

**ANDRÉ MARCEL PEREIRA MARTINEZ**

**ESTUDO DE MÉTODOS DE DETECÇÃO DE  
CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS EM  
ESTADORES DE MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS DE BAIXA TENSÃO**

**FLORIANÓPOLIS**

**2008**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

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

**ESTUDO DE MÉTODOS DE DETECÇÃO DE  
CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS EM  
ESTADORES DE MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS DE BAIXA TENSÃO**

Dissertação submetida à Universidade  
Federal de Santa Catarina como parte  
dos requisitos para a obtenção do grau  
de Mestre em Engenharia Elétrica.

**ANDRÉ MARCEL PEREIRA MARTINEZ**

Florianópolis, Julho de 2008.

# **ESTUDO DE MÉTODOS DE DETECÇÃO DE CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS EM ESTADORES DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS DE BAIXA TENSÃO**

ANDRÉ MARCEL PEREIRA MARTINEZ

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Orientador

---

Kátia Campos de Almeida, Dra.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

---

Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Presidente

---

Patrick Kuo-Peng, Dr.  
Co-orientador

---

Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

---

Walter Pereira Carpes Jr., Dr.

---

Orlando José Antunes, Dr.

**Dedicatória:**

À minha família, em especial aos meus pais, José Carlos e Cristina, e à minha namorada Elaine.

### **Agradecimentos:**

A Deus, que mesmo nas adversidades, sempre me mostrou um caminho para que eu continuasse buscando meus objetivos.

Aos meus pais José Carlos e Cristina, que sempre me ajudaram e me incentivaram a continuar meus estudos.

À Elaine, pela paciência, apoio e carinho durante toda esta etapa final do mestrado.

À WEG, por ter me proporcionado participar deste curso de mestrado.

Aos colegas que trabalham ou trabalharam no Controle da Qualidade da WEG Motores, em especial aos senhores Álvaro R. de Carvalho Filho, Juliano Saldanha Vargas e Aloísio Fabre, que me selecionaram para o curso, aos senhores João Alfredo Silveira e Paulo Henrique Nicolau, pelo incentivo e apoio e aos senhores Rodrigo Luis Muller, Adomiro Schwartz, Edson Wolf e Odenir Lemke que me auxiliaram nos testes realizados.

À Silvana Tecila, pela grande ajuda no início do curso.

À UFSC e seus professores, que me deram a oportunidade de adquirir o conhecimento necessário para me tornar um mestre.

Ao Professor e orientador Nelson Jhoe Batistela, pela oportunidade de realizar esta dissertação, pelo grande auxílio durante os trabalhos e pela motivação.

Às demais pessoas, que apesar de não terem sido citadas aqui, contribuíram de alguma forma para que eu conseguisse atingir meus objetivos.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

# **ESTUDO DE MÉTODOS DE DETECÇÃO DE CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS EM ESTADORES DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS DE BAIXA TENSÃO**

**ANDRÉ MARCEL PEREIRA MARTINEZ**

Julho / 2008

Orientador: Nelson Jhoe Batistela, Doutor.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica (Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos).

Palavras-chave: Curto-circuito entre espiras, motores de indução trifásicos, defeito em estadores.

Número de Páginas: 70

O presente trabalho tem como objetivo analisar as principais causas do curto-circuito entre espiras em estadores utilizados em motores de indução trifásicos de baixa tensão e realizar uma comparação entre os principais tipos de detecção e equipamentos utilizados atualmente. Desta forma, será possível avaliar quais os principais pontos positivos e negativos de cada tipo de método de detecção e, caso seja possível, definir qual equipamento consegue identificar de forma mais eficiente este tipo de falha em estadores que ainda estão em produção. Através do levantamento inicial da bibliografia, pode-se observar que este assunto tem grande relevância e que vem sendo estudado há anos, permitindo o levantamento de vários tipos de testes, sendo que muitos destes passaram por várias evoluções em suas metodologias. Além disso, o desenvolvimento de testes que consigam detectar este tipo de falha durante o processo produtivo dos estadores bobinados é de extrema importância para os fabricantes de motores, pois permite a detecção antecipada do defeito, reduzindo os custos de retrabalho, refugo de materiais e gastos com assistência técnica. Os clientes também compartilham desta mesma percepção, uma vez que caso o problema seja detectado apenas no cliente, poderá ocasionar paradas inesperadas no processo produtivo do cliente e aumentar seus gastos com manutenção.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

