vitor Marcon, Jefferson Sullivan Alves Rosa, Tiago Franca de Souza, Jacqueline Jordan Guedes, Natália Dolinski e André Luiz de Campos.

Agradeço aos amigos que fizeram parte dessa jornada, que são parte essencial da minha vida e que são os pilares de quem eu sou. Agradecimento especial aos amigos Eduardo Samuel Schmitz, Jean Carlos Lemke, André Rabelo Savi, Rodrigo de Souza, Lucas Francisco Bramorski, Ismael Schwirkowsky, Lucas Zastrow e Jean Carlos Valentini.

Por fim, um agradecimento a todos que tiraram um tempinho para ajudar com a revisão desse texto e com tantos *insights* e discussões durante o período do mestrado, em especial ao Bernard da Silva e a Priscila da Costa.

RESUMO

O ensaio de surto de tensão é um dos testes mais comuns para checar a integridade da isolamento entre espiras das bobinas do estator bobinado em máquinas elétricas de indução. Após anos de pesquisa sobre as características de aplicação do ensaio e os efeitos no estator em teste, um dos desafios mais relevantes que ainda persistem para o uso do ensaio é a escolha de um critério confiável de aprovação. Este trabalho apresenta um modelo de simulação em alta frequência do estator bobinado no ensaio de surto de tensão, de forma a obter as variações das ferramentas de análise quando o estator em teste apresentar um defeito entre espiras. Os dados de simulação e experimentais são comparados e, através desses dados de simulação e de medições das variações experimentais do processo, é proposta uma tolerância para o estator simulado e o uso do procedimento demonstrado para determinar de forma mais objetiva a tolerância do ensaio. Por fim, apesar das diferenças entre os dados simulados e experimentais, é possível verificar que o limite de tolerância proposto classificou corretamente os resultados experimentais em estatores saudáveis e com defeito, possibilitando novas discussões sobre o processo de definição de tolerâncias e a confiabilidade do teste.

Palavras-chave: Ensaio de Surto de Tensão. Estator bobinado. Ensaio elétrico.

ABSTRACT

The Surge Test is one of the most common tests to check the inter-turn insulation integrity of electrical machines. After years of research on the application of the Surge Test and its effects on the wound stator, one of the most significant problems remaining is the choice of reliable pass/fail criteria. This work presents a high-frequency circuit simulation model of the wound stator during the Surge Test to assess the variations in the test's evaluation tools when an inter-turn fault is presented. Simulated and experimental data are compared and, with the obtained results, a tolerance range is proposed for the simulated stator and a procedure to objectively determine the tolerance for the test. Finally, although there were some differences between the simulated and experimental data, the tolerance range proposed could correctly classify the experimental data in healthy and faulty stators, which brings some new discussions about the test's tolerance and reliability.

Keywords: Surge test. Wound stator. Electrical tests.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diferença na distribuição de tensão entre impulsos de frente de onda abrupta (a) e frente de onda lenta (b)	24
Figura 2 – Diagrama do circuito de aplicação do ensaio de surto de tensão.	25
Figura 3 – Formas de onda obtida em um ensaio de surto de tensão - escala vertical: Tensão (V); escala horizontal: Tempo (s)	26
Figura 4 – Envelope de tensão recomendado na norma IEEE std 522 para o ensaio de surto de tensão	27
Figura 5 – Conexões de fase (superior) e de ligação (inferior) para o ensaio de surto de tensão	28
Figura 6 – Exemplo da variação da área entre as formas de onda saudável (contínua) e com curto-circuito entre espiras (tracejada)	29
Figura 7 – Circuito equivalente de parâmetros agrupados para análise do comportamento interno da máquina durante transitórios de tensão	33
Figura 8 – Modelo do motor de indução em altas frequências	35
Figura 9 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico com falha entre espiras em uma das fases	36
Figura 10 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico com falha entre espiras em uma das fases	37
Figura 11 – Estator bobinado utilizado para a simulação e experimentos práticos	39
Figura 12 – Diagrama de conexão da ponte RLC com o estator em teste para medição de modo diferencial (esquerda) e de modo comum (direita)	40
Figura 13 – Curva de impedância pela frequência medida no ensaio de modo diferencial	40
Figura 14 – Curva de impedância pela frequência medida no ensaio de modo comum	41
Figura 15 – Curva da capacitância pela frequência medida no ensaio de modo comum	42
Figura 16 – Curvas de resposta do estator em modo comum com a indutância magnetizante alterada para 1% do valor nominal.	45
Figura 17 – Circuito equivalente para a simulação de peças saudáveis no ensaio de surto de tensão.	46
Figura 18 – Circuito simulado no ambiente <i>PSIM</i>	52
Figura 19 – Forma de onda simulada de um estator saudável	53
Figura 20 – Formas de onda de um estator saudável comparada à forma de onda do estator com uma espira a menos	54
Figura 21 – Formas de onda de um estator saudável comparada à forma de onda do estator com uma espira a mais	55
Figura 22 – Estator conectado à Cabine de Testes de Bobinagem durante os ensaios	57
Figura 23 – Árvore de amostragem do experimento realizado	57
Figura 24 – Exemplo das conexões do ensaio para uma das bobinas testadas (1-4).	58

Figura 25 – Fluxograma de aplicação do ensaio nos estatores bobinados	59
Figura 26 – Curvas experimentais de um estator saudável	60
Figura 27 – Curvas experimentais de um estator saudável e com uma espira a menos . . .	61
Figura 28 – Gráfico de variabilidade dos resultados experimentais obtidos	62
Figura 29 – Comparação entre formas de onda experimental e simulada	64
Figura 30 – Comparação entre os resultados experimentais e simulados	65
Figura 31 – Faixas de aprovação e reprovação para o EAR considerando os dados de simulação e desvios obtidos experimentalmente	67
Figura 32 – Faixas de aprovação e reprovação para o ZCP considerando os dados de simulação e desvios obtidos experimentalmente	68
Figura 33 – Circuito de simulação e seus elementos	80
Figura 34 – Exemplo dos pontos de ressonância e antirressonância na curva DM	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Tensão aplicada ensaio de aplicação de alta tensão em motores de indução .	21
Tabela 2	– Parâmetros de baixa frequência do circuito equivalente	39
Tabela 3	– Parâmetros do circuito equivalente de alta frequência	47
Tabela 4	– Resultados nas ferramentas de avaliação do ensaio de surto de tensão para as formas de onda obtidas na simulação	56
Tabela 5	– Resultados nas ferramentas de avaliação do ensaio de surto de tensão no experimento	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RI	Resistência de Isolação
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
EASA	<i>Electrical Apparatus Service Association</i>
EAR	<i>Error Area Ratio</i>
ZCP	<i>Zero Cross Point</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
MD	Modo Diferencial
MC	Modo Comum
p.u.	Por Unidade

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcento
α	Parcela inicial da indutância de dispersão
η	Parcela inicial da indutância de dispersão
λ	Multiplicador do valor da resistência estatórica
μ	Multiplicador do valor da resistência estatórica
C_{1eff}	Capacitância entre enrolamentos e carcaça
C_{1w}	Capacitância entre espiras de um mesmo enrolamento
C_g	Capacitância entre enrolamentos e carcaça
C_s	Capacitância entre espiras
C_{sf}	Capacitância entre enrolamentos e carcaça
C_{sw}	Capacitância entre espiras de um mesmo enrolamento
f_{osc}	Frequência de oscilação da forma de onda do surto
G_g	Condutância entre enrolamentos e carcaça
G_s	Condutância entre espiras
L_{l1}	Indutância de dispersão do enrolamento
L_{l2}	Indutância do rotor referenciada ao estator
L_{lr}	Indutância do rotor referenciada ao estator
L_{ls}	Indutância de dispersão do enrolamento
M_{1n}	Indutância mútua entre espiras de um mesmo enrolamento
L_m	Indutância magnetizante
L_M	Indutância magnetizante
R_1	Resistência de fase do enrolamento a 20°C
R_2	Resistência do rotor referenciada ao estator
R_{1w}	Resistência de amortecimento entre espiras de um mesmo enrolamento
R_{core}	Resistência representativa das perdas no ferro
R_C	Resistência representativa das perdas no ferro
R_r	Resistência do rotor referenciada ao estator
R_s	Resistência de fase do enrolamento a 20°C
R_{sw}	Resistência de amortecimento entre espiras de um mesmo enrolamento
S	Escorregamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
2	ENSAIOS ELÉTRICOS	19
2.1	DETECÇÃO DE DEFEITOS DE ISOLAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS	19
2.1.1	Ensaio de Resistência de Isolação	20
2.1.2	Ensaio de Alta Tensão	20
2.1.3	Ensaio de Surto de Tensão e Descargas Parciais	22
2.2	O QUE É O ENSAIO DE SURTO DE TENSÃO?	23
2.2.1	Escopo do ensaio	23
2.2.2	Guia de aplicação do ensaio	24
2.2.3	Formas de avaliação do ensaio	28
2.2.4	Parâmetros de avaliação e tolerâncias	30
2.3	CONCLUSÃO	31
3	MODELAMENTO DO ENSAIO DE SURTO EM ALTA FREQUÊNCIA	32
3.1	MODELOS DE ALTA FREQUÊNCIA USUAIS	32
3.2	PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE EM ALTA FREQUÊN- CIA NO ENSAIO DE SURTO DE TENSÃO	38
3.3	AJUSTES DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O ENSAIO DE SURTO DE TENSÃO	44
3.4	AJUSTES DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA SIMULAÇÃO DE DE- FEITOS	47
3.5	CONCLUSÃO	49
4	SIMULAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	51
4.1	CENÁRIO DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE DAS FORMAS DE ONDA . . .	51
4.2	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	52
4.3	CENÁRIO DE TESTES E EXPERIMENTOS	56
4.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	59
4.5	COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	63
4.6	DEFINIÇÃO DA TOLERÂNCIA UTILIZANDO OS RESULTADOS EXPE- RIMENTAIS	65
4.7	CONCLUSÃO	68
5	CONCLUSÃO	70
5.1	DISCUSSÕES SOBRE TOLERÂNCIAS DE ENSAIO	71

5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – PROCEDIMENTO GENERALIZADO PARA DEFINIÇÃO DA TOLERÂNCIA	79

1 INTRODUÇÃO

Máquinas elétricas são componentes fundamentais para o bom funcionamento da indústria, sendo a grande força motriz que permite a operação de equipamentos na transformação de matéria prima. Entre os diferentes tipos de máquinas elétricas se destacam os motores de indução, por sua construção robusta, baixo custo e projeto simples, estando presentes desde aplicações simples à complexas. Aproximadamente 85% dos motores utilizados em aplicações industriais são motores de indução (1).

Sendo de tal importância, é natural que fornecedores e consumidores de motores de indução tenham, além dos cuidados relativos à aplicação, uma preocupação especial com a durabilidade e robustez dessas máquinas. Com isso, detecção de falhas no processo produtivo é um tópico frequente em publicações, principalmente com os grandes avanços nas áreas de instrumentação e processamento de sinais (2).

Isso pode ser verificado em publicações frequentes ao longo dos anos relativas à detecção prematura de falhas em máquinas elétricas, como monitoramento das condições de trabalho (3, 4, 5, 6, 7), uso de aprendizado de máquina para estimativa do tempo de vida (8, 9, 10) e na existência de extenso material em normas e padrões relacionados a ensaios elétricos de máquinas (ANSI/NEMA MG1, Guias IEEE, etc).

Durante sua utilização, a isolação de motores elétricos de indução é submetida a vários tipos de estresses, como estresse mecânico, elétrico, térmico e ambiental, podendo causar uma redução da sua vida útil e paradas inesperadas durante seu funcionamento, causando prejuízos e atrasos nos processos e aplicações onde eles são inseridos (11).

Entre os possíveis defeitos causados por esses estresses, destacam-se os defeitos relacionados ao estator, que compõem entre 28 e 36% das falhas em motores de indução, ficando em 2º lugar entre os tipos de falhas mais comuns, apenas atrás de falhas nos rolamentos. A falha mais comum presente no estator é a falha de isolação entre espiras, podendo ser causada por uma contaminação do bobinado ou por um defeito no sistema isolante, como fios arranhados ou bolhas no esmalte isolante dos condutores (1).

Esse tipo de falha é bastante perigosa, já que o curto-circuito entre espiras gera um sobreaquecimento do motor e pode desencadear falhas de isolação entre fases ou entre fase-carcaça, gerando a parada completa da máquina. Entre os diferentes tipos de estresse ao sistema isolante que podem desencadear uma falha de isolação entre espiras, um dos mais comuns são oscilações abruptas de tensão, como surtos (1).

Surtos de tensão são impulsos transitórios de sobretensão com baixo tempo de subida (menor que $5 \mu s$) e baixa duração, que podem ter picos elevados, comumente de 1,5 a 5 vezes a tensão nominal da máquina submetida ao surto (12, 13, 14). Esses impulsos com baixo tempo de subida tendem a causar uma distribuição de tensão não uniforme ao longo do enrolamento, aparecendo principalmente nas primeiras espiras da bobina de fase, estressando a isolação entre espiras (15).

Um dos métodos mais comuns para assegurar a qualidade da isolamento entre espiras é o ensaio de surto de tensão, conhecido na língua inglesa como *Surge Test*. O princípio do ensaio consiste na aplicação de um impulso de tensão de baixo tempo de subida nos enrolamentos do estator bobinado seguida da análise da forma de onda da tensão de resposta, comparando a forma de onda adquirida da bobina em teste com uma forma de onda obtida de uma bobina conhecidamente saudável (16).

Se ambas as formas de onda que estão sendo comparadas se sobrepõem, significa que a bobina em teste é provavelmente saudável. Caso haja um curto-circuito entre espiras na bobina em teste, a forma de onda medida apresentará uma distorção, tendo uma mudança na sua frequência e amplitude, indicando um possível defeito de isolamento (16).

O conceito do ensaio de surto de tensão nasce no final dos anos 20 (17), com o primeiro equipamento desenvolvido para testes no ambiente produtivo sendo apresentado nos anos 40 (18). Desde então, muito trabalhos foram publicados abordando diferentes aspectos do ensaio, como a sua correta aplicação (19, 20), os riscos do uso de surtos de tensão para análise da qualidade (21, 22), e, mais recentemente, as possibilidades de detecção de descargas parciais durante o ensaio e como utilizá-las para determinar a qualidade da isolamento da bobina em teste (23, 24, 25, 26). Apesar disso, ainda há alguns aspectos que precisam ser investigados, como por exemplo, a determinação da tolerância de ensaio.

Uma das desvantagens do ensaio de surto de tensão é a subjetividade na interpretação dos resultados do ensaio, em definir se a variação observada nas formas de onda é relativa a um defeito ou não. A resposta da bobina ao impulso é bastante afetada pela indutância do enrolamento em teste e, portanto, qualquer parâmetro que afete a indutância também afetará o comportamento da forma de onda (16). Dessa forma, variações no processo de bobinagem podem causar variações físicas no estator que farão com que a forma de onda da bobina fique distorcida, mesmo sem a presença de um defeito de isolamento.

No entanto, é esperado que essas variações do processo produtivo causem pequenas variações na forma de onda, diferente das variações quando houver um defeito. Porém, qual é a variação esperada para um defeito entre espiras? É possível estabelecer um parâmetro padrão para todos os estatores testados? Quais tipos de distorção de onda são esperados quando há um defeito? Qual a variação comum esperada no processo produtivo?

Essa característica subjetiva do ensaio acaba levantando essas questões, sendo um obstáculo ao uso desse tipo de teste para o operador do ensaio, que tem dificuldades em estabelecer um parâmetro para definir qual variação corresponde a um defeito e qual variação corresponde às variações esperadas do processo produtivo.

1.1 MOTIVAÇÃO

Como dito anteriormente, uma das maiores dificuldades para a utilização do ensaio de surto de tensão está na sua subjetividade, já que é um ensaio comparativo que busca encontrar

diferenças entre a forma de onda medida e uma forma de onda padrão, que normalmente é de uma peça conhecidamente saudável. A resposta do ensaio é dada em um valor percentual da comparação das ondas ou, em equipamentos mais antigos, essa comparação é visual.

A avaliação correta dos valores de comparação e diagnóstico do estator em teste dependem muito da experiência do operador do ensaio, que necessita conhecer as variações comuns do processo para aquele estator em teste e qual variação é esperada em caso de defeito, sendo essa umas das dificuldades do ensaio destacada pela norma NEMA (27).

Normalmente, o operador do ensaio não tem conhecimento da variação esperada para um defeito, principalmente em lotes com número reduzido de unidades. Atualmente, a definição de tolerâncias de ensaio é feita com base no histórico do produto testado, no qual se compara o resultado percentual obtido com a distribuição de resultados de testes anteriores. Porém, a questão de qual variação pode indicar um defeito ainda se mantém em aberto e essa característica do ensaio pode conduzir o operador à uma avaliação errada, levando-o a aprovar um estator com defeito ou reprovar um estator saudável.

Na literatura, a maioria dos artigos e documentos técnicos tratam sobre a aplicação do ensaio, mas muito pouco sobre a avaliação do ensaio. Os fabricantes de equipamentos de testes comentam superficialmente sobre as faixas percentuais que são costumeiramente utilizadas.

A fabricante Baker (28) sugere um parâmetro percentual de comparação entre 5 e 15% para testes de chão de fábrica durante o processo de fabricação. A fabricante Electrom comenta que como prática geral um valor percentual de até 10% é um bom resultado, mas também comenta que existe uma "área cinzenta" nessa definição, pois os resultados podem depender bastante das características físicas do estator em teste (29). A EASA (*Electrical Apparatus Service Association*) cita um limite de 15%, apesar de também comentar que estas definições tendem a variar para diferentes projetos de estatores e para diferentes equipamentos de teste (30).

Ainda assim, como os resultados dependem muito da forma construtiva do estator, falta um direcionamento mais preciso para o operador do ensaio, de forma a trazer maior confiabilidade na interpretação dos resultados e maior precisão na tomada de decisão pelas equipes de qualidade ao se deparar com os ensaios executados no dia-a-dia.

1.2 OBJETIVOS

Dada a subjetividade do ensaio e os problemas previamente explicados, esse trabalho tem o objetivo de estabelecer uma forma de determinar a variação esperada nas ferramentas de análise do ensaio de surto de tensão para um defeito entre espiras em estatores bobinados.

Para isso, devem ser investigados como os defeitos se caracterizam e uma maneira de modelar o estator para simulá-los, trazendo os dados de defeito necessários a partir de cálculos feitos sobre as características físicas do bobinado, dependendo menos da experiência do operador para o diagnóstico do estator em teste.

Nesse âmbito, se estabelecem os seguintes objetivos específicos:

- entender o ensaio de surto de tensão, suas características e, principalmente, a forma de avaliação e como é feito o diagnóstico a partir das formas de onda medidas;
- desenvolver um modelo de simulação do estator bobinado para o ensaio de surto de tensão, baseado nas características de bobinagem do estator;
- adicionar ao modelo de simulação uma maneira de simular defeitos entre espiras;
- entender como o comportamento das ondas é alterado quando há defeitos entre espiras no estator bobinado;
- validar o modelo comparando-o a resultados experimentais;
- propor uma metodologia para determinar a tolerância do ensaio para o estator simulado.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Nessa dissertação, o assunto será tratado da seguinte maneira:

- o **capítulo 2** aborda os conceitos de ensaios elétricos para os sistemas de isolamento dos motores de indução e apresenta os principais conceitos sobre o ensaio de surto de tensão, desde os objetivos e capacidades do ensaio, passando em como executá-lo, nas principais ferramentas de análise, até uma visão mais aprofundada do problema de delimitação de tolerâncias para o ensaio;
- o **capítulo 3** inicia com uma visão geral de modelos de circuito equivalente na literatura para representar o estator bobinado em alta frequência, característica do ensaio e, ao final, escolhe um dos modelos e obtém o circuito equivalente para o estator que será usado para a simulação;
- o **capítulo 4** realiza a simulação do estator e apresenta os resultados experimentais do ensaio de surto de tensão nesse mesmo estator, comparando-os. Por último, apresenta o procedimento para escolha da tolerância do ensaio e verifica a efetividade do método na determinação dos parâmetros de controle do ensaio;
- por fim, o **capítulo 5** conclui o trabalho resumindo o que foi realizado, as principais contribuições e traz uma discussão sobre tolerâncias para o ensaio de surto de tensão e sugestões de próximos trabalhos necessários para aprimoramento do procedimento proposto.

2 ENSAIOS ELÉTRICOS

Conforme já comentado no capítulo 1, devido à grande importância dos motores de indução na indústria, existe a necessidade de garantir a sua robustez e confiabilidade. Para isso, os fabricantes de motores elétricos realizam diferentes ensaios para garantir a qualidade dos componentes que compõem o motor e, dessa forma, assegurar uma longa vida útil a máquina testada.

Entre as falhas mais comuns observadas na indústria, destacam-se as falhas de isolamento no estator bobinado, compondo entre 28 e 36% das falhas observadas em motores de indução. Dessa forma, é de crucial importância a utilização de ensaios elétricos confiáveis para os sistemas isolantes (1).

Nesse capítulo, serão abordados os principais ensaios elétricos relacionados ao sistema de isolamento de motores de indução, realizados no chão de fábrica ou em laboratórios de teste, com o objetivo de introduzir boas práticas na área de ensaios e as capacidades de cada um, explicando as possibilidades e potenciais, até a introdução do ensaio detalhado nessa dissertação, que é o ensaio de surto de tensão.

2.1 DETECÇÃO DE DEFEITOS DE ISOLAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

Um dos principais componentes aplicados à máquina elétrica para garantir seu correto funcionamento são os sistemas isolantes, que tem a função de suportar as tensões da máquina de forma a garantir que as correntes estatóricas fluam no caminho desejado (31).

Quando se trata de motores de indução, os principais sistemas isolantes se encontram no estator bobinado e devem suportar as tensões entre fases e entre fase-terra. As falhas elétricas no isolante ocorrem quando a isolamento falha em suportar essas tensões, gerando uma fuga de corrente dentro do estator bobinado. Essas falhas podem ser categorizadas de duas maneiras: Interna e Externa (1).

Falhas elétricas internas se referem à falhas associadas a defeitos no processo produtivo do motor, como falhas nos sistemas dielétricos, os quais podem estar amassados, riscados, rompidos, etc. Falhas elétricas por fontes externas estão associadas à falhas por flutuações na tensão de alimentação da máquina, como transitórios, desequilíbrio entre as fases e outros tipos de flutuação na qualidade da energia (1).

Para garantir que os materiais isolantes aplicados ao motor elétrico apresentem boa qualidade dielétrica, que sua correta aplicação foi realizada e que eles são capazes de suportar flutuações de rede e transitórios de tensões mais elevadas, é necessária a realização de ensaios elétricos focados em estressar os sistemas isolantes e encontrar possíveis fraquezas.

Os ensaios mais comuns para verificar a qualidade dos sistemas isolantes da máquina elétrica são de Resistência de Isolação (RI), Alta Tensão, comumente conhecido como *Hipot*, que pode ser aplicado em CA ou CC, ensaio de surto de tensão e Descargas Parciais (32). Esses ensaios e suas capacidades são descritos em maior detalhes nas subseções subsequentes.

2.1.1 Ensaio de Resistência de Isolação

A Resistência de Isolação (RI) é a capacidade do material isolante de um bobinado de resistir a passagem de uma corrente elétrica continuamente (33). A RI é em função do tipo e da condição dos materiais isolantes utilizados, bem como a forma de aplicação deles e da quantidade de interfaces que os diferentes materiais que compõem o sistema isolante formam.

O ensaio de RI é realizado mediante a aplicação de tensão CC no motor durante 1 minuto, garantindo uma tensão constante e bem regulada durante toda a aplicação e medindo a corrente de fuga através de um microamperímetro (a resistência é da ordem de $M\Omega$, portanto a corrente será de apenas alguns μA), obtendo-se a resistência através da lei de ohm.

Para avaliar o ensaio, deve-se verificar o valor da resistência medido para o porte da máquina em teste. Em máquinas de pequeno e médio porte, por exemplo, a norma americana NEMA - MG1 utiliza como parâmetro de avaliação que a RI não pode ser menor que $1 M\Omega$ após 1 minuto de aplicação do ensaio (27). Já a norma 43 da IEEE, sobre RI, recomenda uma RI mínima de $5 M\Omega$ para máquinas com enrolamento randômico e tensão nominal até 1 kV, e de $100 M\Omega$ para máquinas de enrolamento pré-formado (33).

O ensaio de RI tem a capacidade de detectar a presença de contaminantes no sistema de isolamento, absorção de umidade pelos enrolamentos e rachaduras no sistema isolante. Em resumo, ele pode fornecer uma referência quantitativa da qualidade da isolamento entre as fases e o terra (32). É um ensaio bastante utilizado para determinar a degradação da qualidade da isolamento ao longo do tempo, formando um histórico da máquina e permitindo uma ação preditiva na troca ou na manutenção da máquina antes de uma falha grave do sistema isolante.

Apesar disso, a norma IEEE std 43 estabelece que a RI não está diretamente relacionada à rigidez dielétrica, pois, a menos que o defeito seja concentrado, não é possível determinar um valor de resistência de isolamento na qual o sistema isolante de um enrolamento irá falhar (33).

2.1.2 Ensaio de Alta Tensão

O ensaio de aplicação de alta tensão, comumente conhecido como *Hipot*, forma contraída de *High Potential*, é um ensaio que permite detectar a presença de defeitos dentro da camada de isolamento entre cada circuito elétrico da máquina e a carcaça (32).

O ensaio de aplicação de alta tensão consiste na aplicação de uma tensão mais alta que a tensão nominal durante um período de tempo específico, de forma a determinar se o sistema isolante consegue resistir à essa sobretensão momentânea em condições normais de operação (27).

O ensaio pode ser aplicado em CC ou CA, havendo algumas vantagens e desvantagens em cada abordagem. Ensaio em CC são normalmente aplicados em máquinas maiores, como recomendado na norma IEEE Std 95 (34), que especifica o teste para máquinas com tensão nominal acima de 2.300 V. Já a norma NEMA MG-1 estabelece que para máquinas pequenas e médias, de enrolamento randômico, deve ser aplicado o ensaio CA em 50 ou 60 Hz.

Em ensaios CC, caso ocorra uma ruptura do isolante, o dano ao sistema isolante é costumeiramente menor, já que a capacidade da fonte de tensão em sustentar maiores correntes é menor. Além disso os níveis de correntes observados são mais estáveis e podem ser utilizados, assim como no teste de RI, como um parâmetro quantitativo da qualidade do sistema isolante, podendo formar parte do histórico da máquina, permitindo ações de manutenção preditiva (34).

Em contrapartida, o ensaio CA permite a identificação de um maior número de defeitos, pois a distribuição do estresse ao sistema isolante em teste durante o ensaio é similar ao estresse experimentado pela máquina durante sua operação normal, em eventos de sobretensão, permitindo assim uma detecção mais aproximada da realidade operacional da máquina sob teste. Além disso, alguns defeitos de rachaduras e contaminação do sistema isolante são detectados somente no ensaio CA, sendo o recomendado, principalmente para enrolamentos randômicos (27, 34).