# **STUDY OF TURN TO TURN DETECTION METHODS IN STATORS OF THREE PHASE LOW VOLTAGE INDUCTION MOTORS**

**ANDRÉ MARCEL PEREIRA MARTINEZ**

July / 2008

Advisor: Nelson Jhoe Batistela, Doctor

Area of Concentration: Electrical Engineering (Electromagnetism and electromagnetic devices).

Keywords: Turn to turn short circuit, three phase induction motors, stator failures.

Number of Pages: 70.

The purpose of this dissertation is to analyze the main causes of the turn to turn short circuit in stators of three phase low voltage induction motors and to realize a comparison between the main kinds of tests and devices or equipment used nowadays. By doing this, it will be possible to evaluate the positive and negative points of each kind of detection method and, if it is possible, to define which equipment can identify in an efficiently way this kind of failure in stators during the winding process.

By the initial bibliography research, it was possible to verify that this subject has great relevancy and has been studied for so many years, allowing us to find many kinds of tests, which have been changed by the evolution of their methodologies. Still, the development of tests which can detect this kind of failure during the winding process is extremely important to motors manufacturers, since it allows the premature detection of the failure, reducing rework costs, scraped materials and costs related to technical assurance. Customers also share the same perception, because if the problem is detected at the customer, it may cause unexpected stops at their production process e rise their maintenance costs.

## SIMBOLOGIA

kV	quilovolt;
mm	milímetro;
V	Volt;
$V_1$	tensão fase-neutro do estator;
$I_1$	corrente de fase no estator;
$R_1$	resistência do enrolamento do estator;
$jX_1$	reatância de dispersão do estator;
$R_f$	resistência causada pelas perdas no núcleo;
$jX_m$	reatância de magnetização;
$jX_2$	reatância de dispersão do rotor;
$R_2$	resistência do rotor;
$s$	escorregamento do motor;
DC	corrente contínua;
p	número de par de pólos;
$f_f$	freqüência fundamental (Hz);
$f_{cc}$	freqüência relacionada ao curto-circuito (Hz);
k	ordem do harmônico de freqüência (1, 2, 3, ...);
n	número inteiro (1, 2, 3,...);
AC	corrente alternada.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. PRINCIPAIS CAUSAS DE CURTO -CIRCUITO ENTRE ESPIRAS.....</b>	<b>3</b>
2.1 Introdução .....	3
2.2 Sistema típico de isolamento em motores de indução de baixa tensão .....	5
2.2.1 Fio esmaltado .....	5
2.2.2 Tubos Isolantes .....	6
2.2.3 Filmes isolantes .....	7
2.2.4 Cabos isolados .....	10
2.2.5 Verniz e resina de impregnação .....	11
2.3 Principais causas dos curtos-circuitos .....	12
2.3.1 Estresse de origem ambiental .....	12
2.3.2 Estresse de Origem térmica.....	12
2.3.3 Estresse de origem elétrica .....	13
2.3.4 Estresse de origem mecânica .....	15
2.4 Considerações finais .....	17
<b>3 METODOLOGIA DE DETECÇÃO .....</b>	<b>18</b>
3.1 Introdução .....	18
3.2 Análise do Circuito do Motor (MCA – Motor Circuit Analysis) .....	18
3.2.1 Falhas no bobinado .....	19
3.2.2 Métodos tradicionais do teste .....	20
3.2.3 Técnicas de avaliação utilizando MCA.....	21
3.3 Teste de surto (impulso) .....	23
3.4 Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA) .....	26
3.5 Análise do campo magnético externo .....	30
3.6 Descargas Parciais .....	31
3.7 Considerações finais .....	37
<b>4. EQUIPAMENTOS COMERCIAIS DE DETECÇÃO DE CURTO -CIRCUITO ENTRE ESPIRAS.....</b>	<b>38</b>
4.1 Equipamentos de Teste de Surto Disponíveis na WEG .....	38
4.1.1 Schleich.....	39
4.1.2 Baker Instrument Company.....	45
4.1.3 PJ Electronics .....	45
4.1.4 Acematic .....	46
4.2 Equipamentos Disponíveis no Mercado .....	46
<b>5. DESENVOLVIMENTO DE TESTES .....</b>	<b>48</b>

5.1 Teste de Surto .....	48
5.1.1 Schleich .....	49
5.1.2 Baker .....	54
5.1.3 PJ Electronics .....	60
5.1.4 Acematic .....	64
5.2 Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA) .....	66
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curto-circuito entre espiras na cabeça de bobina. ....	3
Figura 2.2 – Curto-circuito entre espiras dentro da ranhura. ....	4
Figura 2.3 – Curto-circuito entre espiras na saída da ranhura. ....	4
Figura 2.4 – Fio esmaltado. ....	5
Figura 2.5 – Isolamento da primeira espira. ....	6
Figura 2.6 – Isolante de solda. ....	7
Figura 2.7 – Isolante de fundo de ranhura. ....	8
Figura 2.8 – Isolante entre camadas. ....	9
Figura 2.9 – Isolante de fechamento de ranhura. ....	9
Figura 2.10 – Isolante entre fases. ....	9
Figura 2.11 – Cabo de silicone. ....	10
Figura 2.12 – Cabo EPR. ....	10
Figura 3.1 – Modelo do circuito equivalente do motor. ....	19
Figura 3.2 – Conexão ao enrolamento [11]. ....	24
Figura 3.3 – Curva de tensão típica obtida no teste de surto de um motor aprovado [11]. ....	25
Figura 3.4 – Sistema simplificado de diagnóstico do método MCSA [12]. ....	27
Figura 3.5 – Diagrama de blocos para obtenção do espectro de frequência da corrente [12]. ....	27
Figura 3.6 – Espectro de frequência da corrente de um motor sem carga e sem curto-circuito entre espiras [12]. ....	28
Figura 3.7 – Espectro de frequência da corrente de um motor sem carga e com 4% das espiras curto-circuitadas [12]. ....	28
Figura 3.8 – Espectro de frequência da corrente de um motor sem carga e com 16% das espiras curto-circuitadas [12]. ....	29
Figura 3.9 – Espectro de frequência da corrente de um motor sem carga e com 32% das espiras curto-circuitadas [12]. ....	29
Figura 3.10 – Espectro de frequência do campo magnético externo de um estator sem curto-circuito entre espiras [16]. ....	31
Figura 3.11 – Espectro de frequência do campo magnético externo de um estator com curto-circuito entre espiras [16]. ....	31
Figura 3.12 – Evolução da deterioração do isolamento provocada pelas descargas parciais [18]. ...	33
Figura 3.13 – Possíveis localizações dos espaços vazios no sistema de isolamento [18]. ....	33
Figura 3.14 – Descargas parciais superficiais [18]. ....	34
Figura 4.1 – Apresentação das bandas de tolerância de amplitude na forma de onda padrão [11]. .	40
Figura 4.2 – Avaliação de frequência de oscilação (zero crossings) [11]. ....	41
Figura 4.3 – Avaliação da área sob a forma de onda padrão [11]. ....	42