O ensaio de aplicação de alta tensão é realizado da mesma forma que o ensaio de RI, conectando-se a fonte de alta tensão entre os enrolamentos curto-circuitados e a carcaça. Da mesma forma, quando realizado em apenas uma das fases da máquina, deve-se curto-circuitar as demais fases que não estão sob teste juntamente à carcaça. A tensão aplicada deve ser senoidal na frequência de 50 ou 60 Hz, com valor efetivo de tensão dado conforme tipo da máquina, tipo de circuito sob teste e tensão nominal da máquina (27). A Tabela 1 apresenta os valores de tensão aplicados em máquinas de indução e motores síncronos não excitados.

Tabela 1 – Tensão aplicada ensaio de aplicação de alta tensão em motores de indução

Categoria	Tensão efetiva do ensaio
Motores maiores que 0,5 hp	1000 V + 2 vezes a tensão nominal do motor, mas nunca menor que 1500 V
Motores menores que 0,5 hp com tensão nominal igual ou menor que 250 V	1500 V
Motores menores que 0,5 hp com tensão nominal maior que 250 V	1000 V + 2 vezes a tensão nominal do motor, mas nunca menor que 1500 V

Fonte: Adaptado de 27

Diferente do ensaio de RI, o ensaio de aplicação de alta tensão é um ensaio com característica de passa/não-passa, na qual se estressa o isolante de forma a se detectar uma ruptura no mesmo. Caso houver uma indicação de ruptura, detectando-se um aumento considerável da corrente de fuga medida durante a aplicação, esse fato deve ser considerado uma evidência de falha dielétrica e que o sistema isolante está comprometido.

O ensaio de aplicação de alta tensão é um ensaio importante para a detecção de rachaduras e fissuras no sistema isolante, contaminação das superfícies, absorção de umidade e fraquezas do sistema isolante entre as fases e a carcaça.

2.1.3 Ensaio de Surto de Tensão e Descargas Parciais

O ensaio de surto de tensão é um ensaio comumente aplicado no processo de fabricação de estatores e rotores bobinados, antes da montagem final da máquina elétrica, e também em campo, para diagnóstico de falhas. Diferentemente dos demais testes, que estressam a isolamento entre as fases da máquina e a carcaça, o ensaio de surto de tensão tem a vantagem de estressar também a isolamento entre espiras consecutivas e entre os diferentes enrolamentos do motor, sendo essa uma das principais vantagens em relação aos demais ensaios de alta tensão, tornando-o um teste complementar aos outros.

No ensaio de surto de tensão é aplicado um impulso de alta tensão com baixíssimo tempo de subida, entre 100 e 200 ns, nos enrolamentos do estator bobinado, simulando os surtos de tensão encontrados em máquinas elétricas em campo. Essa frente de onda abrupta faz com que haja uma distribuição não uniforme da tensão sobre as espiras de uma mesma bobina, sendo, dessa forma, capaz de detectar possíveis fraquezas na isolamento entre espiras e entre fases (14).

Como o ensaio de surto de tensão é o tema principal deste trabalho, ele será tratado em maiores detalhes nas seções subsequentes, começando com um detalhamento geral do ensaio na Seção 2.2.

Outro ensaio complementar ao ensaio de surto de tensão é o ensaio de Descargas Parciais, normalmente realizado através de impulsos repetitivos do ensaio de surto ou na aplicação de alta tensão senoidal, em 60 Hz, com a tensão de ambos subindo em passos pré-definidos.

Descargas Parciais são um dos fatores que podem levar à degradação do sistema isolante. Elas normalmente ocorrem em espaços vazios dentro do material isolante, em bolsões de ar entre fios adjacentes ou bolhas nos fios do bobinado, mais comum em motores de baixa tensão com fio esmaltado utilizando algum verniz de material isolante orgânico, como polímeros.

Quando o campo elétrico nesses espaços de ar se torna maior que 3 kV/mm, a isolamento desse ar rompe, resultando em faísca e liberação de calor. Essas faíscas ocorrendo repetidamente vão degradando o isolante, criando um furo dentro da isolamento, que pode levar a uma ruptura completa no dielétrico (34).

Normalmente, quando isso ocorre, essas descargas aparecem como impulsos de corrente de alta frequência, entre 50 kHz e 3 MHz, que podem ser detectados por capacitores ou antenas previamente preparados para esse fim (34). No ensaio de Descargas Parciais, impulsos de alta tensão são aplicados ao bobinado, sendo aumentados em passos de tensão pré-definidos, com o objetivo de detectar em qual tensão ocorre o aparecimento de descargas parciais consecutivas, sendo esse valor chamado de RPDIV (*Repetitive Partial Discharge Inception Voltage* ou Tensão de Início de Descarga Parcial Repetitiva, em tradução livre).

O valor da RPDIV pode ser também utilizado para determinar a qualidade do sistema de isolamento. Valores muito baixos da RPDIV podem indicar uma falha incipiente no sistema isolante, que pode resultar em um tempo de vida menor da máquina elétrica.

2.2 O QUE É O ENSAIO DE SURTO DE TENSÃO?

O ensaio de surto de tensão é um método de ensaio *offline*, ou seja, executado com a máquina desligada, capaz de avaliar a qualidade da isolamento entre espiras, entre fases e entre fase e terra de um enrolamento.

Ao aplicar um impulso de alta tensão com baixíssimo tempo de subida, na ordem de nanosegundos, nos terminais da bobina, o ensaio produz uma distribuição não-linear da tensão entre as espiras do enrolamento, estressando momentaneamente a isolamento entre espiras da bobina. Essa característica o difere dos demais ensaios de alta tensão, fazendo-o ser o único método capaz de avaliar a integridade da isolamento entre espiras (35).

2.2.1 Escopo do ensaio

O ensaio de surto de tensão é um ensaio recomendado para testes de isolamento em estatores e rotores bobinados individualmente. Ele é normalmente aplicado durante o processo de fabricação, onde é possível testar separadamente somente o estator bobinado ou alguma das bobinas do estator antes mesmo da inserção no núcleo. Ele também é utilizado em campo, para manutenção preventiva ou para diagnóstico de máquinas que apresentaram uma falha de isolamento, embora o uso desse ensaio em campo é mais limitado e, por isso, menos comum (35).

As limitações do uso do ensaio de surto de tensão em campo estão na complexidade de realização do ensaio, já que para realização do mesmo no estator bobinado é necessário retirar o rotor, pois o mesmo tem grande influência nos resultados de ensaio e pode acabar mascarando problemas (36). Outra dificuldade nesses ensaios de campo está na possibilidade dos impulsos de alta tensão estressarem demais a isolamento entre espiras, diminuindo a vida útil de uma máquina que, apesar da qualidade da isolamento menor, suportaria mais tempo sem uma falha severa do sistema isolante (22).

Como o sistema isolante dos enrolamentos do estator varia bastante com a forma construtiva, os materiais utilizados e a forma de ligação do bobinado, é necessário um cuidado extra na escolha das tensões de aplicação do ensaio em campo. Assim, recomenda-se a busca de uma consultoria com o fabricante da máquina (14).

O ensaio pode ser aplicado em bobinas individuais, antes da inserção nas ranhuras do estator, após a inserção, mas antes das ligações dos grupos de bobinas, depois das ligações realizadas e, por fim, no estator completo.

Para máquinas de baixa tensão, de enrolamento randômico, a norma NEMA (27) recomenda a aplicação do ensaio para avaliação da qualidade da isolamento nos componentes do motor (estator e rotor bobinado) durante o processo de fabricação, principalmente se um grande número de motores de um mesmo projeto necessitam ser testados.

A norma comenta que o *Surge Test* é uma maneira econômica e rápida de detectar os seguintes defeitos:

- enrolamentos com falha de isolamento para o terra;

- curto-circuito entre espiras;
- curto-circuito entre fases;
- conexões e/ou soldas incorretas;
- número de espiras incorreto;
- condutores ou isoladores deslocados.

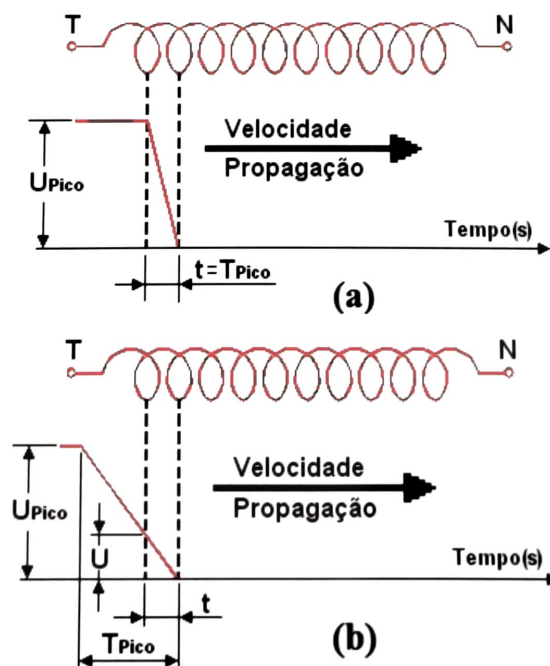
Para máquinas de média e alta tensão, de enrolamento pré-formado, a norma IEEE std 522 (37) traz um guia de como testar a rigidez dielétrica entre espiras utilizando o ensaio de surto de tensão, tendo em seu escopo o ensaio em máquinas de potência nominal entre 0,2 e 100 MW, testando a capacidade dessas máquinas de suportar "tensões de surto anormais".

2.2.2 Guia de aplicação do ensaio

Como dito anteriormente, a aplicação de impulsos de alta tensão com frente de onda rápida, ou seja, com baixo tempo de subida, é o que caracteriza esse ensaio, já que é por causa desse impulso que ocorre uma distribuição não uniforme da tensão sobre as espiras da bobina, aplicando boa parte da tensão entre as primeiras espiras, com aproximadamente 80% da tensão do impulso somente na primeira bobina do circuito (38).

O gráfico da Figura 1 faz uma comparação entre dois impulsos com diferentes derivadas de tensão nos terminais de entrada da bobina.

Figura 1 – Diferença na distribuição de tensão entre impulsos de frente de onda abrupta (a) e frente de onda lenta (b)



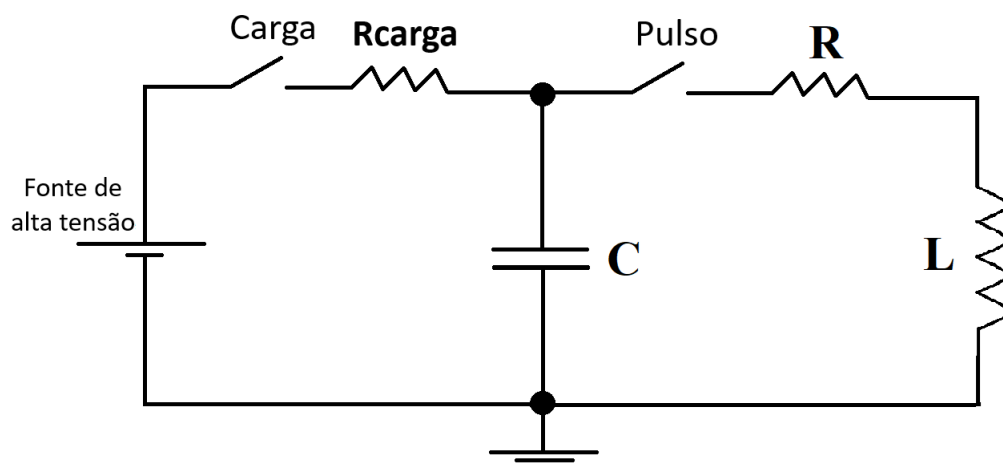
Fonte: (31)

Portanto, umas das principais características para aplicação do ensaio de surto de tensão é o tempo de subida do impulso a ser aplicado. De acordo com as normas que guiam a aplicação do ensaio, recomenda-se um tempo de subida entre 0,1 e 0,2 μs . Valores acima disso tendem a estressar a isolamento para o terra (27, 37), se tornando semelhante ao ensaio de aplicação de alta tensão. Valores acima de 5 μs proporcionam uma distribuição de tensão parecida com a verificada com a máquina em regime permanente (39).

A Figura 2 ilustra o circuito comum de aplicação do impulso do ensaio de surto de tensão. Para realizar o ensaio, inicialmente é feita a carga de um capacitor e, posteriormente, o fechamento dele no circuito através de uma chave eletrônica, como um IGBT ou MOSFET. A sequência de aplicação pode ser descrita conforme segue:

1. a chave "Carga" é fechada, realizando a carga do capacitor "C" com a tensão de pico do ensaio através do resistor de carga "Rcarga";
2. após a carga, a chave "Pulso" conecta o capacitor aos terminais da bobina, representados pelos elementos "R" e "L", sendo estes a resistência e a indutância da bobina em teste, respectivamente;
3. os elementos formam então um circuito RLC, fazendo a tensão sobre a bobina se comportar como uma resposta natural de segunda ordem subamortecida, chamada de forma de onda do ensaio;
4. a forma de onda é então medida com um osciloscópio através de algum divisor de tensão e é então comparada com uma forma de onda de um estator conhecidamente saudável de mesmo modelo, podendo ser uma onda padrão salva no equipamento ou uma comparação direta com outras fases do mesmo estator.

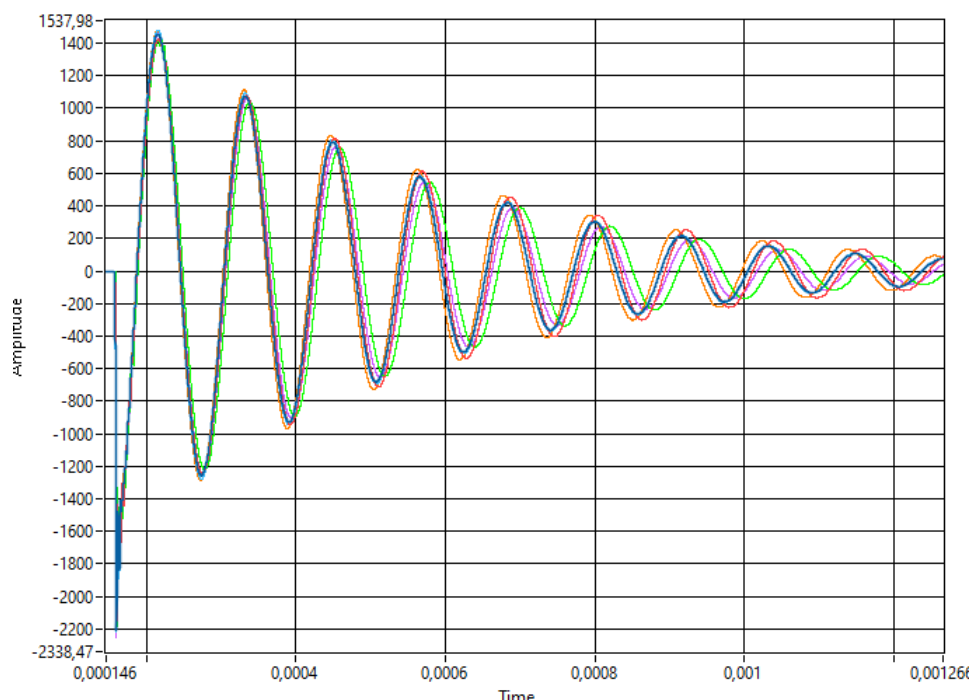
Figura 2 – Diagrama do circuito de aplicação do ensaio de surto de tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 3 mostra formas de onda medidas em um ensaio de surto. Se o estator tem duas ou mais bobinas idênticas, recomenda-se que a comparação entre as formas de onda do ensaio de surto de tensão seja feita entre elas, já que é improvável que duas bobinas apresentem o mesmo defeito de fabricação. Para estatores monofásicos com apenas uma bobina principal a comparação pode ser entre no mínimo duas peças diferentes e, caso haja diferença entre elas, deve-se utilizar uma terceira peça para determinar qual delas está com defeito. É também possível comparar a onda com alguma onda previamente salva, obtida de um estator de mesmo projeto com as características de isolamento e bobinagem satisfatórias (27).

Figura 3 – Formas de onda obtida em um ensaio de surto de tensão - escala vertical: Tensão (V); escala horizontal: Tempo (s)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

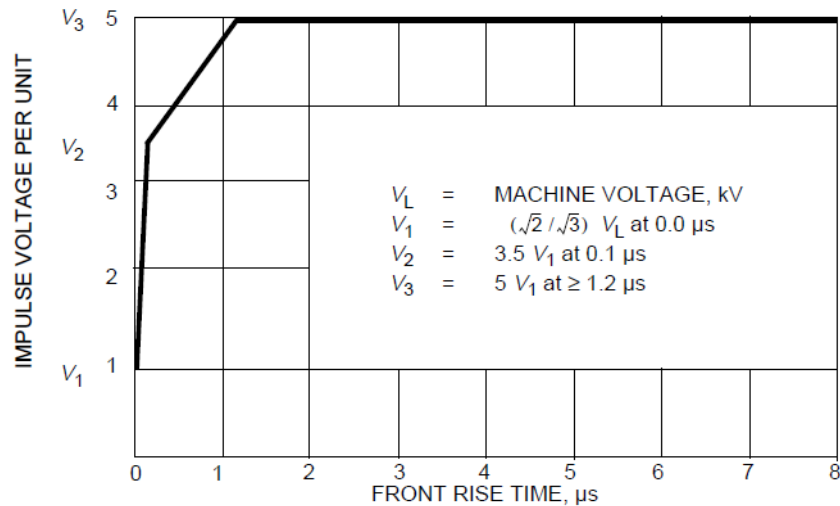
A tensão de pico do impulso aplicado no ensaio também é um parâmetro bastante importante a ser definido. Uma tensão muito baixa pode não ser suficiente para estressar a isolamento entre espiras e pode acabar deixando defeitos passarem indetectados, mas uma tensão muito alta pode estressar o isolante a ponto de causar um defeito em um enrolamento de isolamento saudável.

Para motores de baixa e média potência, a norma NEMA MG1 (27) recomenda que devem ser realizados estudos mais extensivos da distribuição de tensão nas espiras e nos possíveis pontos de ressonância do estator bobinado antes de levar a cabo ensaios de surto de tensão no ambiente produtivo, de forma a encontrar a tensão adequada de teste para cada projeto distinto.

A norma IEEE std 522-2004, que apresenta indicações de como realizar o ensaio em máquinas de alta tensão com enrolamento pré-formado, apresenta definições mais elaboradas da tensão de teste (37). Nela, é indicada a utilização do envelope de tensão representado na Figura

4, tendo como parâmetro o tempo de subida do impulso.

Figura 4 – Envelope de tensão recomendado na norma IEEE std 522 para o ensaio de surto de tensão



Fonte: (37)

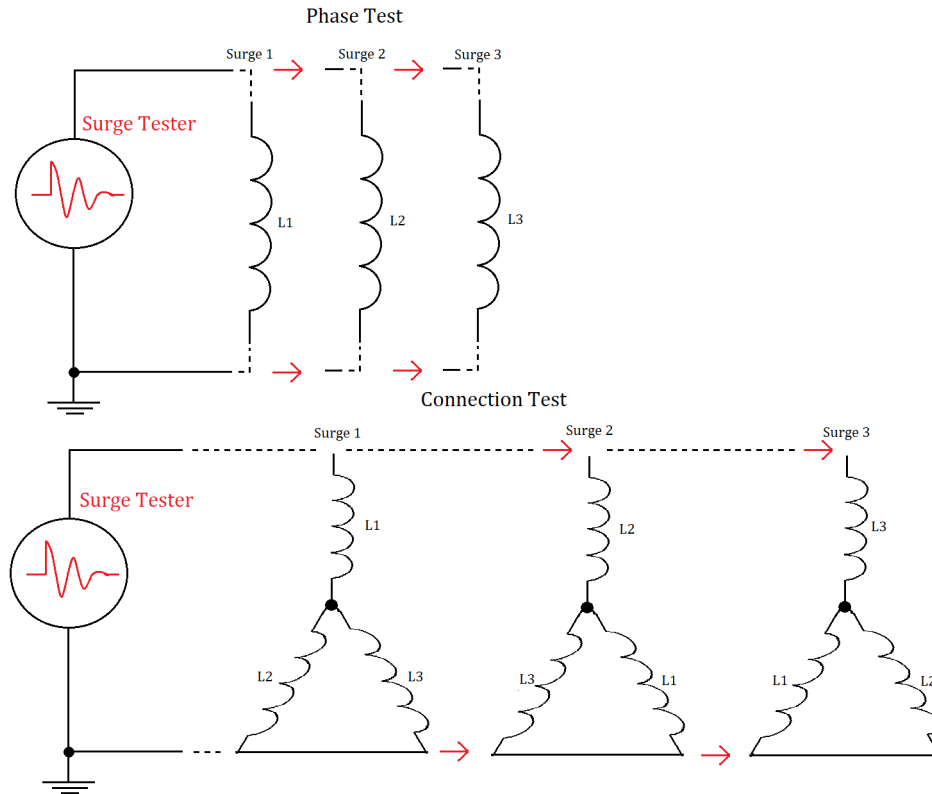
Para testes realizados em enrolamentos antes do processo de impregnação a tensão de teste deve ser entre 60 e 80% das tensões sugeridas no envelope. Para a execução de testes de manutenção a sugestão é que seja aplicada 75% da tensão do envelope (37, 40).

A aplicação de impulsos em estatores bobinados completos é geralmente feita entre as fases da máquina, fechando o ponto comum em uma conexão estrela, conhecido como ensaio de surto de ligação. É possível também aplicar entre cada bobina individualmente, caso haja esse acesso, sendo esse conhecido como ensaio de surto de fase. A Figura 5 mostra um exemplo das conexões do aplicador do ensaio com as bobinas de um estator trifásico nas duas configurações. As fases que não estiverem sob teste e a carcaça do motor ou estator devem estar aterradas, para que a isolamento entre as fases e o terra também seja colocada sob estresse e possa ser avaliada durante o ensaio.

O ensaio de surto de tensão é um ensaio comparativo, no qual se avalia o ensaio comparando-se a onda obtida da bobina em teste com uma onda de uma bobina que está com as condições de isolamento e fabricação conhecidamente saudáveis. Em métodos de ensaios mais antigos, ambas as bobinas, a sob teste e a padrão de comparação, eram conectadas ao equipamento de ensaio, alternando a aplicação dos impulsos entre elas em uma frequência que possibilitasse enxergar ambas as ondas simultaneamente no osciloscópio, facilitando a comparação visual realizada pelo operador do ensaio (41). Caso o ensaio estivesse aprovado, as ondas se sobreporiam na tela e o operador veria apenas uma onda.

A partir dos anos 2000, com avanços de sistemas de ensaio microcontrolados, a maioria dos equipamentos de aplicação permite armazenar uma onda padrão para comparação com a onda obtida no ensaio, ou permite armazenar as ondas obtidas em cada aplicação nas bobinas do estator, para posterior comparação entre todas.

Figura 5 – Conexões de fase (superior) e de ligação (inferior) para o ensaio de surto de tensão



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

2.2.3 Formas de avaliação do ensaio

Os métodos mais comuns de análise das ondas do ensaio de surto de tensão são a análise de passagem por zero da onda, chamada de ZCP (*Zero Crossing Point*), o erro da razão de área entre as ondas de diferentes enrolamentos, conhecido como L-L EAR (*Line-to-Line Error Area Ratio*), ou somente EAR, e o erro da razão de área entre pulsos, ou P-P EAR (*Pulse-to-Pulse Error Area Ratio*).

O método ZCP avalia a frequência de oscilação da onda de surto, f_{osc} dada pela equação (1).

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (1)$$

Onde:

- L é a indutância do enrolamento em teste;
- C é a capacitância de surto, que é carregada com a tensão de pico do impulso;
- R é a resistência do enrolamento;

Variações na indutância causadas por um curto-circuito entre espiras ou por um erro de fabricação fazem com que ocorra uma variação na frequência de oscilação f_{osc} . Dessa forma, variações no número e posição dos pontos de passagem por zero da forma de onda podem indicar uma falha (42).

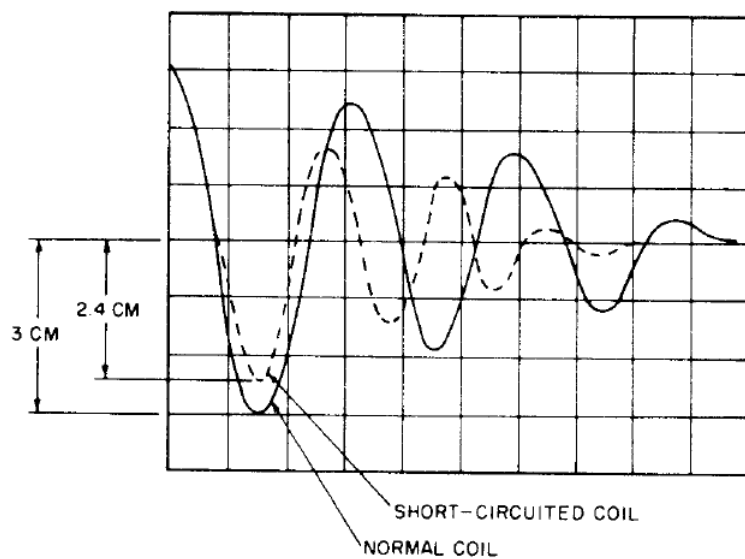
Como demonstrado em Grubic et. al. (42), a sensibilidade da frequência de oscilação da forma de onda do ensaio de surto de tensão para variações na indutância da bobina em teste é de 1/2, ou seja, uma variação de 1% na indutância do enrolamento sob teste causará uma variação de 0,5% na frequência da onda.

O método EAR compara matematicamente a área de duas formas de onda de diferentes enrolamentos entre si, utilizando a equação (2). $F^{(1)}$, na equação, representa os valores de tensão dos pontos de i a N que compõem a onda obtida do enrolamento em teste e $F^{(2)}$ é referente à onda de comparação, podendo ser essa a onda de outro enrolamento do mesmo estator ou uma onda padrão de comparação (43).

$$EAR_{1-2} = \frac{\sum_{i=1}^N |F_i^{(1)}| - |F_i^{(2)}|}{\sum_{j=1}^N |F_j^{(1)}|} \quad (2)$$

Este método é bastante sensível a variações na forma de onda e é comumente utilizado na comparação entre os enrolamentos de motores trifásicos entre si (28). Neste método, o mesmo impulso de tensão é aplicado em todos os enrolamentos que se espera que sejam idênticos. Como raramente os enrolamentos apresentarão a mesma falha ou a mesma localização da falha, então uma grande variação no EAR é esperada caso haja um defeito no estator em teste. A Figura 6 mostra um exemplo da variação de área entre as ondas saudável e com defeito entre espiras.

Figura 6 – Exemplo da variação da área entre as formas de onda saudável (contínua) e com curto-circuito entre espiras (tracejada)



Fonte: (37)

Ambos os métodos descritos anteriormente podem ser afetados pelas características físicas do estator em teste, como a condição do núcleo de chapas, a configuração do bobinado, as conexões entre enrolamentos, etc (28). Isso pode ser um problema quando falhas menores, que causam apenas pequenas variações nas formas de onda, podem acabar ficando "escondidas" nas variações físicas do processo produtivo de bobinagem do estator.

O método P-P EAR ajuda a resolver esse problema, já que é imune a essas variações físicas entre enrolamentos, pois compara os impulsos aplicados em um mesmo enrolamento. Durante o ensaio de surto de tensão repetitivo, a tensão de pico dos consecutivos impulsos é aumentada em patamares bem definidos. A cada novo patamar a forma de onda obtida é comparada com a anterior, utilizando a equação (2) (42).