Figura 4.4 – Avaliação do erro diferencial através da área entre as formas de onda [11].....	43
Figura 4.5 – Avaliação de efeito corona na curva [11]. .....	44
Figura 5.1 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 1 (tensão ajustada em 2000V). ....	50
Figura 5.2 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 2 (tensão ajustada em 2000V). ....	50
Figura 5.3 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 3 (tensão ajustada em 2000V). ....	51
Figura 5.4 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 4 (tensão ajustada em 2000V). ....	51
Figura 5.5 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 5 (tensão ajustada em 2000V). ....	52
Figura 5.6 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 6 (tensão ajustada em 2000V). ....	52
Figura 5.7 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 7 (tensão ajustada em 2000V). ....	53
Figura 5.8 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 8 (tensão ajustada em 2000V). ....	53
Figura 5.9 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 9 (tensão ajustada em 2000V). ....	54
Figura 5.10 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 1 (tensão ajustada em 2000V). .	54
Figura 5.11 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 2 (tensão ajustada em 2000V). .	55
Figura 5.12 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 3 (tensão ajustada em 2000V). .	55
Figura 5.13 – Formas de onda de tensão em duas fases dos estatores 1, 2 e 3 .....	55
(tensão ajustada em 5000V). .....	55
Figura 5.14 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 4 (tensão ajustada em 2000V). .	56
Figura 5.15 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 5 (tensão ajustada em 2000V). .	56
Figura 5.16 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 6 (tensão ajustada em 2000V). .	57
Figura 5.17 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 4 (tensão ajustada em 5000V). .	57
Figura 5.18 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 5 (tensão ajustada em 5000V). .	57
Figura 5.19 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 6 (tensão ajustada em 2100V). .	58
Figura 5.20 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 7 (tensão ajustada em 800V). ...	58
Figura 5.21 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 8 (tensão ajustada em 800V). ...	59
Figura 5.22 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 9 (tensão ajustada em 800V). ....	59
Figura 5.23 – Formas de onda de tensão em duas fases dos estatores 7, 8 e 9 .....	59
(tensão ajustada em 5000V). .....	59
Figura 5.24 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 1 (tensão ajustada em 2000V). .	60
Figura 5.25 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 2 (tensão ajustada em 2000V). .	60
Figura 5.26 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 3 (tensão ajustada em 2000V). .	61
Figura 5.27 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 4 (tensão ajustada em 2000V). .	61
Figura 5.28 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 5 (tensão ajustada em 2000V). .	62
Figura 5.29 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 6 (tensão ajustada em 2000V). .	62
Figura 5.30 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 6 (tensão ajustada em 3900V). .	62
Figura 5.31 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 7 (tensão ajustada em 900V). ...	63
Figura 5.32 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 8 (tensão ajustada em 500V). ...	63

Figura 5.33 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 9 (tensão ajustada em 500V). ...	64
Figura 5.34 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 1 (tensão ajustada em 2000V). .	64
Figura 5.35 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 4 (tensão ajustada em 2000V). .	65
Figura 5.36 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 7 (tensão ajustada em 2000V). .	65
Figura 5.37 – Espectro de frequência da corrente do motor normal e sem carga. ....	67
Figura 5.38 – Espectro de frequência da corrente do motor normal e com carga. ....	67
Figura 5.39 – Espectro de frequência da corrente do motor com 5 espiras curto-circuitadas e sem carga.....	68
Figura 5.40 – Espectro de frequência da corrente do motor com 5 espiras curto-circuitadas e com carga.....	69
Figura 5.41 – Espectro de frequência da corrente do motor com 10 espiras curto-circuitadas e sem carga.....	70
Figura 5.42 – Espectro de frequência da corrente do motor com 10 espiras curto-circuitadas e com carga.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Materiais utilizados nos tubos isolantes.....	7
Tabela 2.2 – Composição dos filmes isolantes segundo a sua classe térmica. ....	10
Tabela 2.3 – Tipos de cabos utilizados de acordo com as classes térmicas. ....	11
Tabela 2.4 – Temperatura máxima das classes térmicas. ....	13
Tabela 4.1 – Comparação geral entre os métodos .....	44
Tabela 4.2 – Fabricantes de equipamentos de acordo com tipo de teste.....	47
Tabela 5.1 – Amplitudes das harmônicas do primeiro e segundo grupos sem carga. ....	68
Tabela 5.2 – Amplitudes das harmônicas do primeiro e segundo grupos com carga. ....	69
Tabela 5.3 – Amplitudes das harmônicas do primeiro, segundo e terceiro grupos sem carga. ....	70
Tabela 5.4 – Amplitudes das harmônicas do primeiro, segundo e terceiro grupos com carga. ....	71

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de globalização trouxe inúmeras mudanças a quase todos os países, sendo que uma das mais evidentes alterações foi a acirrada busca por produtos de qualidade com preços competitivos em qualquer parte do planeta. Com isso, todas as companhias que desejarem sobreviver e, conseqüentemente tirar proveito desta nova oportunidade, terão que buscar a evolução constante de seus funcionários, de seus processos e de seus equipamentos, de forma que os custos oriundos de retrabalhos, refugos e gastos com garantia de produtos sejam reduzidos ao máximo para que a empresa se mantenha competitiva mundialmente.

Estas alterações vêm ocorrendo em todas as empresas, sejam elas fornecedoras de produtos e/ou serviços ou sejam elas clientes. Nas empresas fornecedoras, cada vez mais são empregadas técnicas de avaliação de processo com finalidade de melhorar a produtividade e reduzir os custos indesejados.

Os clientes também têm buscado testes que garantam a qualidade dos produtos adquiridos, sendo eles realizados no fornecedor ou na inspeção de recebimento do próprio cliente, a fim de evitar futura perda de produtividade devido a paradas inesperadas na produção ou mesmo devido à quantidade de intervenções para manutenção.

Para alcançar a redução de índices de falha, novas metodologias, treinamentos e novos equipamentos são cada vez mais necessários. Estes aspectos apresentados constituem a motivação e justificativa do desenvolvimento desta dissertação. Os objetivos deste trabalho são apresentar as principais causas do curto-circuito entre espiras em estatores utilizados em motores de indução trifásicos de baixa tensão, realizar uma comparação entre os principais tipos de detecção e equipamentos utilizados atualmente, efetuar testes de falhas em estatores bobinados com equipamentos disponíveis no fabricante de motores WEG e analisar os resultados. O estudo avalia quais os principais pontos positivos e negativos de cada tipo de método de detecção, levando em conta também as conclusões apresentadas na literatura.

No segundo capítulo, realiza-se um estudo bibliográfico buscando informações sobre os defeitos em estatores bobinados, o sistema de isolamento dos estatores bobinados de baixa tensão e suas principais causas de falhas. No terceiro capítulo, são apresentadas as metodologias de detecção de falhas em bobinagem de estatores e/ou motores montados. O

quarto capítulo aborda o funcionamento de alguns dos equipamentos mais utilizados, explicando o princípio de operação dos equipamentos disponíveis no fabricante de motores WEG. O quinto capítulo apresenta a realização de testes de detecção de falhas, faz uma análise dos resultados e apresenta uma comparação do desempenho dos equipamentos utilizados para a detecção das falhas. Estes equipamentos utilizam a metodologia conhecida por teste de surto. A conclusão deste trabalho apresenta sumariamente os pontos relevantes para a detecção de falhas de curto-circuito entre espiras de estatores de motores de indução de baixa tensão e propõe assuntos de pesquisas de continuidade do estudo deste trabalho.

## 2. PRINCIPAIS CAUSAS DE CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS

### 2.1 Introdução

O curto-circuito entre espiras em estatores de máquinas elétricas atinge, conforme citado por [1, 2 e 3], cerca de 30% dos casos de falhas, podendo chegar à cerca de 40% do total de falhas nos motores em operação. Estas falhas, conforme descrito por [4 e 5], são causadas por diversos tipos de estresses – térmicos, mecânicos, elétricos e ambientais – que agem sobre o sistema isolante dos motores. Cada tipo de estresse afeta o isolamento de forma diferente, porém todos agem entre si, de forma que a degradação causada por um aumenta a degradação causada pelos outros.

Devido aos vários tipos de estresses, diferentes tipos de falhas podem se desenvolver nos estatores. Entretanto, é largamente aceito que o curto-circuito entre espiras é um dos tipos de falha mais comum e, que a partir deste tipo de falha, o problema acaba evoluindo para curto-circuito entre bobinas, entre fases ou fase contra terra, resultando na queima do motor.

A figura 2.1 mostra um curto-circuito entre espiras na cabeça de bobina, numa situação inicial onde ainda não houve danos aparentes aos demais materiais isolantes.



Figura 2.1 – Curto-circuito entre espiras na cabeça de bobina.