No método P-P EAR geralmente se inicia o ensaio com uma tensão que não é suficiente para romper uma possível falha de isolamento e vai aumentando até a tensão final do ensaio. Como se sabe quais são os patamares de tensão do ensaio, é possível estimar a diferença de área esperada entre as ondas e, caso o valor obtido seja muito diferente do valor estimado, então um problema de isolamento deve ser o motivo (42).

Outro método comum de análise é a comparação de EAR entre a curva obtida do enrolamento sob teste e uma onda padrão. O operador do ensaio aplica o ensaio de surto de tensão em um enrolamento que se sabe que está com a isolamento adequada e a salva no equipamento. Toda vez que uma peça do mesmo projeto necessita ser testada, a comparação será entre a forma de onda medida e a curva de referência armazenada previamente (28). Essa é uma prática comum em estatores monofásicos, onde não há dois enrolamentos idênticos para comparação entre si no mesmo motor.

2.2.4 Parâmetros de avaliação e tolerâncias

Como já explicado no capítulo 1, há uma grande dificuldade em diferenciar uma variação de EAR entre um estator saudável e um estator com defeito, pois normalmente não se sabe qual o valor de variação de ondas será verificado durante um defeito entre espiras, por exemplo, e também é bastante custoso ao fabricante a geração de um defeito nos estatores para que seja possível ter ao menos uma noção de proporcionalidade nos resultados do ensaio.

Uma prática comum é avaliar os desvios padrões de processo e de medição em peças testadas previamente e consideradas saudáveis. Se as variações de medição e de processo são conhecidas para uma amostragem de peças, pode-se ter uma noção de quais valores fora da curva normal dessa amostragem podem indicar um defeito.

Porém, para se obter uma melhor confiabilidade, uma maior amostragem de peças deve ser obtida. Além disso, este método não permite saber quais valores são esperados para um projeto completamente novo de estator. Ademais, se saberá os desvios de peças saudáveis, porém ainda não haverá a informação da variação esperada para um defeito.

Uma prática bastante comum é adotar um valor padronizado de 10% para estatores novos, para estabelecer uma tolerância inicial, até que se tenham dados suficientes para determinação

de tolerâncias mais condizentes ao processo, principalmente se já houve defeitos detectados e diagnosticados nos ensaios.

Alguns fabricantes, como Baker (28), sugerem um EAR entre 5 e 15% e um ZCP entre 5 e 20% para testes de chão de fábrica durante o processo de fabricação. A fabricante Electrom considera que um EAR de até 10% é um bom resultado, mas que também existe uma "área cinzenta" nessa definição, já que em alguns estatores concêntricos, por exemplo, diferenças de até 20% podem ser observadas (29).

Um artigo da *EASA (Electrical Apparatus Service Association)* cita um EAR limite de 15%, apesar de também comentar que estas definições tendem a variar para diferentes projetos de estatores e para diferentes equipamentos de teste, fazendo com que a maioria dos fabricantes de equipamentos de aplicação do ensaio de surto de tensão evite a publicação de critérios de aprovação do ensaio (30).

Outros fabricantes de equipamentos, inclusive, mantêm a característica inicial do ensaio, apenas mostrando ao operador do ensaio as ondas medidas na tela de um osciloscópio, para que ele possa realizar uma análise visual da diferença entre ondas e, assim, determinar se o teste está aprovado ou reprovado. A norma Nema (27) cita essa característica subjetiva do ensaio como um dos maiores motivos de dificuldade de aplicação do ensaio de surto de tensão, já que requer grande experiência do operador do ensaio para determinar o estado final de aprovação/reprovação.

Essa mesma norma também comenta que para determinação desses parâmetros de aplicação e de tolerância do ensaio podem ser necessários extensivos testes empíricos em várias peças do mesmo modelo de estator, de forma a encontrar a tensão e a tolerância adequada ao processo de fabricação para a identificação de possíveis defeitos.

2.3 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foram apresentados alguns dos principais testes para aferir e garantir o bom funcionamento dos sistemas isolantes da máquina elétrica. Verifica-se que os testes possuem diferentes capacidades e abrangências, sendo complementares entre si.

Os ensaios de resistência de isolamento e alta tensão aplicada são utilizados para verificar problemas de isolamento entre fases e entre fases e o terra, podendo detectar rachaduras no sistema isolante, absorção de umidade e possíveis danos na parede de isolamento entre os circuitos elétricos da máquina. Porém, eles não são capazes de detectar defeitos entre as espiras do mesmo enrolamento e, dependendo de como for aplicado, nem entre as fases da máquina.

O ensaio de surto é o único ensaio capaz de detectar defeitos de isolamento entre espiras do estator bobinado, sendo de vital importância na indústria. Porém, é importante destacar que ainda é considerado um ensaio de difícil aplicação, sendo necessário um conhecimento bastante avançado do produto em teste e do comportamento de várias amostras desse estator para a definição da tensão de ensaio e os parâmetros de controle.

3 MODELAMENTO DO ENSAIO DE SURTO EM ALTA FREQUÊNCIA

Como visto anteriormente, o ensaio de surto de tensão se baseia na aplicação de um impulso de alta tensão, gerando uma resposta de alta frequência do circuito RLC formado pela bobina em teste e pelo capacitor do equipamento de aplicação do surto de tensão. Dessa forma, para uma simulação adequada da resposta dos enrolamentos do estator bobinado ao impulso, se faz necessária uma análise da resposta de alta frequência da bobina em teste.

Quando submetido a alta frequência, alguns efeitos adicionais aparecem no estator bobinado, como uma maior influência das capacitâncias parasitas entre enrolamentos e entre espiras, efeito pelicular nos condutores, diminuição da permeabilidade magnética do núcleo e uma distribuição não uniforme da tensão entre espiras ao longo da bobina em teste. Além disso, dependendo da frequência de resposta, os enrolamentos do estator podem se comportar como uma linha de transmissão ou, em maiores frequências, como um divisor capacitivo (44).

O conhecimento sobre os efeitos dos transientes em máquinas elétricas, principalmente envolvendo a isolamento, é bastante importante para projeto de sistemas isolantes robustos, diagnóstico e prevenção de falhas em máquinas elétricas.

A variedade de diferentes efeitos dependendo da característica do impulso observado implica também em uma variedade de diferentes modelos para análise da resposta dos enrolamentos ao impulso, dependendo do que se deseja avaliar na máquina elétrica. Esse capítulo introduz modelos para análise de alta frequência em máquinas elétricas para diferentes aplicações e, em maior detalhe, o modelo escolhido para a simulação do ensaio de surto em estatores bobinados, obtendo-se o circuito equivalente utilizado na simulação.

3.1 MODELOS DE ALTA FREQUÊNCIA USUAIS

Durante transientes de alta frequência, como surtos de tensão, os enrolamentos da máquina elétrica podem ser modelados como impedâncias dependentes da frequência, já que a alta frequência imposta pela resposta dos enrolamentos ao impulso causa efeitos distintos da operação em regime permanente. Dois tipos de modelos são comumente utilizados para se estudar os efeitos de impulsos de alta frequência em máquinas elétricas: modelos internos e modelos de terminal (44).

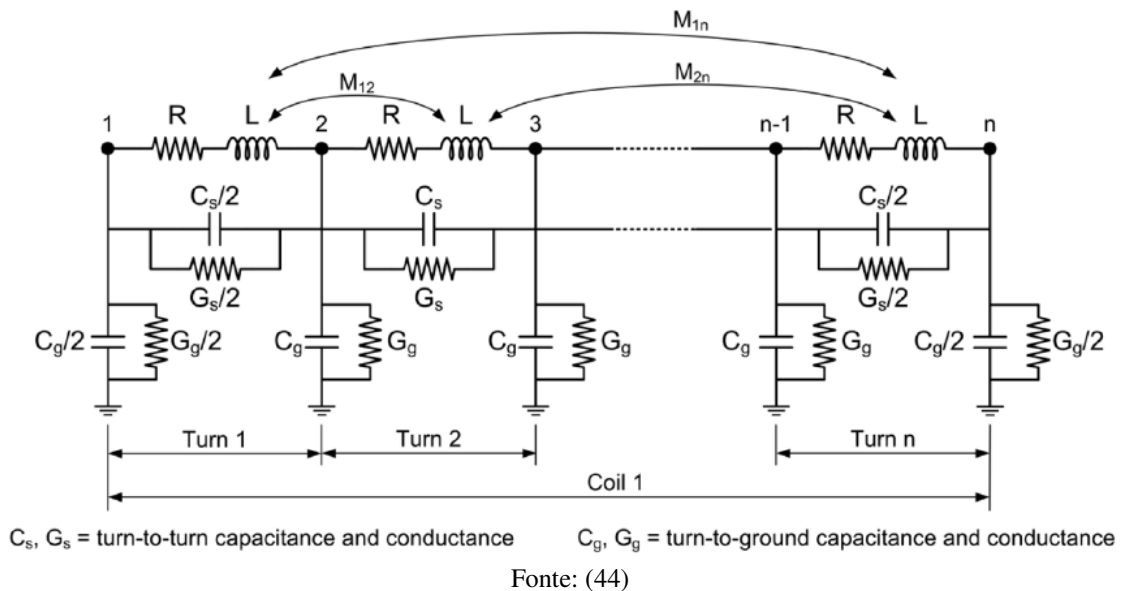
Modelos internos são modelos comumente utilizados para análise da distribuição da tensão ao longo das espiras do enrolamento submetido ao impulso. O estresse causado nos sistemas de isolamento da máquina elétrica quando submetidas a surtos de tensão dependem do tempo de subida da onda e das características de bobinagem e ligação dos grupos de bobinas do circuito. Para esses modelos normalmente é necessário representar cada espira do enrolamento como um conjunto de capacitâncias, indutâncias e resistências.

As capacitâncias tem um papel importante na distribuição da tensão nas espiras durante o transitório de tensão, já que correntes de deslocamento durante o impulso aparecem primeiro nas capacitâncias do circuito e depois nas indutâncias. As indutâncias e resistências do circuito

dependem dos efeitos das correntes parasitas no núcleo do estator, que atenua a penetração das ondas na ranhura, e também do efeito pelicular nos condutores (44).

Para esse tipo de análise, normalmente é adotado um circuito em escada, onde cada seção do circuito representa uma espira ou um grupo de espiras onde se deseja realizar a análise das tensões e correntes durante o transitório. A Figura 7 mostra um circuito genérico equivalente. Cada espira é representada por uma indutância L , equivalente à indutância própria somada às indutâncias mútuas entre espiras, uma resistência R e as condutâncias G , representando a resistência da espira e as perdas do circuito, as capacitâncias entre espiras C_s , e a capacitância entre a espira e o núcleo do estator C_g , com metade do seu valor colocado na entrada e na saída de cada espira (44).

Figura 7 – Circuito equivalente de parâmetros agrupados para análise do comportamento interno da máquina durante transitórios de tensão



Exemplos recentes desse tipo de modelamento podem ser vistos em (45) e (46), que utilizam esse tipo de circuito equivalente para prever a distribuição da tensão transitória ao longo da bobina utilizando métodos numéricos. Esses métodos normalmente têm um alto custo computacional e requerem um maior detalhamento dos circuitos internos para que possa ser obtida uma boa precisão do modelo.

No ensaio de surto de tensão, a forma de onda para a comparação nas ferramentas de análise do ensaio é adquirida nos terminais do enrolamento em teste, mesmo ponto onde ocorre a aplicação dos impulsos do ensaio. Dessa forma, para a simulação da resposta do ensaio não é necessária uma análise tão detalhada dos circuitos internos, portanto um modelo de terminal é adequado para a análise dessas curvas.

Modelos de terminal são utilizados para avaliar as interações entre o circuito que recebeu o impulso transitório e os demais componentes do sistema. Modelos comuns são modelos de uma ou duas portas, modelos de caixa preta e circuitos equivalentes simplificados apresentando

os terminais de interesse do componente sendo modelado (44).

Nos modelos de terminal, os enrolamentos do estator em teste podem ser representados como uma impedância dependente da frequência, que pode ser obtida a partir da medição da curva característica de impedância pela frequência nos terminais dos enrolamentos que se deseja avaliar, na faixa de frequência de interesse. Esse tipo de abordagem permite obter os elementos do circuito e, posteriormente, a análise no domínio do tempo.

A desvantagem desse tipo de abordagem é que se baseia em uma análise prática realizada especificamente naquele componente testado e, embora algumas tendências gerais possam ser inferidas a partir dos testes, de acordo com o projeto, tamanho ou características de conexão dos enrolamentos, previsões para estatores não testados podem apresentar variações (44). Utilizando essa abordagem, Mirafzal et al. propõe um modelo universal para o motor de indução para análise do seu comportamento em alta frequência (47).

Utilizando o circuito equivalente padrão da norma IEEE Std 112 (48), comumente utilizado para modelar o motor de indução em baixas frequências (50 ou 60 Hz), os autores propõem a adição de alguns elementos no circuito para incluir os parâmetros dependentes da frequência, como as capacitâncias entre espiras e entre enrolamento e terra, a resistência do ponto de antirressonância, uma resistência para representar as perdas por efeito pelicular e uma divisão na indutância de dispersão, de forma a representar a distribuição não uniforme da tensão ao longo da bobina durante o impulso.

Posteriormente, os mesmos autores propõem uma forma de determinar os parâmetros de alta frequência do circuito através da medição das curvas de impedância pela frequência com o motor conectado em modo comum (MC) e em modo diferencial (MD) (49). O circuito sugerido é apresentado na Figura 8. A obtenção desses parâmetros será tratada em detalhes na seção 3.2.

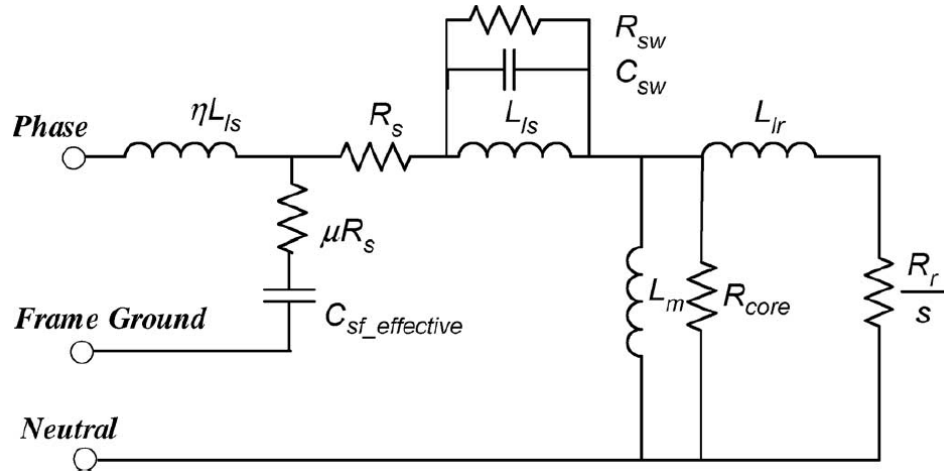
Os elementos R_s , L_{ls} , R_r , L_{lr} , L_m e R_{core} são os elementos de baixa frequência do circuito equivalente, encontrados na IEEE Std 112, sendo eles respectivamente: resistência do estator, indutância de dispersão do estator, resistência do rotor referida ao estator, indutância de dispersão do rotor referida ao estator, indutância magnetizante e resistência representativa das perdas no ferro. Esses elementos são obtidos através dos dados de projeto e de ensaios a vazio e de rotor bloqueado do motor em laboratório (48).

Os novos elementos adicionados no circuito estão descritos a seguir:

- η representa a parcela inicial da indutância de dispersão L_{ls} , dada pelas primeiras espiras da ranhura de entrada dos terminais, onde a maior parte da tensão do impulso de entrada se concentra;
- μ é um multiplicador do valor da resistência estatórica R_s , que caracteriza uma resistência de amortecimento inicial entre carcaça e aterramento, representando o efeito pelicular e de proximidade nos condutores, e também abrange a resistividade das laminações de aço, desde as ranhuras até onde o fio terra do motor é conectado na caixa de ligação;
- C_{sf} é a capacitância entre os enrolamentos e a carcaça do motor;

- C_{sw} e R_{sw} são respectivamente a capacitância entre espiras e a resistência de amortecimento entre espiras, para representar o efeito pelicular nos condutores que formam as espiras;

Figura 8 – Modelo do motor de indução em altas frequências



Fonte: (47)

Em (49), Mirafzal et. al. realizam uma simulação da resposta em frequência do motor modelado através do circuito equivalente proposto e a compara com a resposta em frequência medida no mesmo motor, obtendo uma boa correlação entre as duas curvas.

Posteriormente, vários trabalhos expandem o uso do circuito equivalente proposto. Ryu, Park e Han propõem uma maneira de estimar os parâmetros de alta frequência do circuito equivalente apresentado pelo trabalho de Mirafzal et. al., porém baseando-se na extração dos parâmetros por unidade de comprimento usando a metodologia de modelamento de linhas de transmissão e obtendo uma matriz de parâmetros S a partir das medições de tensão e corrente em um circuito de duas portas. Os resultados obtidos também demonstraram boa correlação com as medições da curva de impedância pela frequência obtida experimentalmente (50).

Usando o mesmo método, Devi, Sarma e Rao realizam o modelamento e simulação de um motor de indução com o objetivo de modelar o defeito de curto-circuito entre-espiras e utilizar esses dados para diagnóstico e classificação de defeitos (51).

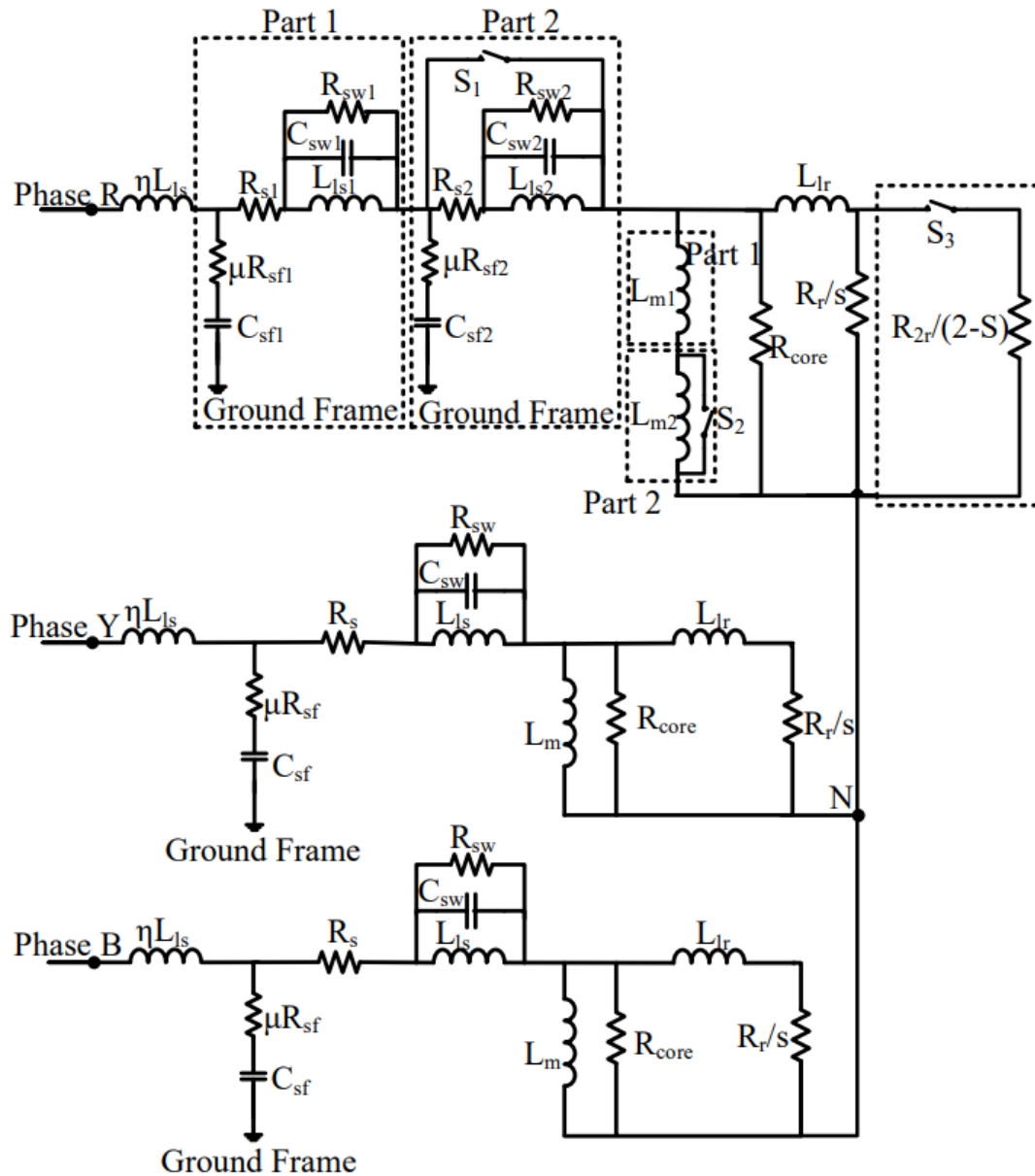
Para isso, eles montam o circuito equivalente do motor de indução conectado em estrela, na qual uma das fases é modelada com uma espira separadamente do total e uma chave é colocada paralelamente ao circuito representando essa espira, de forma a inserir o defeito de curto-circuito entre espiras nela. A Figura 9 mostra o circuito proposto.

Nele, os elementos dentro do retângulo nomeado *Part 1* são equivalentes ao número total de espiras menos 1 e os elementos do retângulo nomeado *Part 2* são equivalentes aos valores de apenas uma espira, para a simulação de curto-circuito entre espiras.

Uma boa correlação foi observada entre os resultados experimentais e simulados, realizando simulações de falha entre espiras, desbalanceamento entre fases e falta de uma das fases.

Posteriormente, 3 modelos de redes neurais foram aplicados para classificar as falhas, a partir dos resultados práticos e simulados, apresentando boa precisão na classificação dos defeitos.

Figura 9 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico com falha entre espiras em uma das fases



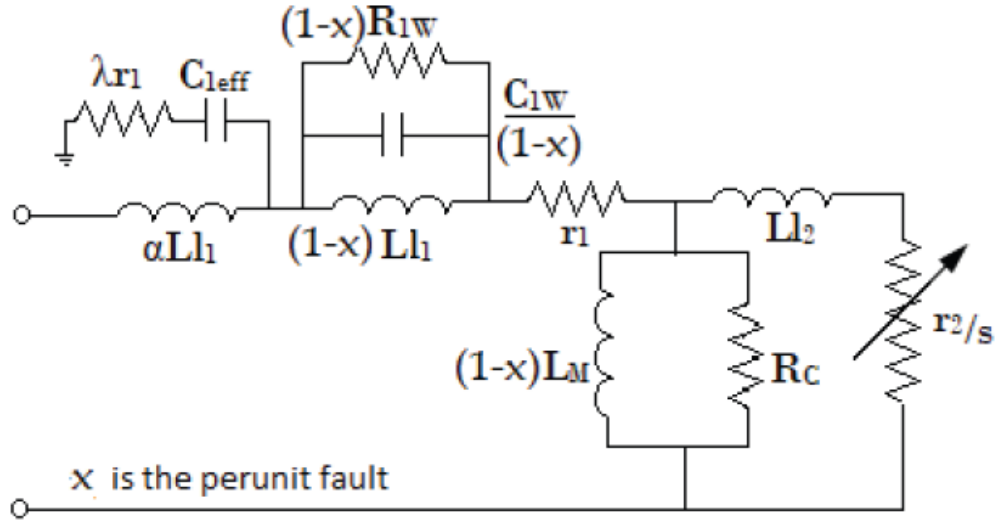
Fonte: (51)

Na mesma linha, Ray, Chakraborty e Chaudhuri também utilizam o mesmo modelo de circuito equivalente para simular falhas nos enrolamentos do motor de indução quando acionado por inversor de frequência (52). Diferentemente da estratégia anterior, nesse modelo os circuitos não são separados em parte saudável e parte defeituosa em uma das fases, mas a mudança ocorre diretamente nos parâmetros de resistência, capacitância e indutância, proporcionalmente ao tamanho da falha.

Nessa simulação, os elementos afetados por um curto-circuito entre espiras, por exemplo,

são modificados por X , sendo X a razão entre o número de espiras em curto-circuito e o número total de espiras da fase modelada. A Figura 10 mostra o circuito equivalente com o fator X para simulação dos defeitos.

Figura 10 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico com falha entre espiras em uma das fases



Fonte: (52)

No circuito, os elementos foram nomeados de forma diferente, onde αLl_1 é equivalente ao ηL_{ls} , λr_1 é equivalente a R_{sf} , C_{1eff} é o mesmo que C_{sf} , R_{1w} e C_{1w} são os mesmos que R_{sw} e C_{sw} , e r_1 , L_{l1} , r_2 , L_{l2} , são equivalentes a R_s , L_{ls} , R_s , L_{ls} , respectivamente.

Ao comparar-se as curvas do Modo Diferencial (MD) e do Modo Comum (MC) obtidas na simulação e de forma experimental, também verifica-se uma boa correlação. Assim, é possível comparar as diferenças nas correntes e tensões no tempo para diferentes tamanhos de falha, como por exemplo o curto-circuito de 3 e 5 espiras consecutivas (52).

Trabalhos mais recentes expandem o uso desse circuito para estudar os impactos que defeitos e mudanças nas características do circuito podem causar nas respostas de modo diferencial e modo comum. Hoffmann e Ponick realizam um estudo de diferentes configurações do mesmo circuito equivalente, ainda utilizando as curvas de MD e MC para obtenção dos elementos, mas rearranjando-os no circuito equivalente para estudo de diferentes aplicações, obtendo-se o desvio estatístico de cada proposta (53). O estudo mostra que algumas configurações diferentes de circuito apresentaram melhor correlação com os resultados práticos, principalmente em frequências acima de 1MHz. Abaixo de 1MHz, todas as configurações demonstraram boa correlação com o resultados experimentais.

Por fim, Fan et al. também utilizam o mesmo circuito equivalente para estudar o impacto que defeitos causam nas curvas de MC e MD do motor de indução e, conseqüentemente, nos elementos do circuito equivalente para simulação dessas máquinas (54).

Os trabalhos analisados demonstram uma boa capacidade de simular o circuito do motor

de indução em alta frequência, tanto para estatores bobinados saudáveis, quanto para defeituosos, mais comumente com defeito de curto-circuito entre espiras, cuja detecção é de alto interesse para o ensaio de surto, já que a detecção desse tipo de defeito está em suas principais atribuições.

Dessa forma, a simulação do ensaio de surto de tensão apresentada nessa dissertação será baseada no circuito equivalente apresentado por Mirazfal et. al. e adaptada nos trabalhos mais recentes. A obtenção do circuito equivalente para a simulação do estator bobinado proposto nesse trabalho será vista em detalhes na seção 3.2. No entanto, para a simulação do ensaio de surto serão necessárias adaptações do circuito, as quais serão vistas em detalhes na seção 3.3.

3.2 PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE EM ALTA FREQUÊNCIA NO EN- SAIO DE SURTO DE TENSÃO

Como comentado na seção 3.1, neste tópico será apresentado o passo a passo da obtenção dos elementos do circuito equivalente do estator trifásico para a simulação do ensaio de surto de tensão.

O estator que será simulado é um estator trifásico de 1/3 kW, 4 polos. As características físicas por fase do estator são apresentadas abaixo, vide Figura 11.

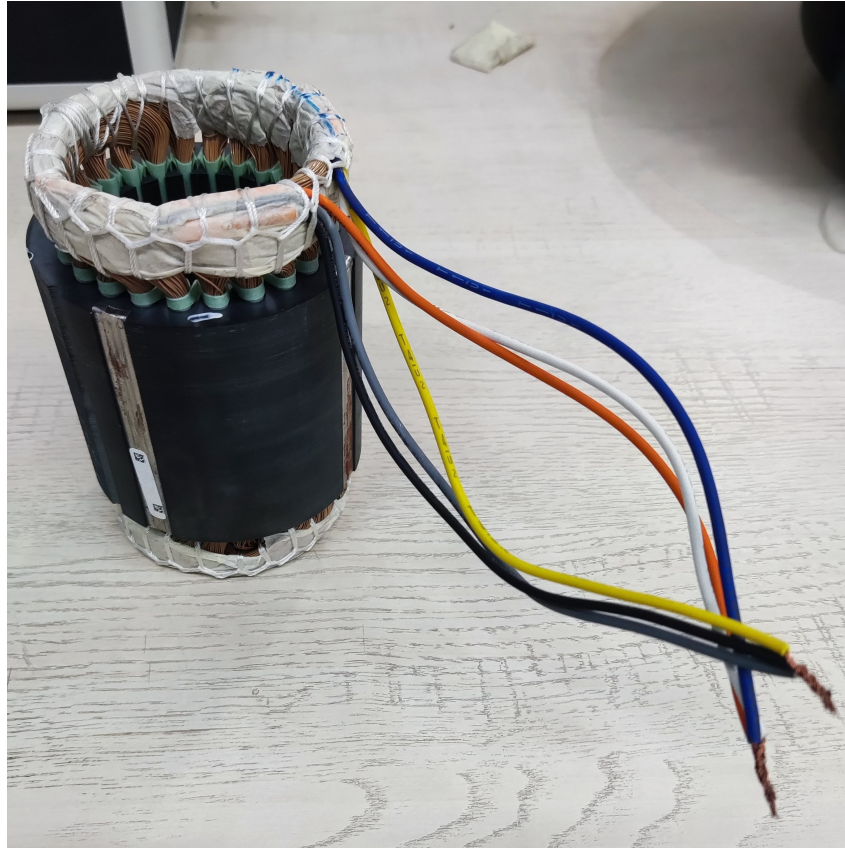
- Número de fios em paralelo: 1;
- Número de espiras: 31;
- Quantidade de ranhuras: 24;
- Bobinas por grupo: 2;
- Grupos por fase: 4;
- Número de camadas: 2.

Para iniciar a construção do circuito equivalente, primeiro serão obtidos os dados de baixa frequência do circuito, obtendo-se assim o circuito equivalente padrão proposto na IEEE Std 112. Esses dados normalmente são calculados através das características físicas de projeto e de forma experimental, através de testes à vazio e em rotor bloqueado do motor completo (48). Os parâmetros de baixa frequência foram fornecidos pela fabricante WEG Equipamentos Elétricos S/A e podem ser visualizados na Tabela 2.

Para os parâmetros de alta frequência, serão utilizadas as medições das curvas de impedância por frequência nas condições de ligação de modo comum (MC) e modo diferencial (MD), e o procedimento de cálculo apresentado em (49).

A medição das curvas de alta frequência foi realizada com uma ponte RLC Quadtech, modelo 1689M. As medições foram tomadas em laboratório, utilizando um dos 3 estatores saudáveis disponíveis para o ensaio. A Figura 12 apresenta o diagrama das conexões entre a

Figura 11 – Estator bobinado utilizado para a simulação e experimentos práticos



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S/A

Tabela 2 – Parâmetros de baixa frequência do circuito equivalente

Parâmetro	Valor
$R_s (\Omega)$	20,16
$L_{ls} (\text{mH})$	48,31
$R_r (\Omega)$	27,15
$L_{lr} (\text{mH})$	41,06
$L_m (\text{H})$	1,17
$R_{core} (\Omega)$	42,83

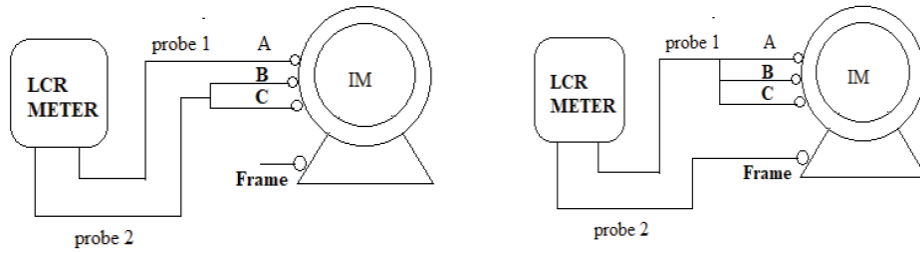
Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S/A

ponte RLC e o estator em teste para a medição de modo diferencial (esquerda) e de modo comum (direita).

As medições foram realizadas em uma faixa de 60 Hz a 100 MHz, desde a frequência nominal de operação do motor até a maior frequência permitida pela ponte RLC utilizada. Para cada valor de frequência aplicado, o módulo da impedância $|Z|$, um ângulo de defasagem θ , uma capacitância C e um valor de resistência série R_s foram medidos. A Figura 13 apresenta o gráfico da impedância de modo diferencial e a Figura 14 apresenta o gráfico da impedância de modo comum, medidas no experimento.

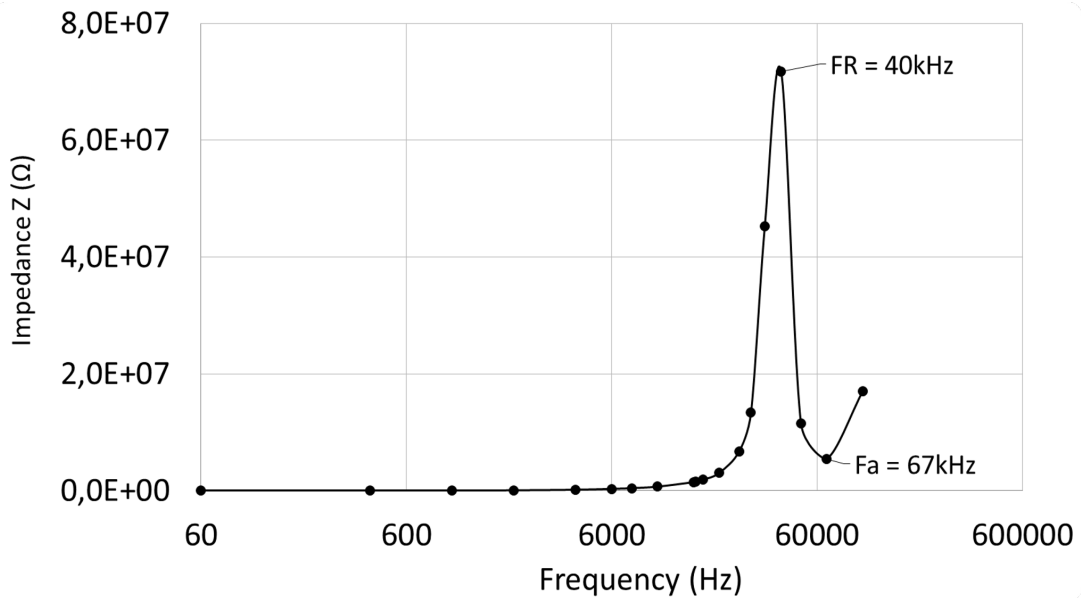
O primeiro passo para obtenção dos parâmetros de alta frequência é a obtenção da

Figura 12 – Diagrama de conexão da ponte RLC com o estator em teste para medição de modo diferencial (esquerda) e de modo comum (direita)



Fonte: (52)

Figura 13 – Curva de impedância pela frequência medida no ensaio de modo diferencial



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

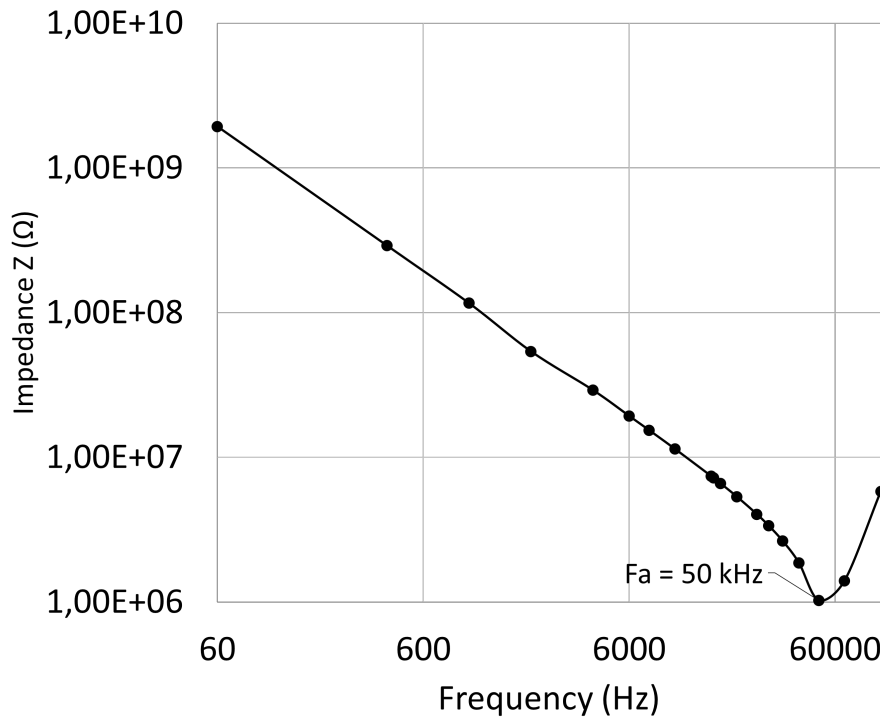
capacitância entre os enrolamentos e a carcaça, C_{sf} . Para isso, além das curvas de impedância, também foi obtida a curva da capacitância entre as fases e a carcaça, a partir das medições realizadas na configuração de modo comum. A curva da capacitância pela frequência pode ser observada na Figura 15.

A capacitância entre os enrolamentos e a carcaça C_{sf} por fase pode ser determinada pela média entre as capacitâncias dos pontos de baixa frequência ($C_{sf}(LF)$), onde o ângulo da impedância é mais próximo de 90° , e a capacitância após o ponto de ressonância, em alta frequência ($C_{sf}(HF)$), dividido pelo número de fases. Obtendo-se os valores dos gráficos da Figura 15, verifica-se que o valor de C_{sf} pode ser calculado pela equação (3).

$$C_{sf} = \left(\frac{C_{sf}(HF) + C_{sf}(LF)}{2} \right) / 3 = \left(\frac{0,75 \text{ nF} + 1,38 \text{ nF}}{2} \right) / 3 = 0,35 \text{ nF} \quad (3)$$

A partir da curva de modo diferencial da Figura 13, é possível obter os pontos de

Figura 14 – Curva de impedância pela frequência medida no ensaio de modo comum



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

ressonância f_r , de aproximadamente 40 kHz, e antirressonância f_a , de aproximadamente 67 kHz. A frequência de ressonância f_r para o circuito equivalente proposto é obtida abrindo-se todas as resistências em paralelo, curto-circuitando as resistências série e utilizando a solução da equação quadrática $\alpha(\omega_r^2)^2 - \beta\omega_r^2 + 1 = 0$ (49), levando à equação (4).

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha})/2\alpha} \quad (4)$$

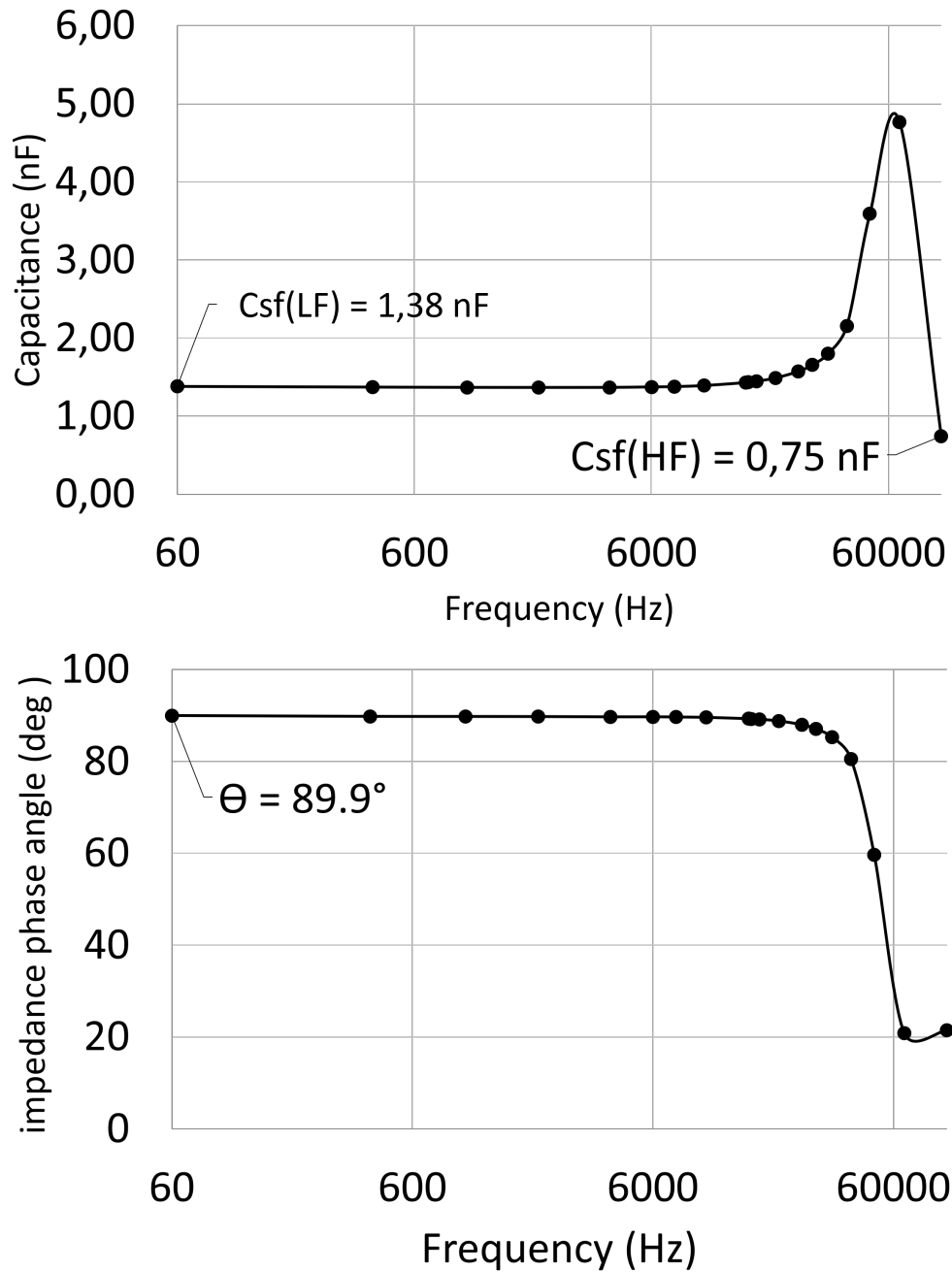
Onde:

- $\alpha = L_{ls}L_{lr}C_{sw}C_{sf}$;
- $\beta = (L_{ls} + L_{lr})C_{sf} + L_{ls}C_{sw}$;

E, conforme já explicado em seções anteriores:

- L_{ls} é a resistência de dispersão do estator;
- L_{lr} é a resistência de dispersão do rotor referida ao estator;
- C_{sf} é a capacitância de fase entre os enrolamentos e a carcaça;
- C_{sw} é a capacitância entre espiras dos enrolamentos;

Figura 15 – Curva da capacitância pela frequência medida no ensaio de modo comum



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como a indutância magnetizante L_m é muito maior que a indutância de dispersão do rotor referida ao estator e ambas estão em paralelo, é possível desconsiderar a indutância magnetizante no cálculo e somente considerar a indutância L_{lr} . Além disso, também é considerado que as indutâncias do estator e do rotor referida ao estator serão próximas o suficiente para que seja possível considerar que $L_{lr} \approx L_{ls}$, e dessa forma simplificar a equação (4) para obtenção do valor de C_{sw} (49).

Para o caso do ensaio de surto de tensão, os elementos do rotor não existirão, pois

o ensaio é realizado apenas no estator bobinado, sem a presença do rotor. Apesar disso, a consideração $L_{lr} \approx L_{ls}$ também será adotada, já que a falta do rotor e a presença de um impulso de alta frequência fazem com que haja uma redução considerável na permeabilidade magnética, gerando assim uma grande atenuação da indutância magnetizante, para aproximadamente 1% da indutância magnetizante nominal, algo que será visto em maior detalhe na seção 3.3, sobre os ajustes do circuito equivalente para o ensaio de surto.

Assumindo então que $L_{lr} \approx L_{ls}$, é possível simplificar a equação (4) e isolar o termo C_{sw} para encontrar seu valor. Com isso, é possível definir o valor de C_{sw} como mostrado na equação (5). Ao substituir as variáveis pelos valores do estator simulado obtém-se um valor de C_{sw} de 4,91 nF.

$$C_{sw} = \frac{2L_{ls}C_{sf}\omega_r^2 - 1}{L_{ls}\omega_r^2 (L_{ls}C_{sf}\omega_r^2 - 1)} \quad (5)$$

A resistência de amortecimento entre espiras R_{sw} pode ser definida como 2/3 da impedância total encontrada no ponto de ressonância f_r (49), conforme mostra a equação (6). Ela também leva em consideração a impedância do circuito rotórico, porém, como o ensaio de surto é realizado no estator sem a presença do rotor, esse termo da equação será nulo, simplificando-a na equação (7). Substituindo as variáveis pelos valores encontrados no experimento obtém-se o valor de R_{sw} de aproximadamente 47,8 MΩ.

$$R_{sw} = \frac{2}{3} |Z(f_r)| - |R_{core}| |j2\pi f_r L_{lr}| \quad (6)$$

$$R_{sw} = \frac{2}{3} |Z(f_r)| \quad (7)$$

A partir do ponto de antirressonância f_a , da Figura 13, é possível obter também o valor da resistência de amortecimento inicial entre carcaça e aterramento, de aproximadamente 3,7 MΩ, representativa do efeito pelicular em alta frequência nos condutores, dado pela equação (8).

$$R_{sf} = \frac{2}{3} |Z(f_a)| \quad (8)$$

E por fim, também utilizando a frequência de antirressonância f_a , é possível determinar a parcela de ηL_{ls} do circuito, que é a parcela representativa da distribuição não uniforme da tensão durante o impulso de surto. Esse valor pode ser calculado através da equação (9), chegando-se em um valor de $\eta = 0,33$.

$$\eta L_{ls} = \frac{1}{C_{sf} (2\pi f_a)^2} \quad (9)$$

Com esse conjunto de equações e com os resultados obtidos através das curvas experimentais das medições no estator bobinado, é possível montar o circuito equivalente do motor de indução para simulação da alta frequência. Porém, para o ensaio de surto, algumas considerações adicionais ainda precisam ser feitas antes de finalizar o circuito equivalente para a simulação, as quais serão tratadas na seção 3.3.

3.3 AJUSTES DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O ENSAIO DE SURTO DE TENSÃO

Como já explicado, a presença do rotor pode causar diferenças nas respostas do ensaio de surto de tensão entre as fases testadas, podendo confundir o operador do teste gerando um falso negativo, ou seja, apresentar um valor percentual alto o suficiente para ser interpretado como um defeito, mesmo que não haja nenhum defeito nos enrolamentos do estator (36, 55). Por isso o ensaio é realizado somente no estator bobinado, sem a presença do rotor e, dessa forma, o ramo com os elementos do rotor, R_r e L_{lr} , pode ser negligenciado no circuito equivalente.

Outro parâmetro que tem seu valor original modificado pela característica do ensaio é a indutância magnetizante. Ao aplicar impulsos de alta frequência no estator bobinado, variações na ordem de μs associadas a chaveamentos de alta velocidade, as lâminas de aço que compõem o núcleo do estator atuam como barreiras de fluxo e, dessa forma, a maior parte do fluxo produzido no núcleo do estator será um fluxo de dispersão (56).

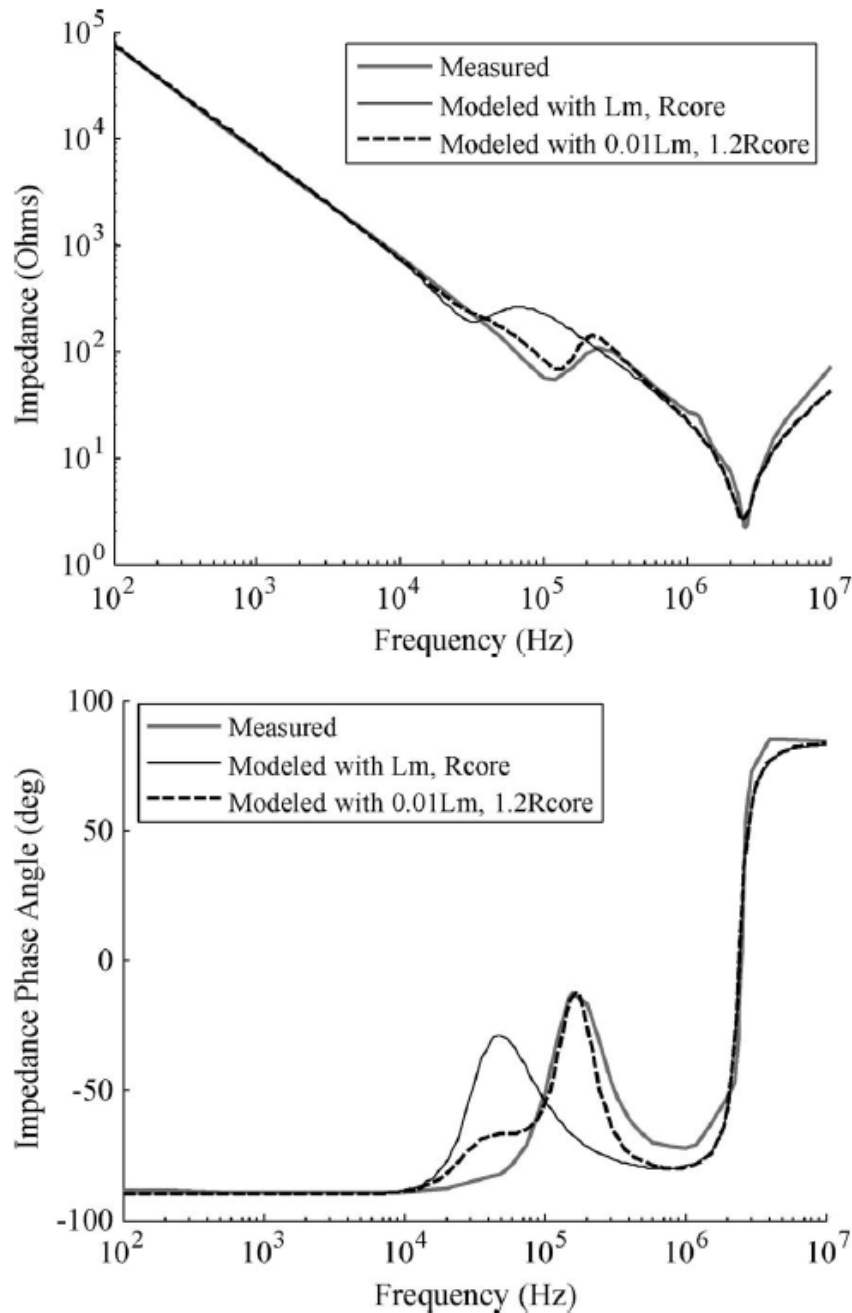
Essa redução ocorre por um aumento das correntes parasitas dentro do núcleo do estator, por uma redução no fluxo dentro do núcleo devido ao efeito pelicular e pela dependência da permeabilidade relativa com a frequência (44). Além disso, a ausência do rotor também contribui bastante para a redução da indutância magnetizante, principalmente pelas diferenças no entreferro. Por isso, ao montar o circuito equivalente para altas frequências, a indutância magnetizante L_m pode ser negligenciada ou reduzida (57).

Em (49), ao final do artigo, os autores apresentam resultados experimentais comparando as curvas de resposta de modo comum medidas e simuladas para os valores nominais e atenuados da indutância magnetizante e a resistência representativa das perdas no ferro. Na comparação, mostrada na Figura 16, é possível perceber que a redução da indutância magnetizante para 1% da indutância nominal de ensaios em laboratório melhorou bastante a precisão da curva de resposta, principalmente em maiores frequências, onde o efeito de atenuação é mais presente.

Para o ensaio de surto de tensão, uma consideração semelhante será feita. Durante as análises preliminares das curvas simuladas foi verificado que a redução da indutância magnetizante para 1% do valor original de laboratório resultou em uma melhor concordância em relação aos resultados experimentais observados, sendo este então o valor adotado para as simulações subsequentes.

Também ocorre uma alteração na forma de conexão dos terminais do circuito equivalente para o ensaio de surto de tensão, onde o terminal que faz conexão entre o enrolamento e o aterramento na carcaça, conforme ilustra a Figura 8, foi conectado juntamente ao terminal neutro,

Figura 16 – Curvas de resposta do estator em modo comum com a indutância magnetizante alterada para 1% do valor nominal.



Fonte: (49)

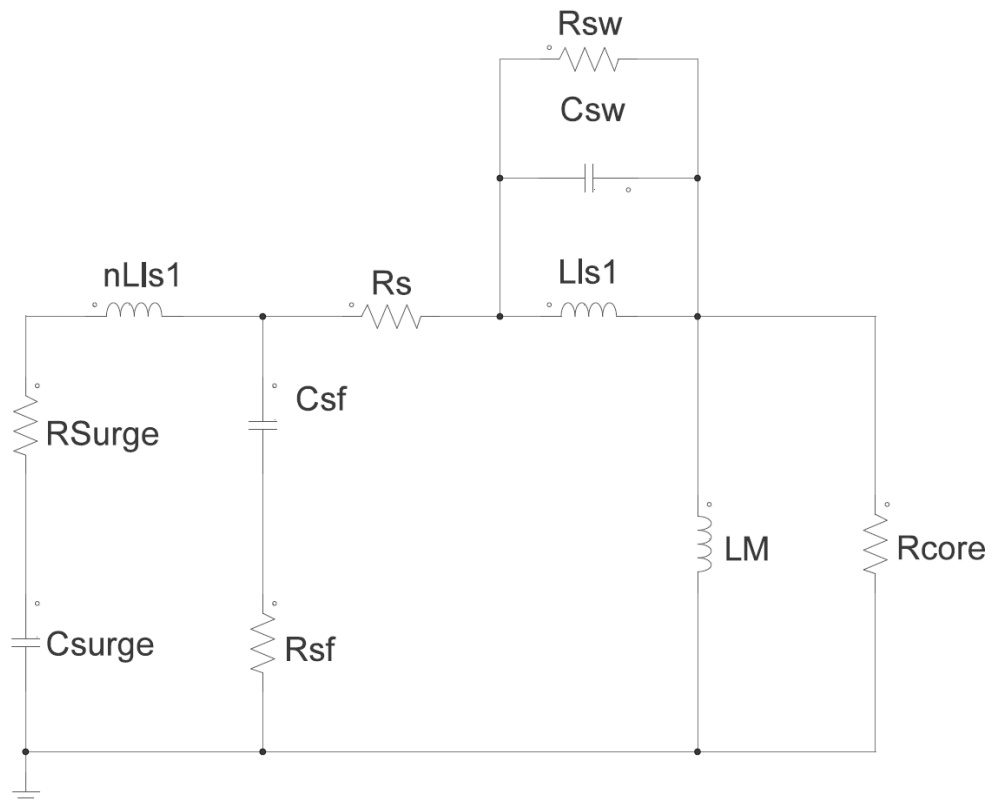
colocando a capacitância entre enrolamento e carcaça em paralelo ao circuito todo, já que no ensaio de surto de tensão a carcaça do estator e todos os terminais não utilizados no momento do ensaio são aterrados.