A figura 2.2 mostra um curto-circuito dentro da ranhura, onde em grande parte dos casos a falha se inicia por um curto-circuito entre espiras e acaba danificando o isolamento de fechamento de ranhura e/ou o isolante de fundo de ranhura.



Figura 2.2 – Curto-circuito entre espiras dentro da ranhura.

A figura 2.3 mostra um curto-circuito na saída da ranhura, onde em grande parte dos casos a falha também se inicia por um curto-circuito entre espiras e acaba danificando o isolamento de fechamento de ranhura e/ou o isolante de fundo de ranhura.



Figura 2.3 – Curto-circuito entre espiras na saída da ranhura.

A seguir, apresentam-se brevemente o sistema de isolamento de estatores de motores de indução de baixa tensão e os tipos de estresses a que estão sujeitos os materiais isolantes.

## 2.2 Sistema típico de isolamento em motores de indução de baixa tensão

Apresenta-se a seguir uma breve abordagem do sistema de isolamento dos motores de indução trifásicos de baixa tensão, que possuem os seguintes componentes:

- Ø Fio esmaltado;
- Ø Tubos isolantes;
- Ø Filmes isolantes;
- Ø Cabos isolados;
- Ø Resinas e vernizes de impregnação.

De uma maneira geral, esses materiais devem possuir características mecânicas para resistir à temperatura da classe do material e também aos estresses pelos quais o material passa durante o processo de fabricação do motor. As características do isolamento são avaliadas pela tensão de ruptura ou resistência dielétrica. Por definição, a rigidez dielétrica (kV/mm) é a tensão de ruptura (kV ou V) dividida pela espessura do isolante.

### 2.2.1 Fio esmaltado



Figura 2.4 – Fio esmaltado.

O fio circular esmaltado é um dos componentes mais importantes do motor, pois é a corrente elétrica circulando por ele que cria o campo magnético necessário para o funcionamento do motor. Durante a fabricação do motor, os fios são submetidos a esforços

mecânicos de tração, flexão e abrasão. Em funcionamento, os efeitos térmicos e elétricos agem também sobre o material isolante do fio. Por essa razão, ele deve ter um bom isolamento mecânico e elétrico. O esmalte utilizado atualmente nos fios garante essas propriedades, sendo a propriedade mecânica assegurada pela camada externa do esmalte que resiste a forças de abrasão durante a inserção do mesmo nas ranhuras do estator. A camada de esmalte interna garante alta rigidez dielétrica e o conjunto atribui classe 200°C ao fio (UL File E234451). Esse fio é utilizado em todos os motores classe B, F e H, com exceção dos motores acionados por inversores de frequência, sendo que neste utiliza-se fio especial. Também nos motores para extração de fumaça (Smoke Extraction Motor) o fio é especial para altíssimas temperaturas.

### 2.2.2 Tubos Isolantes

Os tubos flexíveis têm a função de cobrir e isolar eletricamente os fios das saídas das bobinas (ou primeira espira), conforme Figura 2.5 e de cobrir e isolar eletricamente as soldas das conexões entre os fios da bobina e o cabo de ligação, conforme demonstrado na Figura 2.6. Eles são flexíveis para permitir que se moldem aos pontos de solda e à amarração da cabeça da bobina, à temperatura de impregnação, resistir quimicamente ao verniz impregnante e possuem boa resistência elétrica.



Figura 2.5 – Isolamento da primeira espira.



Figura 2.6 – Isolante de solda.

A WEG utiliza atualmente três tipos de tubos:

- Ø tubo com trama de poliéster recoberto com resina acrílica;
- Ø tubo com trama de fibra de vidro recoberto com borracha de silicone;
- Ø tubo de poliéster termoencolhível.

Os tubos isolados são colocados nos pontos de solda na bandagem do motor e amarrados junto à cabeça de bobina. No caso dos tubos termoencolhíveis, passa-se um aquecedor sobre os mesmos para realizar a contração do tubo.

Os tubos isolantes são subdivididos de acordo com a sua classe térmica, conforme tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Materiais utilizados nos tubos isolantes.