Por fim, o capacitor que carrega a tensão do ensaio e a chave para o fechamento do ensaio de surto foram modelados sem considerar as perdas de cada um. Somente a resistência de limitação de corrente do ensaio, R_{surge} , foi considerada no modelo, já que tem bastante influência na velocidade de atenuação da onda do ensaio. Os valores de C_{surge} e R_{surge} foram

considerados como sendo os nominais do equipamento aplicador de impulsos, de 100 nF e 15 Ω , respectivamente.

Com todos os elementos definidos, o circuito equivalente para a simulação do ensaio de surto é apresentado na Figura 17. Os valores de cada elemento são posteriormente apresentados na Tabela 3. Com isso, foi possível executar as simulações nos estatores considerados saudáveis. O próximo passo consiste em modelar como as falhas entre espiras irão atuar no circuito, e será apresentado na seção 3.4.

Figura 17 – Circuito equivalente para a simulação de peças saudáveis no ensaio de surto de tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 3 – Parâmetros do circuito equivalente de alta frequência

Parâmetro	Valor
Fr (Hz)	40.000
Fa (Hz)	66.667
Rs (Ω)	20,16
Lls (mH)	48,31
ηLls (mH)	16,15
Lm (mH)	1,175
R_{core} (Ω)	42,83
R_{sf} (M Ω)	3,70
C_{sf} (nF)	0,35
R_{sw} (M Ω)	47,80
C_{sw} (nF)	4,91
R_{Surge} (Ω)	15
C_{Surge} (nF)	100

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.4 AJUSTES DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA SIMULAÇÃO DE DEFEITOS

O circuito equivalente apresentado na seção 3.3 é o circuito considerando as características nominais de projeto e os dados experimentais de um estator saudável. Porém, para a simulação do ensaio de surto de tensão, com o objetivo de determinar as tolerâncias para os parâmetros de controle, também devem ser simulados os potenciais defeitos. Neste trabalho o foco será a simulação do principal defeito detectado pelo ensaio de surto, que é o curto-circuito entre espiras.

Para a simulação desse defeito serão alterados os parâmetros do circuito conforme indicado nos artigos de Hoffman e Ponick (52), e Fan et al. (54). Os parâmetros do circuito que dependem do número de espiras precisam ser alterados de forma proporcional à severidade do defeito, ou seja, a quantidade de espiras curto-circuitadas.

Inicialmente, a resistência de fase do circuito do estator pode ser descrita pela equação (10) (58).

$$R_s = \rho \cdot \frac{N_{cond} \cdot L_{cond}}{N_{conn} \cdot S_{cond}} \quad (10)$$

Onde ρ é a resistividade elétrica do material dos condutores a 20°C, L_{cond} é o comprimento total dos condutores, N_{conn} é o número de caminhos paralelos das bobinas e S_{cond} é a seção transversal dos condutores da bobina.

O termo N_{cond} se refere ao número de condutores do enrolamento, que é proporcional a quantidade de espiras, conforme mostrado pela equação (11), onde N_{slots} é o número de ranhuras, N_{turns} é a quantidade de espiras, N_{layers} é a quantidade de camadas e N_{conn} é a quantidade de fios em paralelo.

$$N_{cond} = \frac{N_{slots}}{3} \cdot N_{turns} \cdot \frac{N_{layers}}{N_{conn}} \quad (11)$$

Uma falha de curto-circuito entre espiras irá causar uma redução no número total de espiras da bobina, portanto o número de espiras na equação pode ser descrito por (12), onde N_{turns} é o número total de espiras e n é a quantidade de espiras curto-circuitadas, ou seja, a redução no número de espiras efetivas causadas pela falha de curto-circuito ou por um erro no processo de bobinagem.

$$N_{turns_{fault}} = (N_{turns} - n) \quad (12)$$

Substituindo o número de espiras N_{turns} da equação (11) pelo número de espiras efetivo em falha $N_{turns_{fault}}$ e dividindo a equação da resistência de fase com o elemento que define a falha pela equação da resistência de fase nominal, obtém-se que a resistência de fase do circuito do ensaio de surto de tensão é proporcional ao fator verificado na equação (13).

$$R_{s_{surge}} = \frac{R_{s_{fault}}}{R_s} = \left(1 - \frac{n}{N_{turns}}\right) \cdot R_s \quad (13)$$

Da mesma forma, a resistência de amortecimento entre espiras será afetada de forma proporcional, conforme a equação (14).

$$R_{sw_{surge}} = \left(1 - \frac{n}{N_{turns}}\right) \cdot R_{sw} \quad (14)$$

A indutância de dispersão L_{ls} é o somatório das indutâncias de dispersão dadas pelo fluxo de dispersão nas ranhuras, no entreferro, nas cabeças de bobina e também devido aos harmônicos de ordem superior (58). De forma simplificada, cada uma das indutâncias de dispersão consideradas para a formação da indutância própria da máquina possui a relação dada pela equação (15), onde a diferença entre as diferentes indutâncias de dispersão se dá pelo fator de permeância k , fator de bobinagem $f_{winding}$ e alguma característica física que define aquela indutância c_{Disp} , como um modificador pela geometria da máquina ou um modificador pelas diferentes ondas de permeância quando consideradas as harmônicas de ordem superior (58).

$$L_{ls} = \mu_0 \cdot k_{Perm} \cdot c_{Disp} \cdot L_{iron} \cdot (f_{winding} \cdot N_{cond})^2 \quad (15)$$

Entretanto, todas elas, de forma genérica, se relacionam com o número de espiras N_{turns} da mesma forma, através do elemento N_{cond} elevado ao quadrado e, portanto, é possível encontrar a relação utilizando a mesma substituição realizada para a resistência de fase, modificando o

número de espiras pela equação (12) e dividindo a equação com falha pela sem falha, chegando-se na equação (16).

$$L_{ls_{surge}} = \frac{L_{ls_{fault}}}{L_{ls}} = \left(1 - \frac{n}{N_{turns}}\right)^2 \cdot L_{ls} \quad (16)$$

A indutância magnetizante por fase também pode ser tratada de forma semelhante, já que também pode ser obtida de um somatório de diferentes indutâncias dadas pela geometria do estator e pelas diferentes ondas de permeância gerada pelas harmônicas da máquina (58). Da mesma forma que para a indutância de dispersão, pode-se simplificar a equação (17) da indutância magnetizante, na qual todas as parcelas da indutância têm a mesma relação com o número de condutores, ou seja, com o número de espiras, podendo-se chegar na equação (18) para definir a proporção que o defeito de curto-circuito entre espiras irá afetar esse elemento do circuito.

Na equação (17), μ_0 é a permeabilidade magnética do ar, D_1 é o diâmetro interno do estator, δ_g é o valor do entreferro, L_{core} é o comprimento do pacote de chapas do estator, f_{bp} é o fator de bobinagem e p é o número de pares de polos do estator.

$$L_m = \mu_0 \cdot (D_1 - \delta_g) \cdot L_{core} \cdot \left(\frac{f_{bp} \cdot N_{cond}}{p}\right)^2 \quad (17)$$

$$L_{m_{surge}} = \frac{L_{m_{fault}}}{L_m} = \left(1 - \frac{n}{N_{turns}}\right)^2 \cdot L_m \quad (18)$$

Por fim, a capacitância entre espiras C_{sw} é modificada também de forma proporcional (52), diminuindo seu valor conforme é diminuído o número total de espiras, como mostra a equação (19).

$$C_{sw_{surge}} = \left(1 - \frac{n}{N_{turns}}\right) \cdot C_{sw} \quad (19)$$

Dessa forma, todos os parâmetros afetados pela variação do número de espiras foram definidos e podem ser substituídos no circuito equivalente. Em estatores saudáveis, o valor de n é igual a zero, mantendo os valores nominais calculados com base nos experimentos e dados de projeto. Caso haja um curto-circuito entre duas ou mais espiras, o valor de n é modificado e, dessa maneira, os valores do circuito equivalente também.

3.5 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foram apresentadas propostas de circuito equivalente para a simulação do ensaio de surto, nas quais uma delas apresenta uma modificação no circuito equivalente em baixa

frequência comumente utilizado para análise de máquinas elétricas, se mostrando apta a simular as características do ensaio de surto de tensão com baixo custo computacional e apresentando os requisitos necessários para a simulação da tensão de surto nos terminais, tal qual é medido no ensaio.

Além disso, o circuito proposto tem extensivos trabalhos recentes simulando falhas elétricas no circuito equivalente, a mais comum delas o curto-circuito entre espiras, com o objetivo de realizar o diagnóstico, classificação e análise de defeitos em máquinas. Essa característica vem ao encontro do objetivo do trabalho, de simular as variações causadas por defeitos elétricos no bobinado, de forma a facilitar o dimensionamento da faixa de tolerância para o ensaio.

Com isso, através da obtenção experimental das curvas de impedância em modo comum e diferencial dos estatores em teste, agregado ao conhecimento de projeto de máquinas elétricas e das características físicas do ensaio de surto de tensão, foi possível estabelecer um circuito equivalente para estatores bobinados saudáveis e defeituosos para a simulação do ensaio de surto.

O próximo capítulo utiliza o circuito equivalente gerado para a simulação do ensaio de surto e compara os resultados simulados nesse circuito com os resultados observados na prática, de forma a estabelecer uma correlação entre ambos e determinar qual seria a faixa de tolerância adequada para o estator utilizado para a validação.

4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com a definição do circuito equivalente no capítulo 3 e a obtenção dos seus parâmetros, adaptados para o ensaio de surto de tensão, o próximo passo consiste na simulação do ensaio e na comparação dos resultados simulados com as formas de ondas obtidas no ensaio experimental de surto de tensão.

Inicialmente serão apresentadas as simulações realizadas para um estator considerado saudável e em um estator com um defeito de variação no número de espiras. Posteriormente, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de surto realizados nos estatores do modelo simulado e então a comparação entre os resultados e validação do modelo será apresentada, seguida da apresentação das conclusões do capítulo.

4.1 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE DAS FORMAS DE ONDA

Utilizando o circuito equivalente apresentado no capítulo 3, foi desenvolvida uma rotina de simulação e de análise para aplicação das ferramentas de avaliação do ensaio e, dessa forma, comparar as formas de onda entre si.

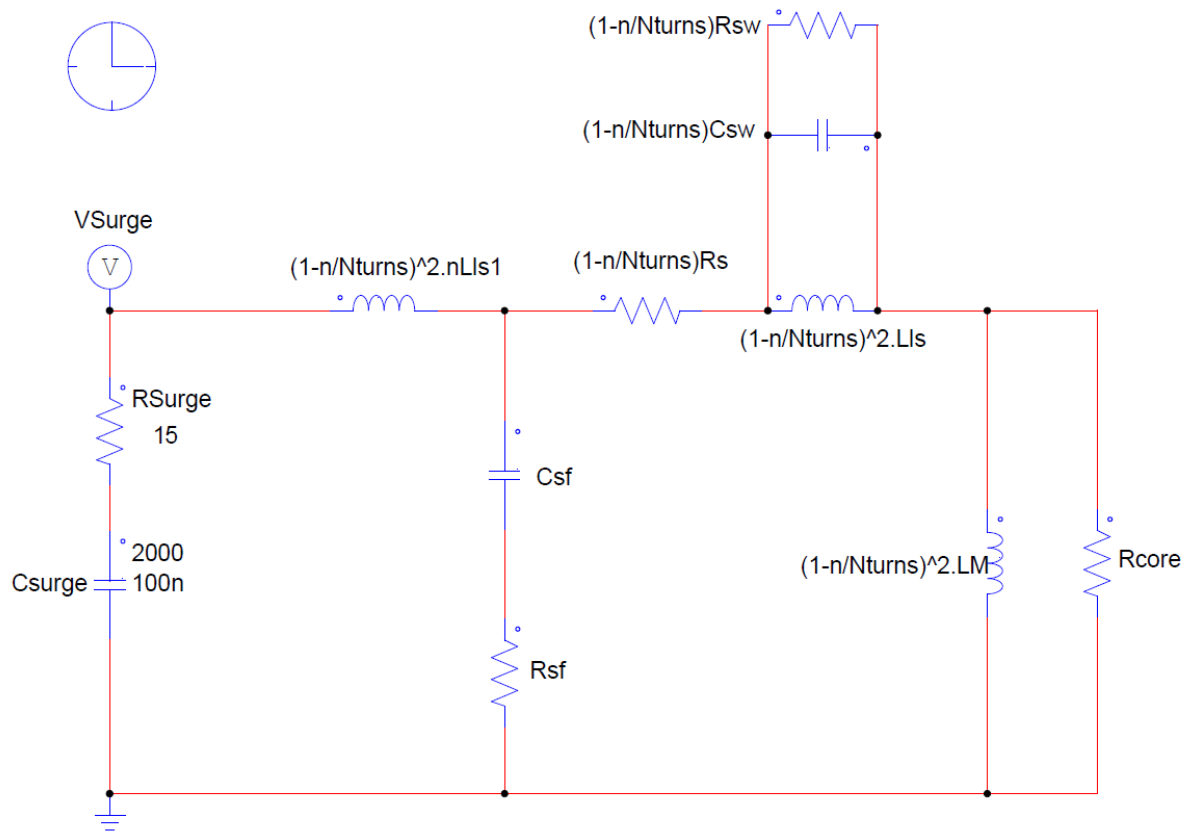
A simulação foi conduzida no ambiente de simulação *PSIM*, inserindo uma tensão inicial no capacitor C_{Surge} de 2.000 V, tensão comumente utilizada no ensaio realizado no tipo de estator escolhido. O tempo total de simulação foi de 6 ms e o passo de tempo foi de 20 ns, de forma a simular as mesmas características da placa de aquisição utilizada nos ensaios.

A forma de onda foi adquirida nos terminais do enrolamento em teste, após o capacitor de surto e a resistência de limitação de corrente na chave, mesmo ponto onde a forma de onda é medida nos ensaios. A Figura 18 mostra o circuito desenvolvido no ambiente de simulação, contendo o ponto de aquisição V_{Surge} e o modificador n para simulação de defeitos entre espiras no circuito.

A chave utilizada para o fechamento do surto foi considerada ideal, para fins de simulação. No circuito de simulação o capacitor já inicia carregado com a tensão de surto, não contendo os passos de carga e de aplicação do impulso pela chave, apresentando somente a resposta natural do circuito no instante seguinte ao início da simulação. Na prática, o fechamento do surto é realizado por um IGBT, o que pode agregar perdas no chaveamento e uma resistência de canal não nula.

As formas de onda geradas na simulação foram exportadas para uma base de dados de ensaios, onde foi possível importá-la em um software para realizar as análises nas ferramentas de avaliação do ensaio e realizar as comparações com outras formas de onda obtidas nas demais simulações e experimentos.

O software para as avaliações das formas de ondas foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação *Python*, por sua versatilidade e amplo uso como linguagem de programação *Open Source*. Com o uso do *Python*, foram desenvolvidas funções para carregar uma ou mais formas de onda, realizar o alinhamento das mesmas conforme o ponto de disparo, ou seja, o

Figura 18 – Circuito simulado no ambiente *PSIM*

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

ponto em que ocorre a aplicação do surto, obter a área e a frequência dessas formas de onda e, por fim, realizar a comparação entre elas utilizando as ferramentas de avaliação do ensaio de surto de tensão, conforme abordado na subseção 2.2.3, pelo desvio nas passagens por zero das formas de onda comparadas e pelo erro na razão das áreas (EAR), conforme equação (2).

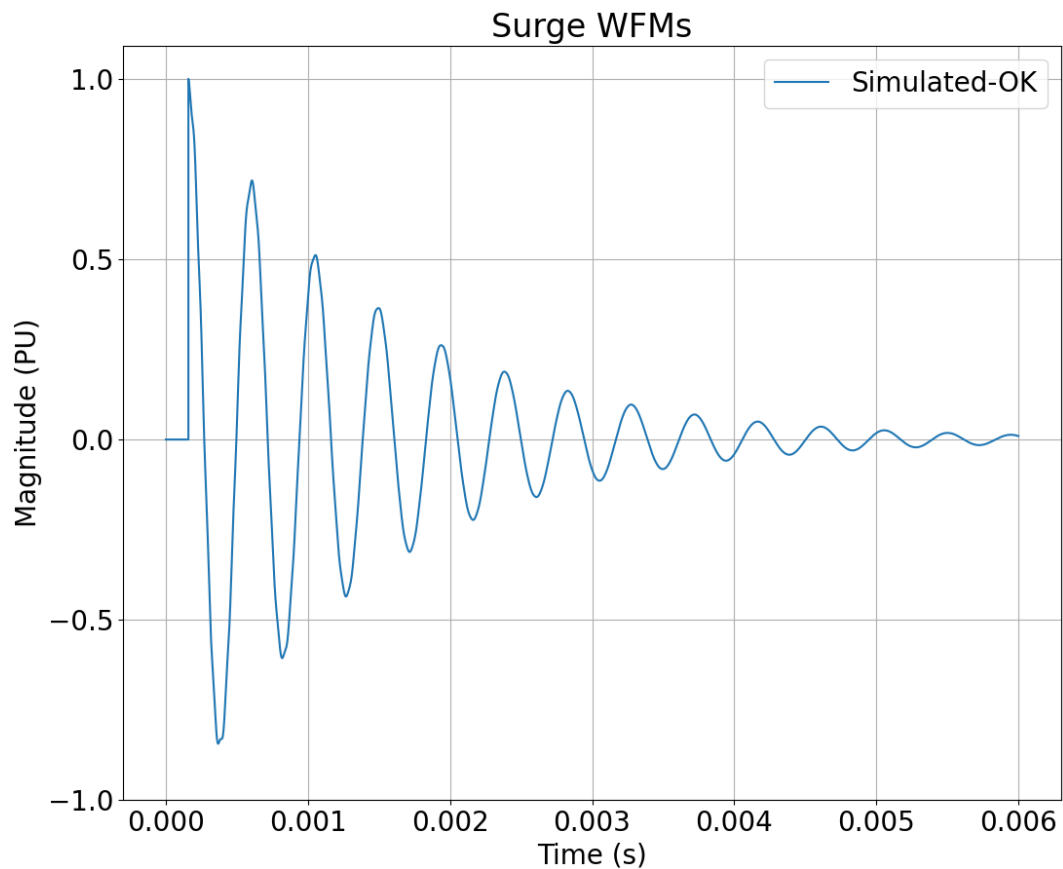
4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Para a simulação do estator saudável, ou seja, apresentando a quantidade nominal de espiras, foi utilizado o circuito de simulação da Figura 18 e os valores nominais dos componentes, conforme calculado e mostrado na Tabela 3. Sendo esta a simulação de um estator saudável, o valor de n foi considerado igual a zero, conforme modificadores mostrados na seção 3.4.

A Figura 19 mostra a forma de onda obtida na simulação. O eixo Y apresenta a magnitude da tensão normalizada no valor base de 2.000 V, em p.u., e o eixo X apresenta o tempo de surto, em segundos. Verifica-se o comportamento comum das ondas do ensaio, iniciando com a tensão de surto na tensão de carga do capacitor e apresentando um comportamento subamortecido, atenuando a onda senoidalmente, conforme a resposta natural do circuito RLC.

Após o impulso, a forma de onda apresenta uma frequência de aproximadamente 2,22

Figura 19 – Forma de onda simulada de um estator saudável



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

kHz, uma área de aproximadamente 1,68 Vs, amortecendo até aproximadamente 1,0% da tensão ao final da janela de amostragem utilizada, de 6 ms. Os valores apresentados são condizentes com o esperado para estatores de menor potência, como é o caso do estator simulado, de 1/3 kW.

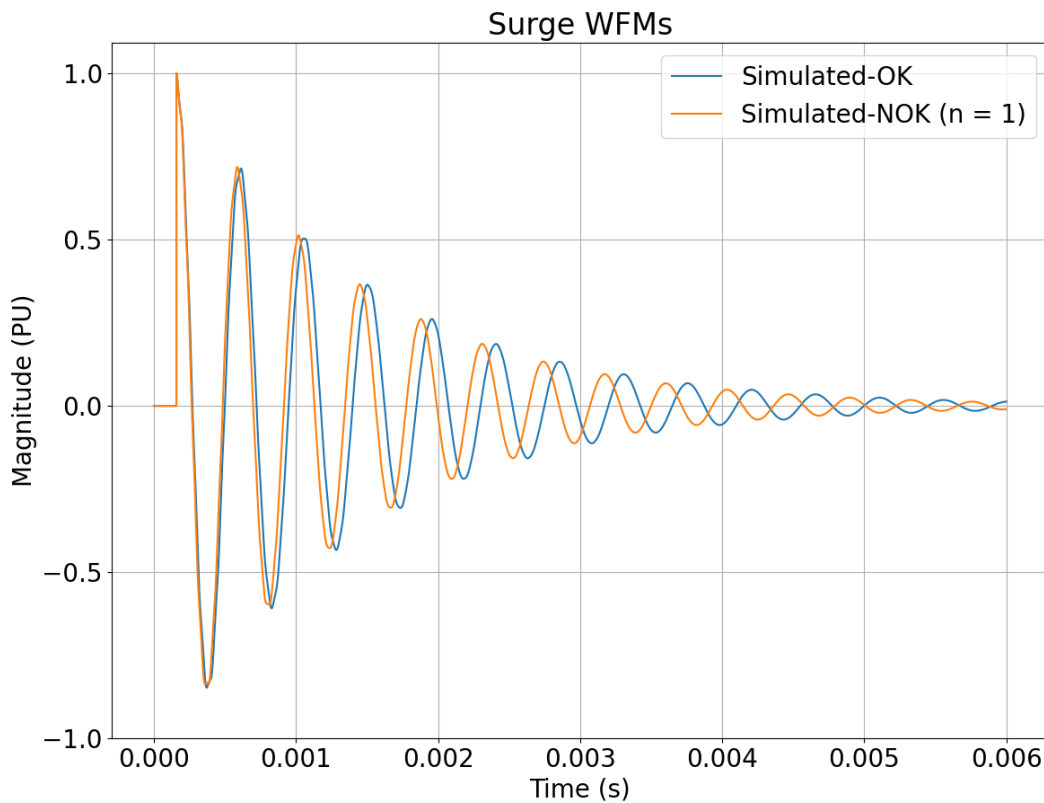
Para a simulação do estator com defeito foi utilizado o mesmo circuito, porém com variação no valor de n . Para a comparação com os resultados práticos posteriormente, foram executadas as simulações do mesmo estator com uma espira a menos ($n = 1$) e uma espira a mais ($n = -1$).

A Figura 20 apresenta a forma de onda simulada de um estator com defeito de uma espira a menos sobre a forma de onda do estator saudável, apresentada anteriormente. Como pode ser observado, a diminuição de uma espira causa uma diminuição na indutância total da fase, o que causa um aumento na frequência de resposta, contraindo a forma de onda em comparação a forma de onda simulada de um estator saudável.

Na análise dos parâmetros da onda e nas ferramentas de avaliação do ensaio de surto de tensão verifica-se um aumento da frequência para aproximadamente 2,32 kHz e uma diminuição

na área, o que leva a um valor de EAR de aproximadamente 4,01% e uma diferença de frequência de aproximadamente 3,37%.

Figura 20 – Formas de onda de um estator saudável comparada à forma de onda do estator com uma espira a menos



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

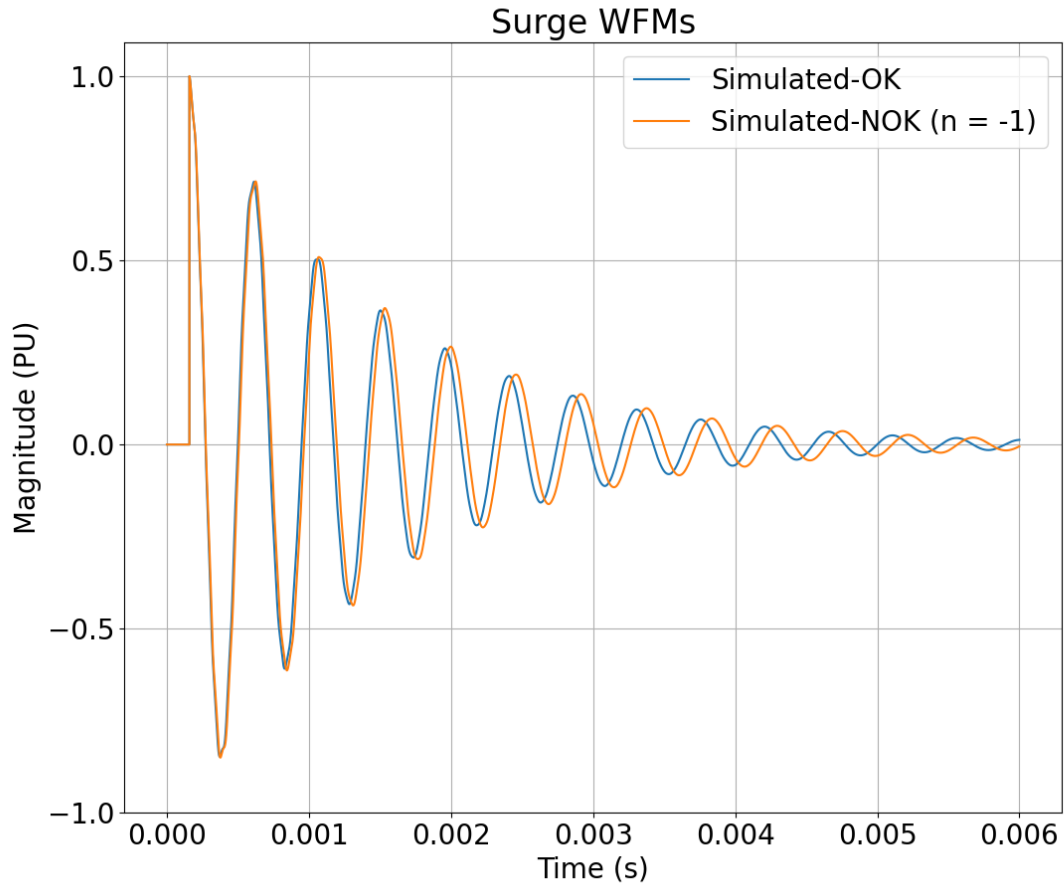
Simulando também a condição $n = -1$, ou seja, o caso em que o estator foi fabricado com uma espira a mais, verifica-se o comportamento oposto da forma de onda, a qual dilata em comparação à onda saudável, como é possível verificar na Figura 21.

Com a dilatação da forma de onda ocorre uma redução na frequência, apresentando um valor de 2,17 kHz, e também em um aumento da área, comportamento esperado pelo aumento da indutância da fase. Analisando com as ferramentas de avaliação do ensaio de surto de tensão, observa-se um EAR de aproximadamente 3,40% e um ZCP de 3,15%.

Apesar da variação de espiras para uma quantidade maior que o nominal seja um defeito incomum, ainda é de interesse da análise, já que o defeito pode ocorrer no processo de fabricação, durante a bobinagem do estator, causando desequilíbrio das fases.

Além disso, em estatores de menor potência, que apresentam resistências mais elevadas, a variação no valor da resistência causada pela variação no número de espiras pode não ser suficiente para a detecção do defeito prematuramente no processo produtivo, o que torna os

Figura 21 – Formas de onda de um estator saudável comparada à forma de onda do estator com uma espira a mais



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

resultados obtidos no ensaio de surto de tensão uma ferramenta valiosa na análise da qualidade do processo de bobinagem.

Ambos os defeitos foram simulados e avaliados pelas ferramentas de avaliação do ensaio, apresentando resultados abaixo de 5%, conforme resumido na Tabela 4. Avaliando-se a variação da resistência CC do circuito é possível observar uma variação de aproximadamente 3,2% com a variação de uma espira, valor que, dependendo dos parâmetros de tolerância utilizados pelo fabricante, pode não ser suficiente para detecção do defeito ainda no processo de bobinagem.

Esses resultados já demonstram parcialmente que, para determinados estatores, os valores médios usuais de tolerância de ensaio de 10% podem estar sobre-dimensionados, podendo-se aprovar estatores defeituosos. Porém, ainda é necessária a comprovação dos resultados de simulação através de experimentos.

Tabela 4 – Resultados nas ferramentas de avaliação do ensaio de surto de tensão para as formas de onda obtidas na simulação

Condição	Ferramenta	Resultado
OK ($n = 0$)	EAR (<i>Error Area Ratio</i>)	0,0%
	ZCP (<i>Zero-Crossing Point</i>)	0,0%
NOK - Espira a menos ($n = 1$)	EAR (<i>Error Area Ratio</i>)	4,01%
	ZCP (<i>Zero-Crossing Point</i>)	3,37%
NOK - Espira a mais ($n = -1$)	EAR (<i>Error Area Ratio</i>)	3,40%
	ZCP (<i>Zero-Crossing Point</i>)	3,15%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3 CENÁRIO DE TESTES E EXPERIMENTOS

A validação dos resultados através de experimentos práticos foi conduzida inteiramente dentro da empresa WEG Equipamentos Elétricos S/A, utilizando os equipamentos, infraestrutura de laboratório e peças para ensaios fornecidos pela empresa.

Para a obtenção dos resultados experimentais foram produzidas 9 peças do estator descrito pelas características de baixa e alta frequência da Tabela 3. Nessas 9 peças foram produzidas as seguintes condições:

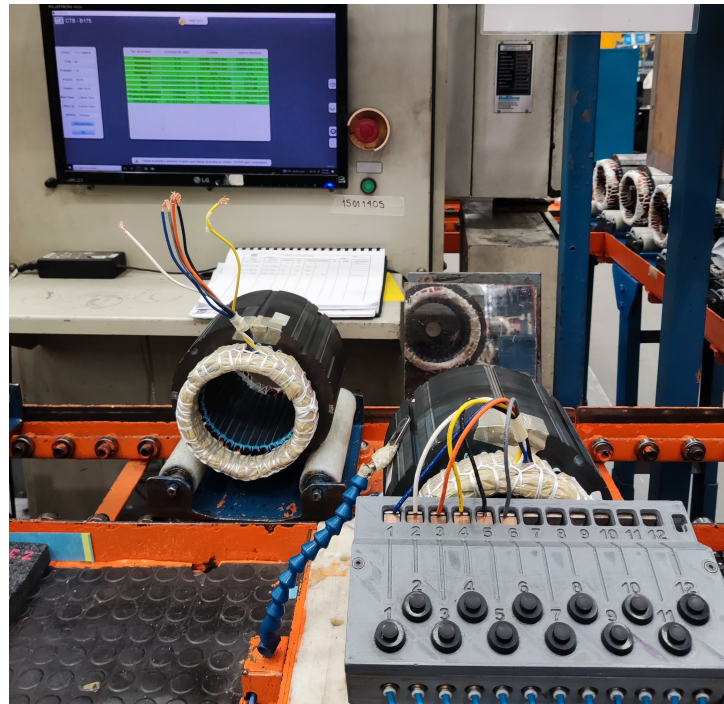
- 3 peças foram produzidas com as características nominais de projeto ($n = 0$);
- 3 peças foram produzidas com uma espira a menos ($n = 1$);
- 3 peças foram produzidas com uma espira a mais ($n = -1$);

Posteriormente, todos os estatores foram levados à Cabine de Testes de Bobinagem, que é responsável por realizar os ensaios de qualidade em estatores bobinados. Nessa cabine foram realizados os ensaios de resistência CC, para avaliação da continuidade e das conexões do estator bobinado; alta tensão aplicada em CA, para avaliação da qualidade da isolamento entre as fases e a carcaça; sentido de rotação, para avaliação das conexões internas e geração do campo magnético girante; e, por fim, o ensaio de surto de tensão.

Os ensaios foram executados de forma completa, ou seja, aplicando todos os ensaios descritos, ao menos uma vez em cada estator, de forma a garantir as características físicas de projeto e a boa qualidade das bobinas e da isolamento entre as fases e a carcaça. Esse procedimento assegurou a qualidade dos estatores saudáveis ou que restasse apenas o defeito de interesse do ensaio nos estatores nos quais foi gerado o defeito entre espiras. A Figura 22 mostra uma foto do cenário de testes, com o estator conectado à Cabine de Testes de Bobinagem.

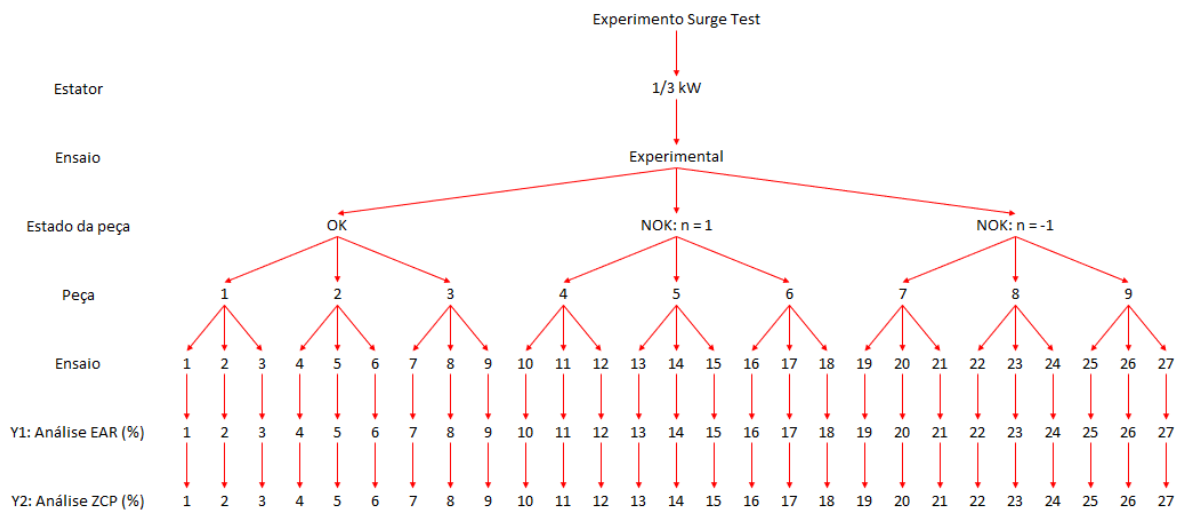
Posteriormente foram executados 3 ensaios de surto em cada estator, obtendo-se as formas de onda de cada aplicação para posterior análise nas ferramentas de avaliação de área, EAR, e de frequência, ZCP. A Figura 23 apresenta a árvore de amostragem utilizada no experimento.

Figura 22 – Estator conectado à Cabine de Testes de Bobinagem durante os ensaios



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S/A

Figura 23 – Árvore de amostragem do experimento realizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O uso de três peças por condição têm o objetivo de obter uma estimativa do desvio padrão do processo de fabricação, que também insere variações nos parâmetros físicos do estator, acarretando em pequenas variações decorrentes do processo de fabricação e, por consequência, incluídas na sua tolerância.

As três medições por peça têm o objetivo de reduzir os sinais indesejáveis intrínsecos do processo experimental e calcular o desvio padrão entre medições sob a mesma condição,

analisando a incerteza de medição do equipamento e das ferramentas de análise.

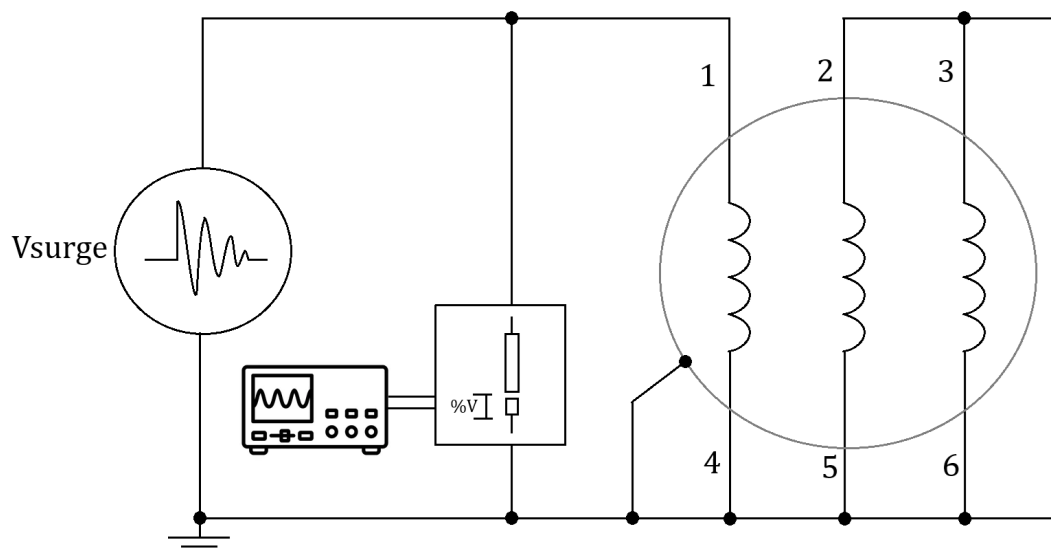
Além disso, com essa quantidade de amostras e medições é também possível detectar erros no ensaio ou causas especiais, como alguma desconexão ou mau contato, ou mesmo configurações erradas, podendo-se comparar os resultados entre amostragens.

O equipamento de testes utilizado para a aplicação do ensaio é um equipamento de aplicação de impulsos de alta tensão desenvolvido e utilizado apenas internamente pela empresa WEG Equipamentos Elétricos S/A. Nele foi possível configurar a tensão de carga do capacitor de surto, ou seja, a tensão de pico do impulso, e a sequência de aplicação, em quais terminais seriam aplicados os impulsos de tensão.

Os estatores tiveram seus 6 cabos conectados diretamente no equipamento, que já realizava automaticamente as conexões necessárias para o ensaio. A carcaça dos estatores permaneceu aterrada durante todo o ensaio e, para cada fase em teste, os cabos não utilizados das demais fases eram também aterrados em um barramento comum.

Ao iniciar-se o ensaio, o equipamento de testes fecha uma das fases do estator bobinado e realiza a aplicação do impulso de tensão no valor configurado. A onda de tensão medida nos terminais do estator é reduzida por um divisor de tensão capacitivo e é então adquirida por uma placa osciloscópica conectada ao computador do ensaio, que a armazena no banco de dados. A Figura 24 exemplifica uma dessas conexões para o teste da bobina 1-4.

Figura 24 – Exemplo das conexões do ensaio para uma das bobinas testadas (1-4).

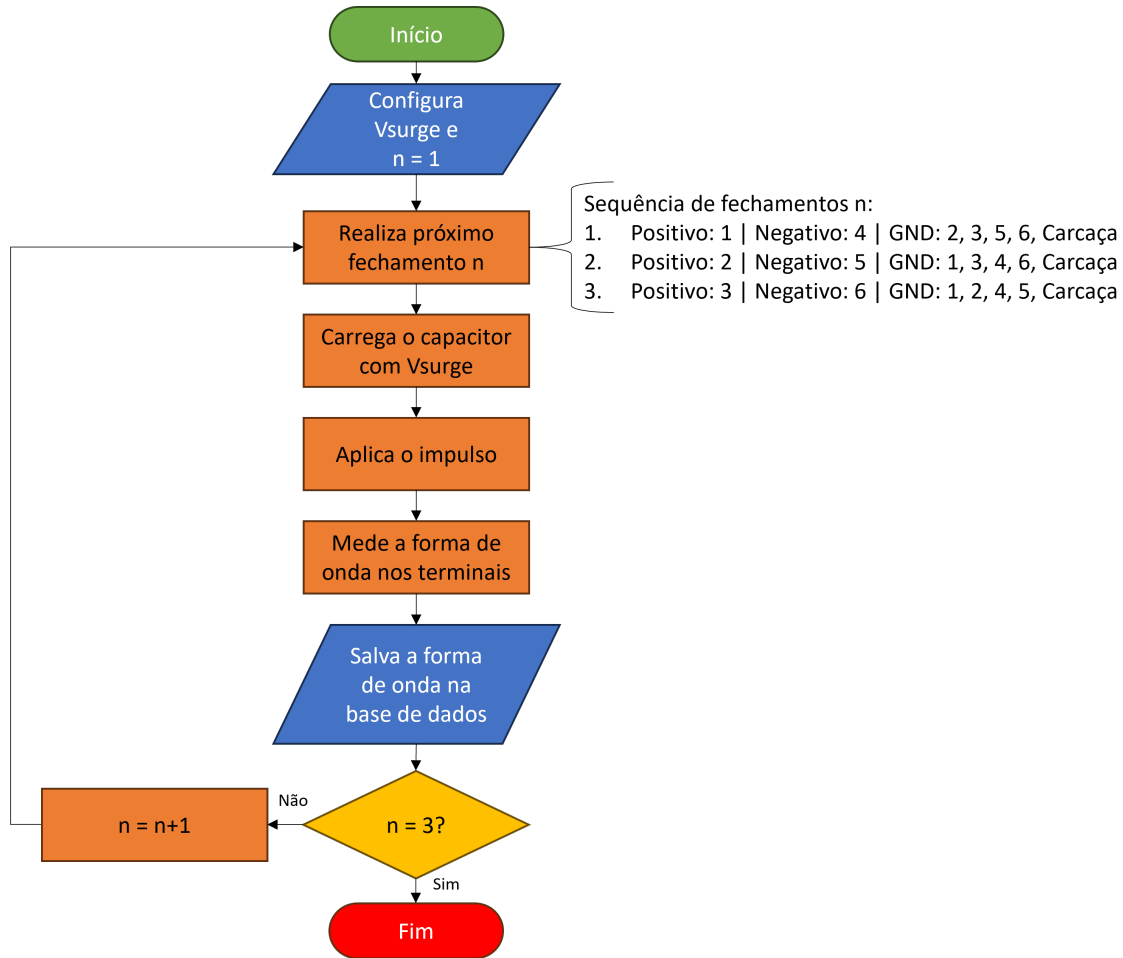


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após isso, o capacitor é descarregado momentaneamente de qualquer tensão remanescente e carregado novamente com a tensão de pico do surto. Enquanto ocorre a carga do capacitor, a conexão atual com o estator é aberta e é realizada a próxima conexão do ensaio, na próxima fase. O fluxograma apresentado na Figura 25 mostra a sequência do ensaio.

As formas de onda são medidas por uma placa osciloscópica Alazartech, modelo ATS9130. A placa recebe o disparo para captura do aplicador de impulsos do ensaio e rea-

Figura 25 – Fluxograma de aplicação do ensaio nos estatores bobinados



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

liza a aquisição de 6 ms de forma de onda a uma taxa de aquisição de 50 MHz, gerando uma forma de onda com 300 mil pontos. Essa forma de onda é então salva no banco de dados em um arquivo TDMS (*Technical Data Management Streaming*).

Um arquivo TDMS é um tipo de arquivo estruturado próprio para salvar dados de medição ao longo do tempo, criado pela fabricante *National Instruments*. Esse arquivo provê uma forma otimizada de salvar uma grande quantidade de dados, separando as aquisições em grupos e canais e guardando algumas propriedades do ensaio para utilização posterior (59).

As formas de onda salvas foram então carregadas pela rotina desenvolvida em *Python*, para aplicação das ferramentas de avaliação do ensaio de surto de tensão, da mesma maneira que foram aplicadas nos dados de simulação, conforme já explicado na seção 4.1.

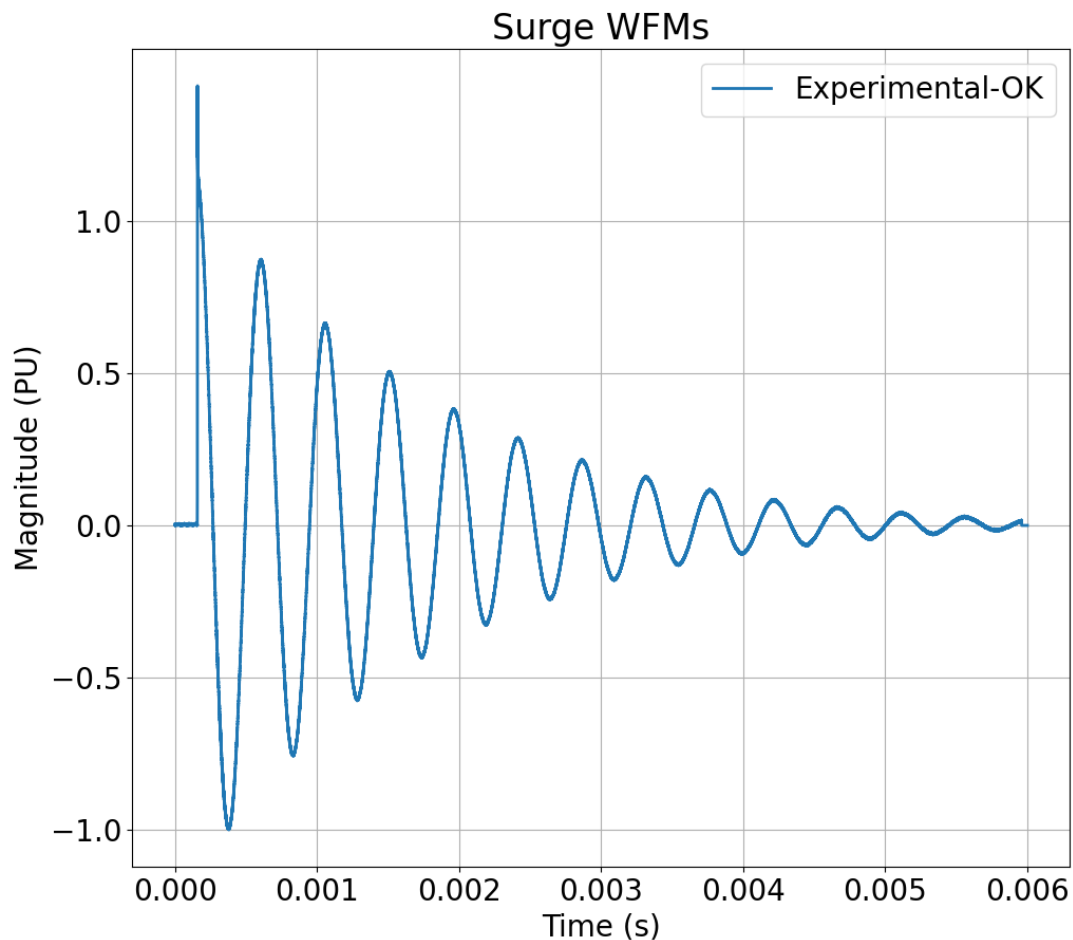
4.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Cada um dos 27 arquivos de medição TDMS com as formas de onda foram carregados no programa de análise e os resultados das ferramentas de avaliação do ensaio de surto de tensão

foram obtidos.

A Figura 26 mostra uma das formas de onda obtidas de forma experimental, para um estator saudável. Durante o momento de disparo do impulso é possível perceber que a tensão medida ultrapassa a tensão de teste (1 p.u. = 2.000 V), o que pode significar um ponto de ressonância ou alguma quebra dielétrica no circuito de chaveamento. A frequência medida foi de aproximadamente 2.218 Hz, o que condiz com os valores observados na simulação, de 2,22 kHz.

Figura 26 – Curvas experimentais de um estator saudável

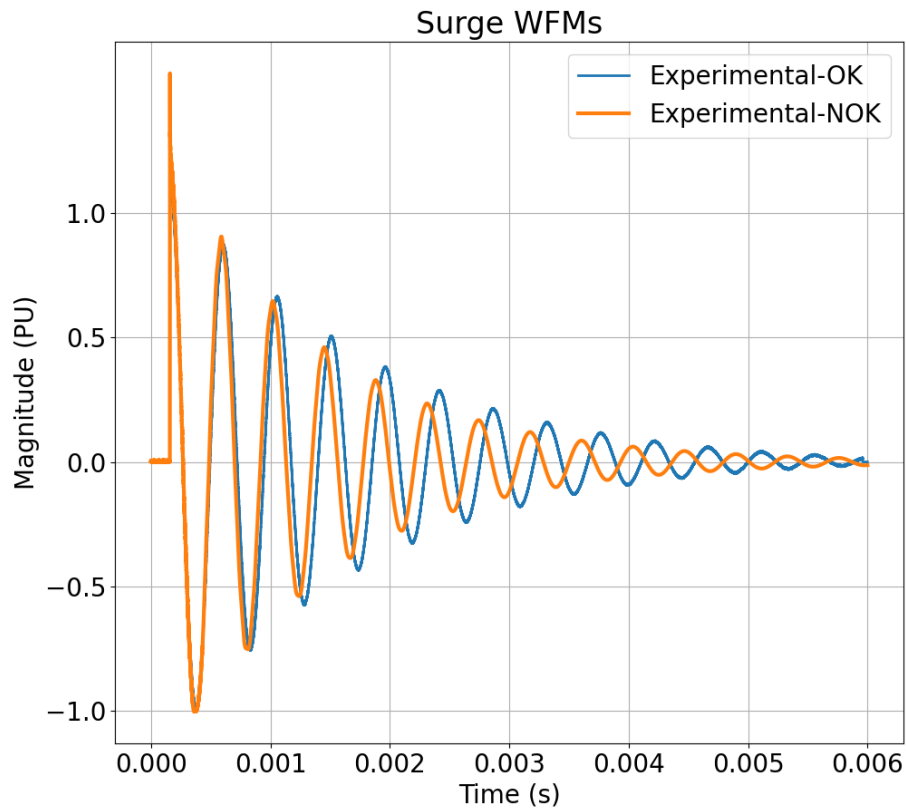


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao realizar-se uma análise visual do comportamento das ondas em um estator com defeito entre espiras comparado com a onda de um estator saudável, conforme Figura 27, verifica-se um comportamento semelhante com o observado na simulação, com a contração da forma de onda do estator com menor número de espiras, mas também com um amortecimento mais acentuado.

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos na análise das formas de onda pelas ferramentas EAR e ZCP. Os resultados mostrados por peça são a média das três medições realizadas em cada

Figura 27 – Curvas experimentais de um estator saudável e com uma espira a menos



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

condição, tanto para a análise das áreas das formas de onda quanto para a análise da frequência.

Tabela 5 – Resultados nas ferramentas de avaliação do ensaio de surto de tensão no experimento

Condição	Peça	EAR médio (%)	ZCP médio (%)
OK ($n = 0$)	1	0,47%	1,55%
	2	0,24%	0,93%
	3	0,26%	1,25%
NOK - Espira a menos ($n = 1$)	4	5,76%	4,15%
	5	5,83%	4,14%
	6	5,25%	4,11%
NOK - Espira a mais ($n = -1$)	7	5,05%	2,09%
	8	5,29%	2,09%
	9	5,17%	2,08%

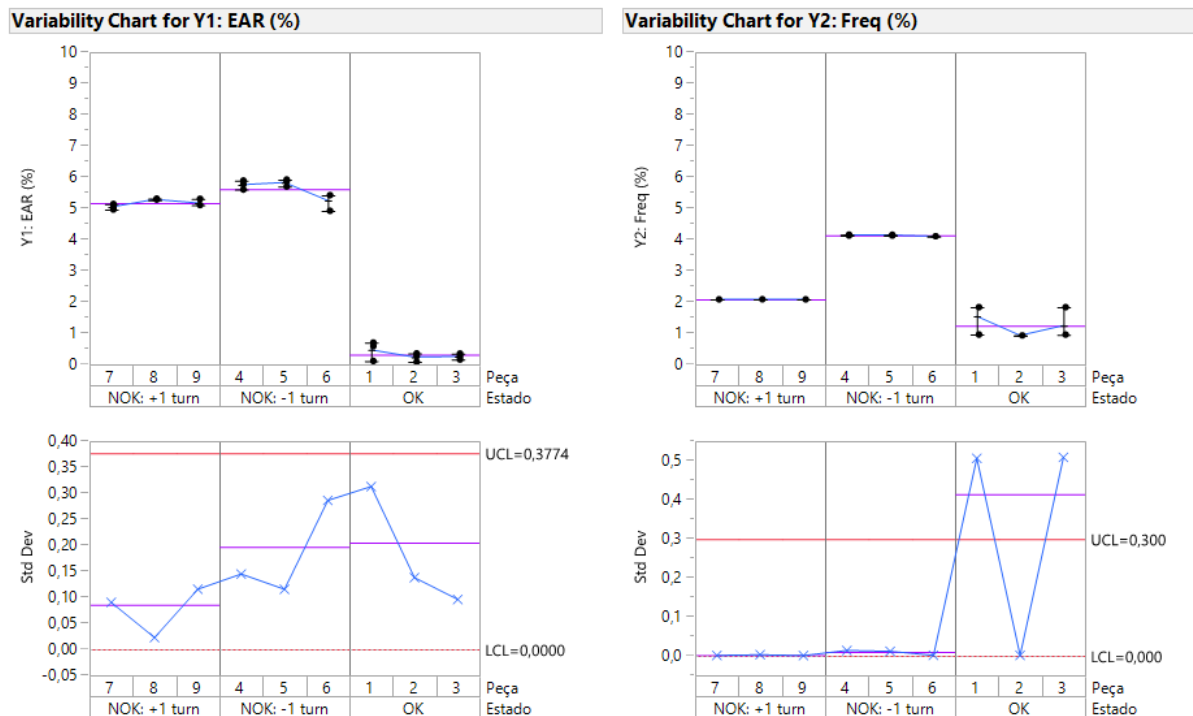
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Idealmente, em um estator saudável, todas as fases serão idênticas e um EAR de aproximadamente 0,00% será obtido. Porém, verifica-se que estatores em condição saudável apresentam um desvio entre as áreas das ondas medidas entre 0,20 e 0,50%, possivelmente pelas variações do processo de bobinagem, incorrendo em pequenas variações entre as bobinas do mesmo estator.

Já para estatores apresentando defeito entre espiras observou-se um aumento considerável do EAR, com uma média de valores entre 5,00 e 6,00% para peças com variação no número de espiras. Para a análise da frequência verifica-se um aumento para um valor entre 2,00 e 4,20%, com uma maior diferença entre os valores para estatores com uma espira a menos e com uma espira a mais.

A Figura 28 mostra graficamente as medições e o desvio padrão observado entre medições e entre peças, gerada através do software de análise estatística JMP. Os dois gráficos superiores dessa figura mostram as medições executadas em uma mesma peça de forma agrupada e também a distribuição das medições entre diferentes peças e diferentes estados. A linha roxa indica o valor médio para o grupo de Estado da peça.

Figura 28 – Gráfico de variabilidade dos resultados experimentais obtidos



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os dois gráficos inferiores da Figura 28 mostram o desvio padrão entre as medições para cada condição e a linha roxa representa a média dos desvios padrão para cada estado das peças.

Analisando as variações do experimento, verifica-se que para o EAR o desvio padrão máximo entre medições para uma mesma peça foi de $\pm 0,31\%$. Com o desvio padrão entre as medições é possível calcular a incerteza de medição do equipamento através de uma distribuição t de Student, comumente utilizada para cálculo da incerteza de equipamentos de medição (60).

Considerando o espaço amostral de 3 amostras por condição e assumindo-se um grau de confiabilidade de 95%, obtém-se um valor $t = 3,1825$ (60). Aplicando esse valor na equação (20) e utilizando-se do maior desvio padrão observado em todas as medições, obtém-se então

uma incerteza de medição u de aproximadamente $\pm 0,98\%$.

$$u = \pm \sigma \cdot t \quad (20)$$

Onde:

- u é a incerteza de medição do processo avaliado;
- σ é o desvio padrão das amostras;
- t é o valor do multiplicador da distribuição de Student.

Aplicando-se o mesmo procedimento para a análise ZCP, verifica-se uma incerteza de medição de aproximadamente $\pm 1,40\%$. Através da análise gráfica dos valores verifica-se que a maior variação ocorreu nas peças saudáveis, possivelmente por erros de discriminação da ferramenta de análise para as ondas que estavam aproximadamente sobrepostas, ou pelo ruído sobre a onda, gerando erros na ferramenta de análise das passagens por zero.

Analizando-se as diferenças entre peças, verifica-se um desvio padrão do processo de bobinagem de aproximadamente $\pm 0,21\%$, por pequenas diferenças comuns ao processo de fabricação.

Apesar da alta incerteza de medição, os resultados experimentais se mostraram coerentes com o esperado para o comportamento das formas de onda em estatores com defeitos entre espiras.

A alta incerteza de medição pode ser atribuída a fugas decorrentes do ensaio de alta tensão, o que pode alterar a composição das formas de onda, principalmente pelo alto amortecimento observado. Como os surtos de tensão foram aplicados sequencialmente, os componentes do circuito de chaveamento que interligam o aplicador de impulsos aos terminais do estator bobinado podem ter sofrido um estresse elevado na sua rigidez dielétrica, gerando as fugas de corrente momentâneas para algumas formas de onda de tensão aplicadas.

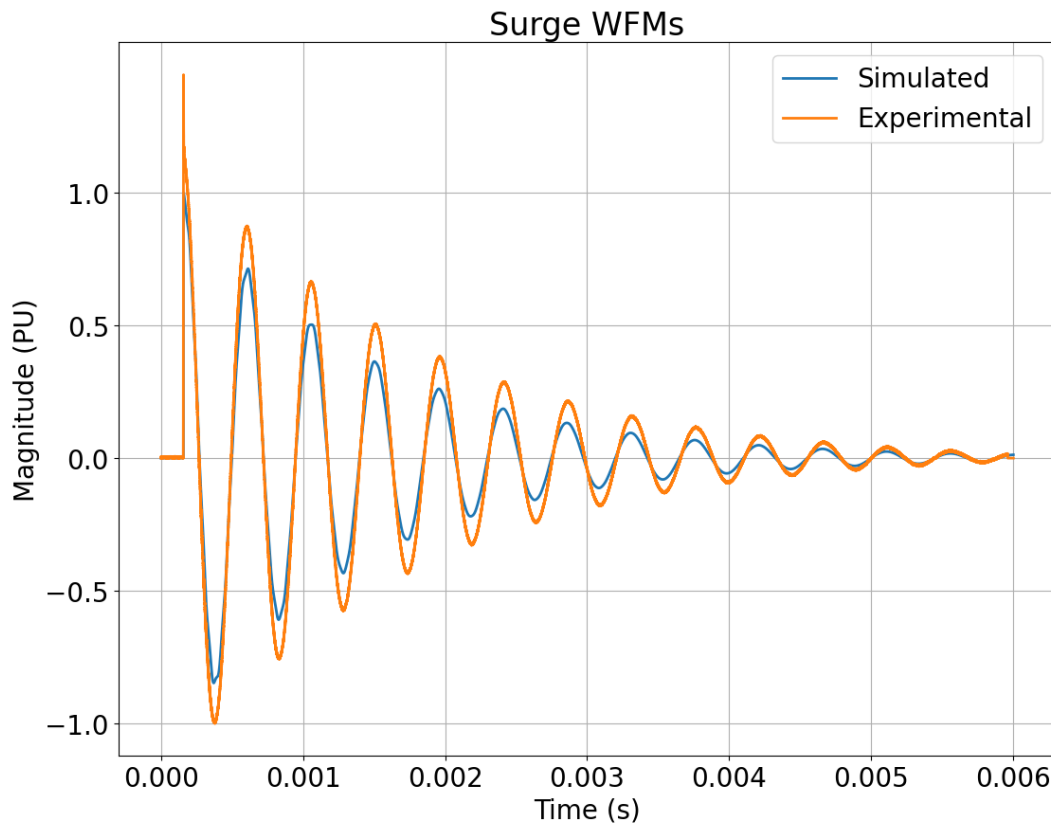
4.5 COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com os resultados experimentais obtidos é possível compará-los com os resultados da simulação e validar o modelo proposto. A Figura 29 apresenta a comparação entre as formas de onda simulada e experimental de um estator saudável, para análise gráfica.

Inicialmente, fazendo uma análise gráfica das formas de onda simuladas e obtidas experimentalmente, é possível verificar uma boa correlação na frequência das ondas, com um desvio percentual de $0,1\%$ entre elas. No entanto, a maior diferença entre as formas de onda está na tensão e no seu amortecimento.

Uma possível explicação para esse comportamento é que, apesar da tensão de surto solicitada nos ensaios ter sido de 2.000 V, foi observada uma tensão de pico durante o surto de

Figura 29 – Comparação entre formas de onda experimental e simulada



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

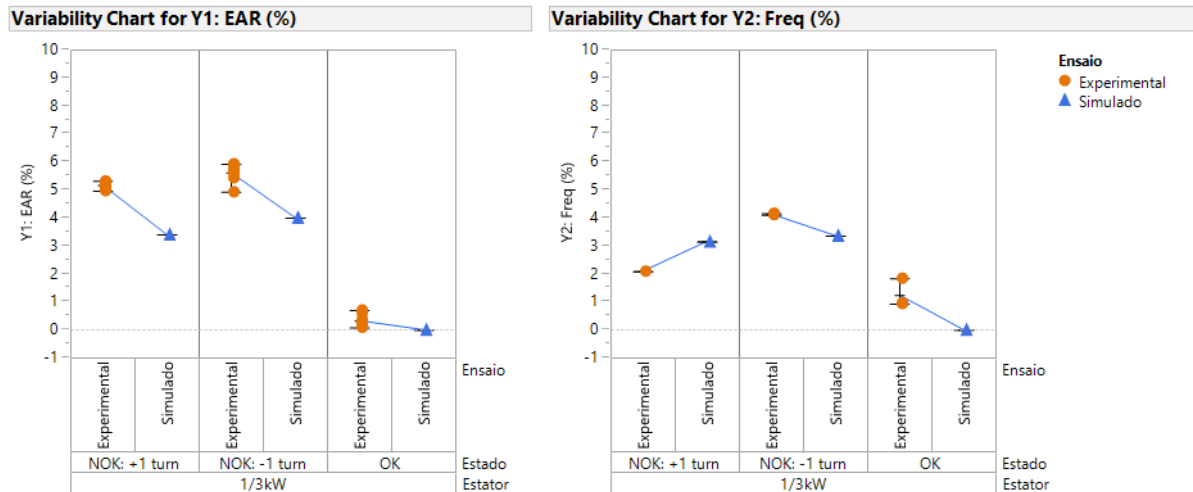
aproximadamente 40% acima da tensão nominal nos terminais do estator. Essa diferença pode se dever a fatores como:

- equipamento de aplicação do surto com a tensão descalibrada;
- erros na conversão de tensão pelo divisor de tensão;
- comprimentos dos cabos entre o equipamento de geração dos impulsos e os terminais da máquina próximo ao comprimento crítico causando um aumento da tensão inicial por reflexões de onda (39).

Além disso, resistências não contabilizadas dos contatos do circuito de chaveamento e de não-idealidades da chave de fechamento do impulso de surto, como perdas no chaveamento, podem modificar o amortecimento da onda. Apesar disso, o comportamento esperado era um amortecimento maior na forma de onda experimental do que na forma de onda simulada, justamente por não-idealidades não consideradas no circuito de simulação.

Por fim, é realizada a comparação dos resultados obtidos nas ferramentas de avaliação do ensaio de surto de tensão para ambos os conjuntos de onda, simulado e real, para os diferentes estados dos estatores em teste, apresentada na Figura 30.

Figura 30 – Comparação entre os resultados experimentais e simulados



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Observando os gráficos, verifica-se que os resultados obtidos na simulação ficaram abaixo dos valores obtidos nos experimentos, apresentando um valor de 1,61% abaixo do valor experimental médio das três peças na condição de "espira a menos" e de 1,77% abaixo do valor experimental médio das três peças na condição de "espira a mais". Essas diferenças estão possivelmente relacionadas às diferenças observadas nos amortecimentos das ondas simulada e experimental, causando uma diferença nas áreas.

Observando agora o gráfico da ferramenta ZCP (Freq), verifica-se um comportamento oposto ao analisar-se as diferenças entre a condição dos estatores com espira a menos e espira a mais, na qual o estator com a espira a menos apresentou uma diferença percentual de 0,77% para menos na simulação e no estator com uma espira a mais houve uma diferença percentual de 1,07% para mais na simulação.

Apesar disso, mesmo errando na proporção percentual, o comportamento verificado nos resultados indica a possibilidade da determinação de uma tolerância mais condizente com a realidade do estator testado, tornando o teste mais confiável na detecção de possíveis defeitos.

4.6 DEFINIÇÃO DA TOLERÂNCIA UTILIZANDO OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Apesar da diferença entre os resultados experimentais e os resultados simulados, ainda é possível avaliar se os resultados simulados seriam efetivos no auxílio à determinação das tolerâncias do ensaio para esse estator. Para isso, serão utilizados os dados de simulação de peças com defeito e os dados experimentais de peças saudáveis.

A utilização de dados simulados para os defeitos e de dados experimentais em peças saudáveis é conveniente para o fabricante das peças que se deseja ensaiar no ensaio de surto de tensão, já que não precisa gerar defeitos experimentalmente e pode reaproveitar as peças saudáveis no processo produtivo.

Assumindo-se que um defeito entre espiras apresentaria em média uma variação de 3,70% na medição do EAR, como visto nos resultados da simulação, para calcular o valor mínimo percentual que indicaria um defeito é necessário diminuir do valor médio os valores experimentais da incerteza de medição e do processo.

Considerando a incerteza de medição verificada na seção 4.4, de $\pm 0,98\%$, tem-se que o percentual mínimo para detecção de uma peça possivelmente com defeito seria de 2,72% (3,70% - 0,98%).

Adicionando também a variação entre peças com um desvio padrão σ de 0,21% e considerando que no processo pode haver a variação de até $\pm 3 \cdot \sigma$, ou seja, três vezes o desvio padrão para cada lado da média, para uma confiabilidade do processo de aproximadamente 99%, obtém-se então o EAR mínimo para detecção de defeito de 2,09% (2,72% - 0,63%).

Portanto, para detecção de defeitos de variação entre espiras, considerando-se a simulação executada e os resultados experimentais das peças boas, os quais foram base para o cálculo das incertezas de medição e do processo, pode-se determinar a tolerância da ferramenta para esse estator como 2,09%, ou seja, valores acima disso podem ser considerados como defeitos detectados no ensaio de surto de tensão.

Avaliando-se os dados experimentais das peças saudáveis, pode-se também verificar se há o risco de o resultado de alguma dessas peças cair dentro da faixa de reprovação, gerando um falso negativo.

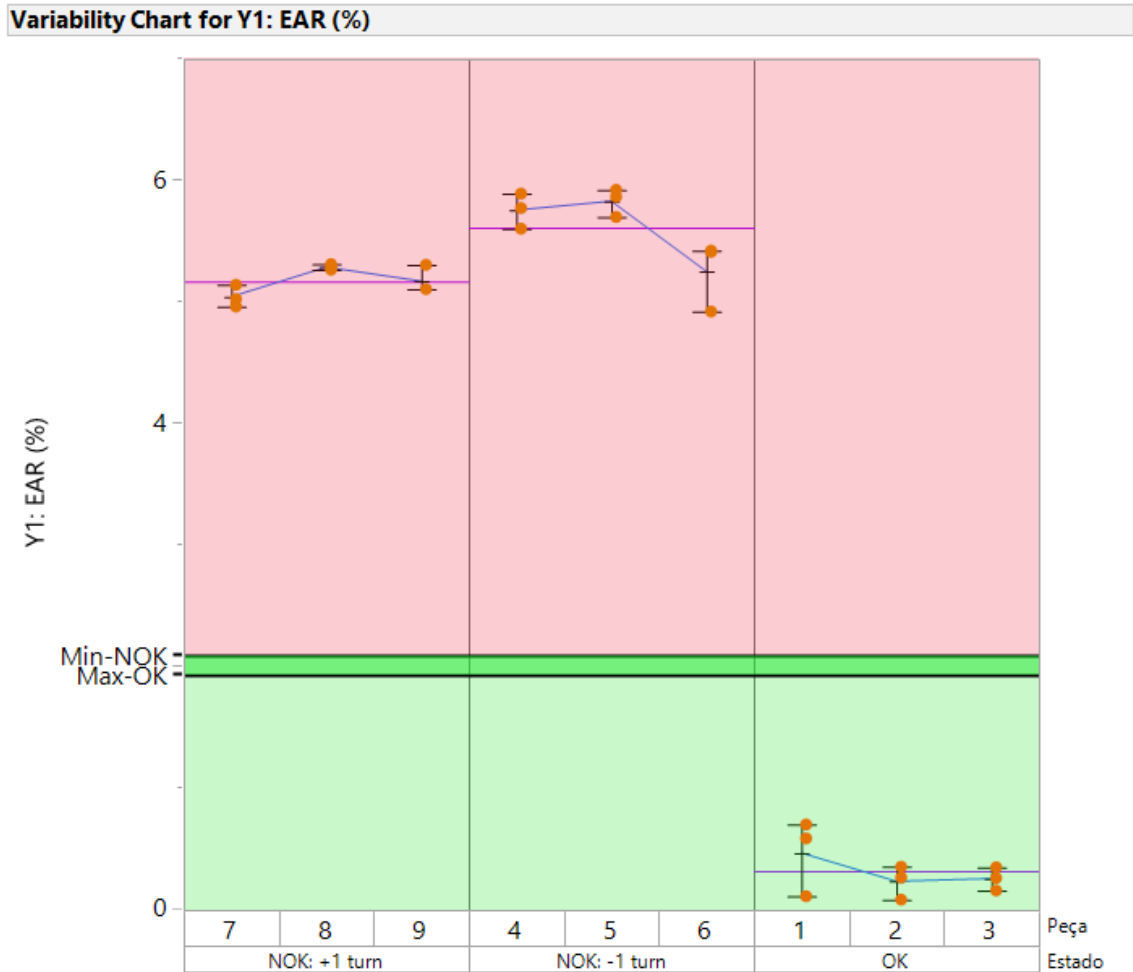
A média do EAR observada nas peças saudáveis foi de 0,32%. Somando-se o valor médio com a incerteza de medição e a incerteza do processo, já descritos anteriormente, verifica-se que podem haver casos em que uma peça saudável pode apresentar até 1,93% de EAR.

Em resumo, na análise realizada, uma peça saudável apresentará um valor de EAR de $0,32\% \pm 1,61\%$ e uma peça com defeito entre espiras apresentará um valor de $3,70\% \pm 1,61\%$. A Figura 31 mostra graficamente as faixas calculadas para peças saudáveis e peças com defeito entre espiras.

No gráfico apresentado, os círculos laranja são os resultados experimentais separados por peça e por condição das peças, a faixa vermelha é a faixa de reprovação, com valores acima de 2,09% (Min-NOK), e a faixa verde é a faixa de aprovação, com valores entre 0,00% e 1,93% (Max-OK). A faixa de valores entre as linhas Max-OK e Min-NOK também é considerada aprovada, já que está abaixo do valor de 2,09% determinado como a tolerância do ensaio, porém, pela distribuição observada nos ensaios, é improvável que medições caiam dentro dessa faixa.

Analizando os resultados, pode-se dizer que, apesar da diferença percentual observada na comparação entre os resultados na seção 4.5, os valores obtidos permitem separar corretamente os resultados experimentais em peças saudáveis e peças com defeito entre espiras.

Figura 31 – Faixas de aprovação e reprovação para o EAR considerando os dados de simulação e desvios obtidos experimentalmente



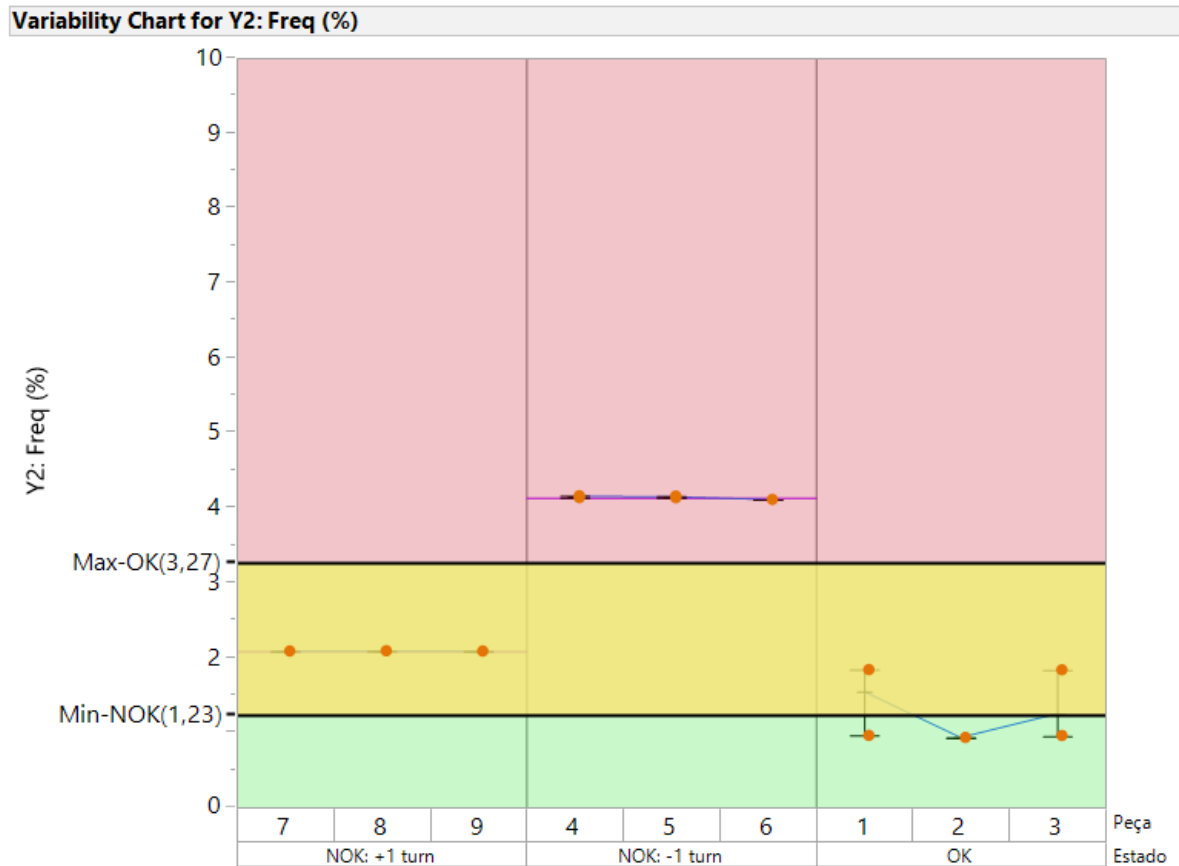
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Realizando a mesma análise de diferenças na frequência, ZCP, a proximidade dos valores de aprovação e reprovação e a grande variação observada nos resultados das peças saudáveis observa-se uma grande faixa de sobreposição entre a faixa aprovada e reprovada das peças, como mostra a Figura 32.

No gráfico em questão, a faixa vermelha corresponde à faixa reprovada, a faixa verde corresponde à faixa aprovada e a faixa amarela é a sobreposição das duas faixas, não sendo possível garantir qual o estado da peça.

É possível verificar que dois ensaios de peças saudáveis e todos os ensaios das peças com uma espira a mais ficam dentro dessa faixa, gerando bastante incerteza ao operador do ensaio. Dessa forma, os resultados obtidos não são adequados para determinação da tolerância de ensaio para a ferramenta de análise das frequências.

Figura 32 – Faixas de aprovação e reprovação para o ZCP considerando os dados de simulação e desvios obtidos experimentalmente



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.7 CONCLUSÃO

Neste capítulo os resultados de simulação e experimentais foram apresentados e comparados, chegando-se ao objetivo final, de estimar a tolerância para o ensaio de surto baseando-se na simulação do circuito proposto.

As formas de onda obtidas na simulação apresentaram um comportamento condizente com o observado na prática, na qual observa-se uma contração da forma de onda com menos espiras, com maior frequência, e uma dilatação da forma de onda com maior número de espiras, em comparação à forma de onda saudável.

Ao sobrepor as formas de onda verifica-se que há uma diferença no amortecimento das ondas, possivelmente por resistências e não-idealidades do circuito de chaveamento não contabilizadas na simulação. Isso levou a uma diferença de aproximadamente 1% quando comparados os resultados simulados e experimentais na ferramenta de análise das áreas, EAR.

Apesar disso, verifica-se que para o EAR a simulação mostrou boa efetividade e, mesmo sob a consideração de espaços de confiabilidade bastante altos para o processo, de aproximadamente 99%, foi capaz de separar corretamente as faixas de aprovação e reprovação para o estator

simulado, podendo ser uma ferramenta válida no auxílio ao operador do ensaio e às equipes de qualidade que necessitam tomar decisões sobre o processo.

Já para a ferramenta de análise das frequências, ZCP, as faixas de aprovação e reprovação determinadas através da simulação e dos resultados experimentais tiveram uma grande área de sobreposição, tornando o procedimento não confiável para a determinação da faixa de tolerância para essa ferramenta de análise.

Contudo, verifica-se que esse comportamento se deve muito ao erro de repetibilidade observado na medição das peças saudáveis, apresentando uma incerteza de medição de mais de 1,40% para medições na mesma condição. Para que seja possível utilizar essa ferramenta em conjunto com o procedimento estabelecido através da simulação é necessário primeiro reduzir a incerteza de medição da ferramenta de análise nos resultados experimentais, de forma a obter uma melhor repetibilidade e, assim, maior confiabilidade nos resultados.

5 CONCLUSÃO

Diante das exigências de mercado por produtos mais robustos e de alta confiabilidade, onde a garantia da qualidade não é mais vendida como um diferencial do produto e sim como uma certeza para o consumidor, ensaios elétricos confiáveis formam um dos pilares fundamentais do processo produtivo.

Entre os ensaios elétricos para garantir a qualidade dos sistemas de isolamento de motores de indução, destaca-se o ensaio de surto de tensão, que tem como principal característica a capacidade de detectar defeitos de isolamento entre espiras, tornando-o um ensaio de alta importância. Porém, apesar disso, a aplicação desse tipo de ensaio é bastante desafiadora, já que a definição dos parâmetros de tolerância do ensaio ainda se mostra bastante complexa, gerando problemas de confiabilidade nos resultados de ensaio e sua interpretação.

Algumas formas de resolver esse problema foram implementadas, como o uso do histórico de ensaios de surto do estator bobinado para determinar uma tolerância baseada na distribuição das amostras, ou o uso de valores padronizados entre 5% e 20%, como sugerido pela maioria dos fabricantes de equipamentos, até que se tenha uma melhor noção do comportamento do estator, mas todas ainda dependem muito da experiência do operador do ensaio e do conhecimento do produto em teste.

Esse trabalho teve por objetivo propor um modelo de simulação que pudesse dar um direcionamento na escolha de tolerâncias dos indicadores usados para classificar os resultados obtidos no ensaio de surto de tensão. Inicialmente, os principais conceitos do ensaio de surto de tensão foram apresentados e um modelo de circuito equivalente de alta frequência para representar o estator foi definido, baseado nos modelos convencionais recentemente utilizados na literatura de análise de máquinas em alta frequência, que é característica ao ensaio.

Um tipo de estator de baixa potência, de 1/3 kW, foi simulado conforme modelo de circuito escolhido e, posteriormente, levado para o ensaio de surto, onde foi possível comparar o modelo com os dados experimentais. Apesar da proximidade nas frequências, com uma diferença de aproximadamente 0,1%, das ondas simuladas e experimentais, uma diferença foi verificada no amortecimento das ondas, o que fez com que houvesse uma diferença de 1 a 2% entre os resultados.

As principais hipóteses para as diferenças verificadas no amortecimento das ondas estão na não consideração de não-idealidades do circuito na simulação, como a influência da chave e dos elementos do circuito de chaveamento das bobinas.

Apesar das diferenças, destaca-se que o uso dos resultados de simulação para determinar a tolerância percentual da comparação das áreas das formas de onda se mostrou efetivo, conseguindo classificar corretamente os dados experimentais entre peças saudáveis e peças com defeito entre espiras.

Destaca-se ainda que o procedimento utilizado fez uso de dados empíricos de peças saudáveis e de dados simulados de peças com defeito, ou seja, ainda mantém parcialmente o uso

dos dados de histórico, como é utilizado atualmente, mas adiciona ao operador do ensaio uma noção de proporcionalidade de quanto um defeito pode representar nos resultados, deixando a interpretação do teste e o diagnóstico de falhas mais confiável.

Entretanto, é importante salientar também que, além dos resultados experimentais do ensaio de surto de tensão, foram necessários experimentos prévios para obtenção do circuito equivalente de simulação, como os ensaios de resposta em frequência das curvas de modo diferencial e de modo comum, algo que não é trivial de se obter, dada a complexidade do equipamento utilizado para essa medição e do tempo para a realização desse tipo de ensaio, mesmo que tenha que ser executado somente uma vez por projeto simulado.

O procedimento proposto generalizado completo é apresentado ao leitor no Apêndice A, onde pode-se verificar o passo-a-passo de todas as medições experimentais e o resumo dos cálculos necessários para se obter resultados semelhantes ao verificado nesse trabalho em outros estatores.

Para a ferramenta de análise das frequências o uso do procedimento para a determinação das tolerâncias foi menos efetivo, por apresentar um desvio padrão de medição muito alto e e ter os resultados das medições aprovadas e reprovadas muito próximos, não sendo possível estabelecer um parâmetro de separação adequado. Dessa forma, conclui-se que o procedimento proposto poderá somente ser aplicado na ferramenta de análise das áreas e que, para que seja possível utilizar na ferramenta da frequência, ainda são necessárias melhorias nas ferramentas de análise de forma a reduzir o desvio padrão observado.

Por fim, apesar de ser possível de utilizar o procedimento proposto para determinar as tolerâncias do ensaio demonstrado nesse trabalho, para que se possa concluir com maior confiança que o procedimento é adequado, replicável e generalizável, ainda são necessários testes com um maior número de estatores de modelos diferentes, gerando um melhor espaço amostral para comprovar a efetividade da ferramenta.

Com os resultados obtidos e apresentados, é possível concluir que o uso de um circuito de simulação do ensaio de surto pode ser uma ferramenta efetiva na melhora da confiabilidade do ensaio, dando melhores parâmetros de comparação ao operador, mas que ainda se fazem necessários mais ensaios em diferentes modelos de estatores para que a abrangência da ferramenta seja validada, tornando-a um possível padrão do ensaio na indústria.

5.1 DISCUSSÕES SOBRE TOLERÂNCIAS DE ENSAIO

Apesar dos erros observados entre os resultados experimentais e simulados, e da necessidade de maior abrangência de experimentos para se determinar se a ferramenta proposta pode ser aplicada com efetividade, pode-se trazer à tona algumas discussões sobre os resultados obtidos em termos de sistemas de ensaio para garantia da qualidade.

Um dos pontos a se chamar a atenção é o desvio padrão observado no ensaio e sua incerteza calculada de aproximadamente 1%. Em sistemas de medição, uma regra geral é que

o sistema de medição deve apresentar um desvio padrão 3 vezes menor que a tolerância do processo a ser verificado, pelo menos, de forma a se adequar com a curva de distribuição normal, com 3 desvios padrão para cada lado da média do processo.

Sendo assim, o menor desvio que poderia ser verificado através do ensaio de surto de tensão é de 3% para as amostras obtidas. Quando se verificam estatores de maior porte, com menor número de espiras, a observação na prática é que a variação gerada pelo ensaio ao detectar defeitos entre espiras é mais proeminente, muitas vezes apresentando mais de 20% de variação.

Já para estatores de menor porte, com carcaças até 132, com alto número de espiras, essa variação pode ficar dentro do erro do próprio equipamento, o que gera um questionamento sobre a capacidade do ensaio de detectar defeitos nesses tipos de estator bobinado. Nesses casos, um modelo de simulação mais preciso também pode trazer um entendimento sobre a severidade da falha que é possível de se detectar e que tipos de cuidado são necessários ao testar esse tipo de estator.

Isso demonstra a importância da continuidade do trabalho em relação aos resultados de ensaio e suas tolerâncias, não só de melhorar a precisão do modelo de simulação proposto, mas também de um trabalho focado em diminuir os erros de medição, aumentando a confiabilidade do ensaio como um todo.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Diante das conclusões apresentadas, fica claro que para a validação completa do procedimento proposto é necessária a continuação do trabalho em uma maior abrangência amostral, para verificar se o modelo é capaz de generalizar os resultados.

Além disso, é também de interesse refinar o circuito sugerido de forma a aproximar ainda mais os resultados simulados e experimentais. Considerando esses pontos, sugerem-se os seguintes temas de pesquisa:

- realizar o mesmo procedimento com outros modelos de estator, aumentando o espaço amostral e inserindo novas variáveis, como diferentes conexões entre os grupos de bobinas, diferente número de espiras e diferentes tamanhos de estator;
- estudar mais características experimentais que podem ser trazidas para o modelo, como resistências e indutâncias não consideradas, de forma a tentar aproximar mais as curvas experimentais e simuladas;
- estudar as componentes de variação que compõem o erro das ferramentas de análise, de forma a tentar reduzir os erros de medição. Uma sugestão seria estabelecer janelas de análise, ao invés de avaliar a onda inteira, eliminando alguns erros mais próximos ao ponto de disparo.

Esses três tópicos podem ser trabalhados em conjunto para a diminuição dos erros de medição e de análise, de forma a tornar o procedimento de determinação de tolerâncias para o ensaio de surto de tensão algo mais objetivo e confiável.

REFERÊNCIAS

- 1 KUMAR, S. et al. A comprehensive review of condition based prognostic maintenance (cbpm) for induction motor. *IEEE Access*, v. 7, p. 90690–90704, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 19.
- 2 RANGEL-MAGDALENO, J. de J. Induction machines fault detection: An overview. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v. 24, n. 7, p. 63–71, 2021. Citado na página 15.
- 3 FERREIRA, F. J. T. E.; BAOMING, G.; ALMEIDA, A. T. de. Reliability and operation of high-efficiency induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 52, n. 6, p. 4628–4637, 2016. Citado na página 15.
- 4 JIGYASU, R. et al. A review of condition monitoring and fault diagnosis methods for induction motor. In: *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1713–1721. Citado na página 15.
- 5 HUSACH, S.; YATSIUK, R.; MAMCHUR, D. Induction motors operation condition evaluation and damage degree estimation methods. In: *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4. Citado na página 15.
- 6 ALMOUNAJJED, A. et al. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor - an experimental analysis. In: *2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 433–438. Citado na página 15.
- 7 RAJAPAKSHA, N. et al. Supervised machine learning algorithm selection for condition monitoring of induction motors. In: *2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–10. Citado na página 15.
- 8 CHANG, S.-T. et al. Lifetime prediction for bearings in induction motor. In: *2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 467–471. Citado na página 15.
- 9 HUSACH, S.; YATSIUK, R.; MAMCHUR, D. Induction motors condition monitoring and lifetime estimation system. In: *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 34–37. Citado na página 15.
- 10 HUSACH, S. Python-based induction motors monitoring and lifetime estimation system. In: *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–4. Citado na página 15.
- 11 BONNETT, A. H. Root cause methodology for induction motors: A step-by-step guide to examining failure. *IEEE Industry Applications Magazine*, v. 18, n. 6, p. 50–62, 2012. Citado na página 15.
- 12 GUPTA, B. K. et al. Turn insulation capability of large ac motors. part 1 - surge monitoring. *IEEE Power Engineering Review*, PER-7, n. 12, p. 42–42, 1987. Citado na página 15.
- 13 DUDKIN, N.; LEONOV, A.; MARYIN, S. Through defect development in interturn insulation of low voltage windings of electric machines. In: *Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists. Modern Techniques and Technology. MTT'2001 (Cat. No.01EX412)*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 122–124. Citado na página 15.

- 14 IEEE Guide for Insulation Maintenance of Electric Machines. *IEEE Std 56-2016*, p. 1–86, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 15, 22 e 23.
- 15 KUMAR, K. et al. High voltage motor current switching tests: It's motive and evaluation. In: *2023 International Conference on Power, Instrumentation, Energy and Control (PIECON)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–6. Citado na página 15.
- 16 GRUBIC, S. et al. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 12, p. 4127–4136, 2008. Citado na página 16.
- 17 RYLANDER, J. L. A high-frequency voltage test for insulation of rotating electrical apparatus. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, XLV, p. 459–465, 1926. Citado na página 16.
- 18 FOUST, C. M.; ROHATS, N. Insulation testing of electric windings. *Electrical Engineering*, v. 62, n. 4, p. 203–206, 1943. Citado na página 16.
- 19 GRUBIC, S. et al. A new concept for online surge testing for the detection of winding insulation deterioration in low-voltage induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 47, n. 5, p. 2051–2058, 2011. Citado na página 16.
- 20 RUMI, A. et al. Insights into the definition of converter surge rise time and its influence on turn/turn electrical stress. In: *2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 272–276. Citado na página 16.
- 21 GUPTA, B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines. In: *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No.03CH37480)*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 459–462. Citado na página 16.
- 22 KIM, H. et al. Experience with stator insulation testing and turn/phase insulation failures in the power generation industry. In: *2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 21–30. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 23.
- 23 STONE, G. C.; CULBERT, I. Partial discharge testing of random wound stators during short risetime voltage surges. In: *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 188–191. Citado na página 16.
- 24 KIKUCHI, Y. et al. Recent progress in round-robin test of repetitive partial discharge inception voltage measurements on complete winding of 4 kw random-wound motor. In: *2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*. [S.l.: s.n.], 2017. v. 1, p. 159–162. Citado na página 16.
- 25 LUSUARDI, L. et al. The impact of test voltage waveform in determining the repetitive partial discharge inception voltage of type i turn/turn insulation used in inverter-fed induction motors. In: *2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado na página 16.
- 26 LEE, S. B. et al. Surge test-based identification of stator insulation component with partial discharge activity for low voltage ac motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 56, n. 3, p. 2541–2549, 2020. Citado na página 16.

- 27 NEMA. *ANSI/NEMA MG 1-2021: Motors and Generators*. [S.l.]: NEMA, 2021. (NEMA standards publication). Citado 7 vezes nas páginas 17, 20, 21, 23, 25, 26 e 31.
- 28 AWA Surge Test Pass/Fail Criteria. [S.l.], 2013. Citado 4 vezes nas páginas 17, 29, 30 e 31.
- 29 BECK, J.; TORVIK, K. *Surge Test Values and Diagnostics for ITIG II*. [S.l.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 31.
- 30 HOWELL, M. *Surge testing and Error Area Ratio (EAR) basics*. [S.l.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 31.
- 31 RUNCOS, F. *Projeto e Análise da Máquina Elétrica Trifásica: Aspectos Construtivos*. [S.l.]: WEG, 2018. ISBN 9788567657066. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 24.
- 32 HEMMATI, R.; WU, F.; EL-REFAIE, A. Survey of insulation systems in electrical machines. In: *2019 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 2069–2076. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- 33 IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery. *IEEE Std 43-2013 (Revision of IEEE Std 43-2000)*, p. 1–37, 2014. Citado na página 20.
- 34 IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage. *IEEE Std 95-2002 (Revision of IEEE Std 95-1977)*, p. 1–56, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 22.
- 35 GRUBIC, S. et al. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 12, p. 4127–4136, 2008. Citado na página 23.
- 36 ASFANI, D. A. et al. Evaluation of rotor position effect on stator diagnostic based on surge voltage test. In: *2017 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 164–168. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 44.
- 37 IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines. *IEEE Std 522-2004 (Revision of IEEE Std 522-1992)*, p. 1–28, 2004. Citado 5 vezes nas páginas 24, 25, 26, 27 e 29.
- 38 GUPTA, B.; SHARMA, D.; BACVAROV, D. Measured propagation of surges in the winding of a large a-c motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, EC-1, n. 1, p. 122–129, 1986. Citado na página 24.
- 39 MELFI, M. et al. Effect of surge voltage risetime on the insulation of low-voltage machines fed by pwm converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 34, n. 4, p. 766–775, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 64.
- 40 ROTATING electrical machines – Part 15: Impulse voltage withstand levels of form-wound stator coils for rotating. *IEC 60034-15:2009*, v. 2009-03, p. 1–26, 2009. Citado na página 27.
- 41 MOSES, G. L.; HARTER, E. F. Winding-fault detection and location by surge-comparison testing. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 64, n. 7, p. 499–503, 1945. Citado na página 27.

- 42 GRUBIC, S. et al. Sensitivity analysis of the surge test applied to ac machines. In: *2011 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 618–623. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- 43 GRUBIC, S. et al. Experimental emulation of stator turn insulation breakdown during a surge test. In: *2011 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 498–503. Citado na página 29.
- 44 SU, C. Q. *Electromagnetic transients in transformer and rotating machine windings*. [S.l.]: IGI Global, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 44.
- 45 SUNDEEP, S.; WANG, J.; GRIFFO, A. Prediction of transient voltage distribution in inverter-fed stator winding, considering mutual couplings in time domain. In: *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 517–524. Citado na página 33.
- 46 RUIZ-SARRIÓ, J. E. et al. High-frequency modelling of electrical machine windings using numerical methods. In: *2021 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–7. Citado na página 33.
- 47 MIRAFZAL, B. et al. Universal induction motor model with low-to-high frequency-response characteristics. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 43, n. 5, p. 1233–1246, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- 48 IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. *IEEE Std 112-2017 (Revision of IEEE Std 112-2004)*, p. 1–115, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 38.
- 49 MIRAFZAL, B.; SKIBINSKI, G. L.; TALLAM, R. M. Determination of parameters in the universal induction motor model. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 45, n. 1, p. 142–151, 2009. Citado 9 vezes nas páginas 34, 35, 38, 41, 42, 43, 44, 45 e 81.
- 50 RYU, Y.; PARK, B.-R.; HAN, K. J. Estimation of high-frequency parameters of ac machine from transmission line model. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 51, n. 3, p. 1–4, 2015. Citado na página 35.
- 51 DEVI, N. R.; SARMA, D. V. S. S. S.; RAO, P. V. R. Diagnosis and classification of stator winding insulation faults on a three-phase induction motor using wavelet and mnn. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 23, n. 5, p. 2543–2555, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- 52 RAY, S.; CHAKRABORTY, T.; CHAUDHURI, J. A comprehensive model of induction motor for emulating different electrical faults. In: *2018 IEEE Applied Signal Processing Conference (ASPCON)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 283–287. Citado 5 vezes nas páginas 36, 37, 40, 47 e 49.
- 53 HOFFMANN, A.; PONICK, B. Statistical deviation of high-frequency lumped model parameters for stator windings in three-phase electrical machines. In: *2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 85–90. Citado na página 37.
- 54 FAN, F. et al. Impact of motor stator winding faults on motor differential-mode impedance and mode transformation. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, v. 8, n. 3, p. 12–21, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 47.

- 55 ASFANI, D. A. et al. Methods to determine the stator inter-turn short circuit in an induction motor with installed rotor. In: *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 7–13. Citado na página 44.
- 56 SURESH, G. et al. Predicting the transient effects of pwm voltage waveform on the stator windings of random wound induction motors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 14, n. 1, p. 23–30, 1999. Citado na página 44.
- 57 MAGDUN, O.; BINDER, A. High-frequency induction machine modeling for common mode current and bearing voltage calculation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 50, n. 3, p. 1780–1790, 2014. Citado na página 44.
- 58 RUNCOS, F. *Projeto e Análise da Máquina Elétrica Trifásica: Harmônicas do Campo Girante e Parâmetros Físicos*. [S.l.]: WEG, 2018. ISBN 9788567657073. Citado 3 vezes nas páginas 47, 48 e 49.
- 59 INSTRUMENTS, N. *NI TDMS File Format - What is a TDMS File?* 2023. Disponível em: <<https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/06/the-ni-tdms-file-format.html>>. Citado na página 59.
- 60 PIACENTINI, J. et al. *Introdução ao laboratório de física*. [S.l.]: Ed. da UFSC, 2015. Citado na página 62.

APÊNDICE A – PROCEDIMENTO GENERALIZADO PARA DEFINIÇÃO DA TOLERÂNCIA

Para auxílio ao leitor, essa seção apresenta o procedimento proposto de definição das tolerâncias de ensaio, de forma a resumir o passo a passo sugerido e analisado no texto da dissertação.

Inicialmente, é recomendado que ao menos 3 peças saudáveis do estator sejam fabricadas para a realização dos experimentos, de forma a reduzir o erro experimental e ter um mínimo espaço amostral para definição de desvios padrão de processo.

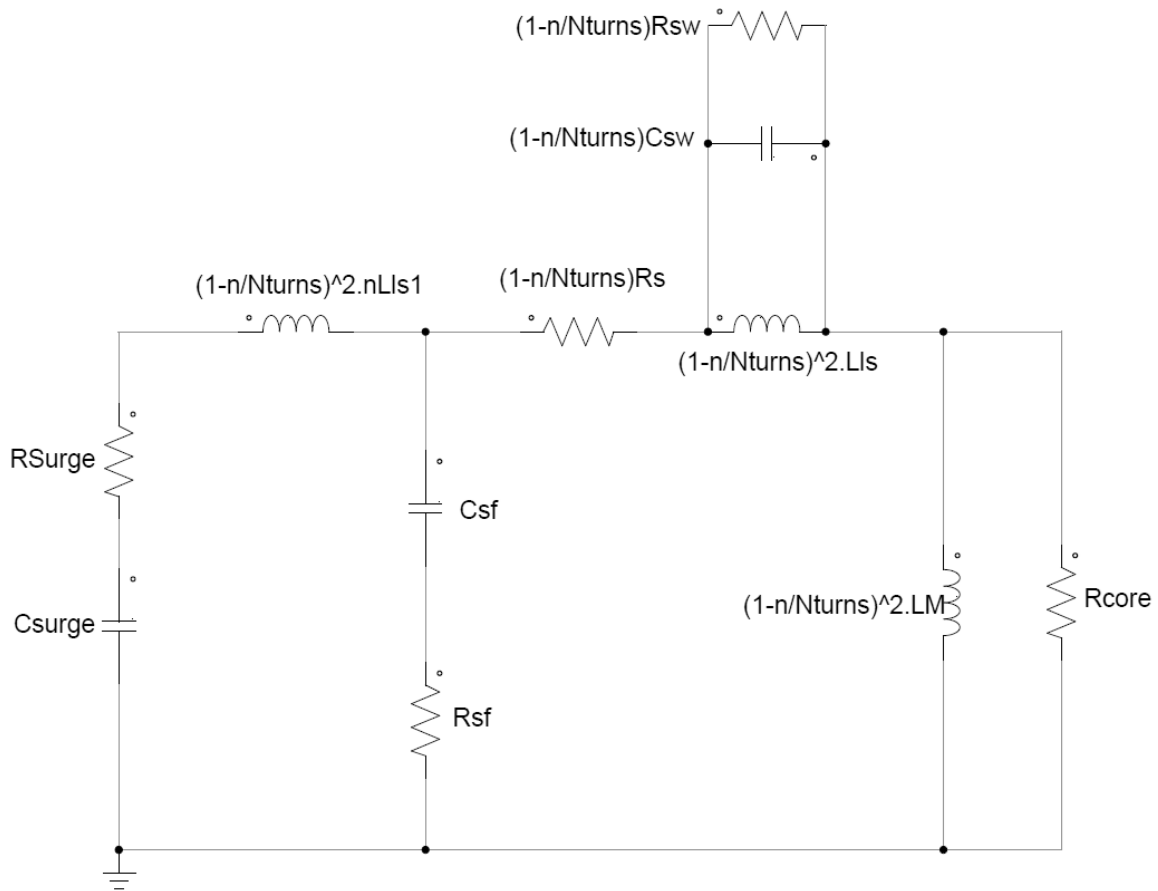
Além disso, são necessários os seguintes equipamentos e instrumentos para o procedimento experimental:

- Ponte RLC ou analisador de frequência com resolução adequada para a faixa de frequência do estator testado (normalmente entre 60 Hz e 600 kHz);
- Equipamento para ensaio de ensaio de surto de tensão, com a ferramenta de avaliação EAR;

Com isso, o procedimento resumido segue conforme passo a passo adiante. As equações utilizadas são as mesmas apresentadas no Capítulo 3, mas serão repetidas aqui para conveniência do leitor.

1. Obter o circuito equivalente da simulação e seus componentes, conforme circuito da Figura 33. Primeiramente, pode-se obter alguns dos parâmetros do estator em teste com o fabricante, conforme listado:
 - R_s - Resistência do estator (Ω);
 - L_{ls} - Indutância de dispersão do estator (H);
 - L_m - Indutância magnetizante (H);
 - R_{core} - Resistência representativa das perdas no ferro (Ω);
 - N_{turns} - Número total de espiras por fase.
2. Conectar o estator em teste ao equipamento de análise de frequência em modo diferencial (MD), conforme desenho da esquerda na Figura 12, e aplicar passos de frequência entre a frequência nominal do estator e ao menos 100 kHz, medindo-se a impedância $|Z|$ e o ângulo θ , para cada valor de frequência selecionado;
3. Conectar o estator em teste ao equipamento de análise de frequência em modo comum (MC), conforme desenho da direita na Figura 12 e aplicar passos de frequência entre a frequência nominal do estator e ao menos 100 kHz, medindo-se a capacitância C e a resistência série R_s , para cada valor de frequência selecionado;

Figura 33 – Circuito de simulação e seus elementos



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

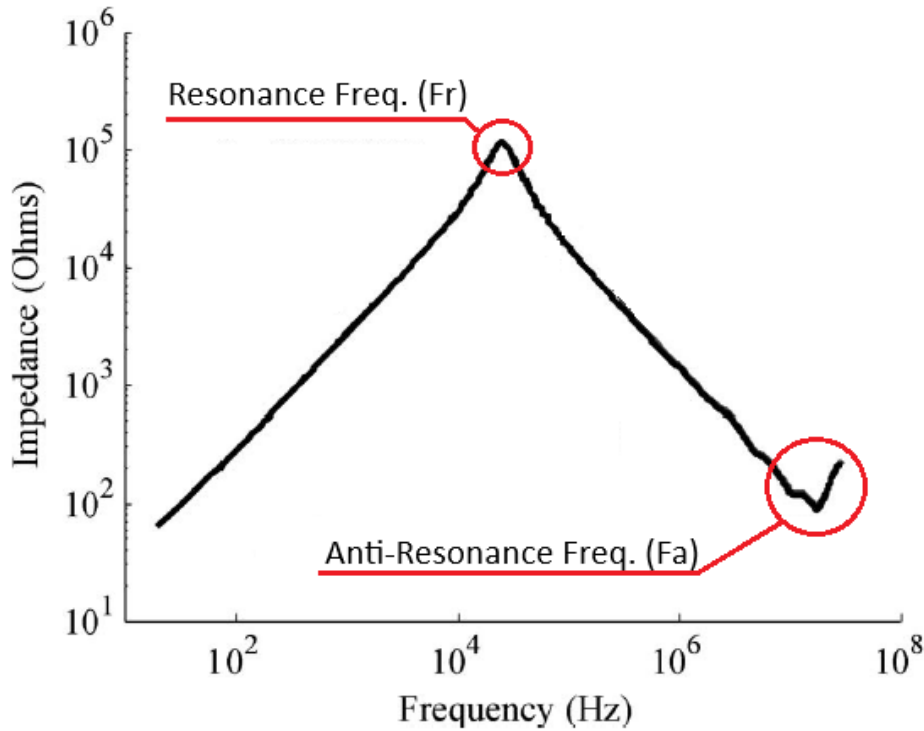
4. Com as curvas de capacitância obtida na configuração MC, calcular a capacitância entre enrolamentos e carcaça, C_{sf} , através da média das capacitâncias medidas na curva em baixa frequência $C_{sf}(LF)$ e em alta frequência $C_{sf}(HF)$, conforme equação (3);

$$C_{sf} = \left(\frac{C_{sf}(HF) + C_{sf}(LF)}{2} \right) / 3 \quad (3)$$

5. Com o valor de C_{sf} , a indutância de dispersão do estator L_{ls} e o ponto de ressonância da curva de impedância por frequência f_r ($\omega_r = 2\pi f_r$), calcular a capacitância entre espiras, conforme equação (5). Os pontos de ressonância e antirressonância são obtidos através do gráfico da curva medida em MD e serão semelhantes ao mostrado na curva exemplo da Figura 34;

$$C_{sw} = \frac{2L_{ls}C_{sf}\omega_r^2 - 1}{L_{ls}\omega_r^2 (L_{ls}C_{sf}\omega_r^2 - 1)} \quad (5)$$

Figura 34 – Exemplo dos pontos de ressonância e antirressonância na curva DM



Fonte: Adaptado de (49)

6. Com a impedância medida no ponto de ressonância $|Z(f_r)|$, calcular a resistência entre espiras R_{sw} , conforme equação (7);

$$R_{sw} = \frac{2}{3} |Z(f_r)| \quad (7)$$

7. Com o valor da impedância no ponto da frequência de antirressonância fa , pode-se calcular o valor da resistência de amortecimento entre os enrolamentos e a carcaça, R_{sf} , conforme equação (8);

$$R_{sf} = \frac{2}{3} |Z(fa)| \quad (8)$$

8. Com o valor da frequência no ponto de antirressonância Fa e o valor de C_{sf} , calcular a parcela inicial da indutância de dispersão ηL_{ls} , conforme equação (9);

$$\eta L_{ls} = \frac{1}{C_{sf} (2\pi fa)^2} \quad (9)$$

9. Ajustar a indutância magnetizante L_m e a resistência de perda no ferro R_{core} para 1% do valor, de forma a adequar os valores para o ensaio de surto;

10. Montar o circuito equivalente com os valores calculados e os valores de resistência e capacitância do módulo de aplicação de surtos do ensaio, R_{Surge} e C_{Surge} , respectivamente;
11. Realizar a simulação das formas de onda no circuito equivalente com os valores de $n = 0$, $n = 1$ e $n = -1$ e salvar as formas de onda;
12. Realizar o cálculo do EAR entre as ondas $n = 0$ e $n = 1$; e também entre as ondas $n = 0$ e $n = -1$, conforme equação (2), obtendo-se os valores de EAR mínimos para detecção de um defeito entre espiras;

$$EAR_{1-2} = \frac{\sum_{i=1}^N |F_i^{(1)}| - |F_i^{(2)}|}{\sum_{j=1}^N |F_j^{(1)}|} \quad (2)$$

13. Realizar o ensaio de surto nas três amostras de peças saudáveis obtidas para o procedimento. Realizar 3 ensaio em cada peça e anotar os valores medidos de EAR;
14. Calcular a média e o desvio padrão entre medições de cada uma das três peças e calcular a média e o desvio padrão entre as médias de cada uma das três peças;
15. Calcular o valor mínimo de EAR para detecção de um defeito conforme sequência:
 - Calcular a média EAR_{mean} entre os resultados de EAR simulados nas condições $n = 1$ e $n = -1$
 - Realizar o somatório entre o maior desvio padrão entre medições observado, $\sigma_{measurements}$, e o desvio padrão calculado entre peças, σ_{parts} , e multiplicar esse somatório por 3;
 - Diminuir do valor de EAR médio calculado o somatório dos desvios padrões conforme equação (21);

$$TolMin_{Surge} = EAR_{mean} - (\sigma_{measurements} + \sigma_{parts}) \cdot 3 \quad (21)$$

O valor calculado de $TolMin_{Surge}$ é o valor sugerido para a tolerância do ensaio, visto que está considerando o valor de defeito simulado e a distribuição do processo e do sistema de medição.

Ainda é possível verificar se haverá sobreposição entre as faixas aprovada e reprovada, calculando-se a média do EAR experimental entre as peças e somando os desvios padrões de medição e de processo, multiplicados por 3, conforme equação (22), obtendo-se assim o valor máximo de EAR em peças saudáveis, $AprMax_{Surge}$.

$$AprMax_{Surge} = EAR_{ok_{mean}} + (\sigma_{measurements} + \sigma_{parts}) \cdot 3 \quad (22)$$

Se houver sobreposição das faixas, recomenda-se uma análise mais crítica dos resultados, verificando o tamanho da sobreposição e a possibilidade de adotar um valor médio entre os dois valores obtidos, $TolMin_{Surge}$ e $AprMax_{Surge}$. Outra sugestão é tentar reduzir as incertezas dos desvios padrões obtendo-se os resultados do EAR em uma maior amostragem de peças.