Classe térmica	Material
B(130°C)	Poliéster CL termoencolhível
F(155°C)	Trançado de poliéster recoberto com verniz acrílico
H(180°C)	Trançado de fibra de vidro recoberto com borracha de silicone
H(180°C) Smoke	Trançado de fibra de vidro recoberto com silicone modificado

### 2.2.3 Filmes isolantes

Os filmes e laminados isolantes têm a função de isolar eletricamente partes da bobina do motor. Como a vida útil do motor depende quase que exclusivamente da vida útil do isolamento, aplica-se o material adequado para cada classe de motor. Esses filmes e laminados são aplicados nos seguintes pontos:

- Ø Entre a bobina e a ranhura para isolar o pacote de chapas do estator da bobina de fios esmaltados;
- Ø Entre as fases para isolar eletricamente uma fase da bobina da outra fase;
- Ø Fechamento da ranhura do estator para isolar eletricamente a bobina localizada na parte superior da ranhura do estator e para atuar mecanicamente de modo a manter os fios dentro da ranhura do estator.

Os materiais isolantes devem ser porosos para absorver o verniz impregnante, sendo que nos motores são utilizados os seguintes filmes isolantes:

- Ø Fundo de ranhura (Figura 2.7): isola as bobinas do pacote de chapas do estator e também protege o fio das imperfeições da chapa. Deve possuir resistência mecânica elevada, sendo que muitas vezes é reforçado com um adesivo na ponta ou com outro filme de poliéster;
- Ø Entre camadas (Figura 2.8): utilizado quando o motor possui mais de uma camada;
- Ø Fechamento de ranhuras (Figura 2.9): utilizado para fechar as ranhuras, evitando que os fios saiam de dentro da ranhura e se danifiquem devido ao contato com o rotor;
- Ø Entre fases (Figura 2.10): apresenta a forma de um semicírculo, possui a função de isolar uma fase da outra na cabeça de bobina;
- Ø Tirante: são duas tiras que são presas em dois isolantes entre-fases. São colocados dentro da ranhura e servem para evitar que o entre-fases saia da posição.

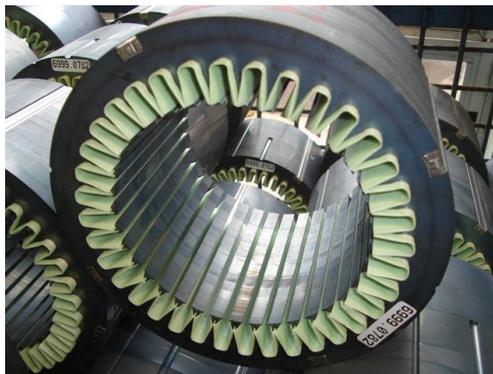


Figura 2.7 – Isolante de fundo de ranhura.



Figura 2.8 – Isolante entre camadas.



Figura 2.9 – Isolante de fechamento de ranhura.



Figura 2.10 – Isolante entre fases.

A tabela 2.2 apresenta a composição do material isolante de acordo com sua respectiva classe térmica.

Tabela 2.2 – Composição dos filmes isolantes segundo a sua classe térmica.

Classe térmica	Material
B(130°C)	Poliéster (tereftalato de polietileno)
F(155°C)	DMD (Dacron - Fibra de poliéster + Mylar - Filme de poliéster + Dracon – Filme de poliéster)
F(155°C)	NMN (Nomex – Poliaramida 464 + Mylar – Poliéster + Nomex Poliaramida 464)
H(180°C)	Nomex – Poliaramida 410
C(200°C)	NKN (Nomex Papel aramida + Kapton Poliimida + Nomex Papel aramida)

### 2.2.4 Cabos isolados

Os cabos isolados (Figuras 2.11 e 2.12) fazem a intermediação entre as bobinas e a alimentação elétrica, sendo que os motores elétricos podem ter 3, 6, 9 ou 12 cabos, variando de acordo com o tipo de ligação das bobinas: triângulo, estrela, triângulo-triângulo, estrela-estrela. Ainda, os cabos devem resistir à temperatura da impregnação e ao verniz impregnante.



Figura 2.11 – Cabo de silicone.

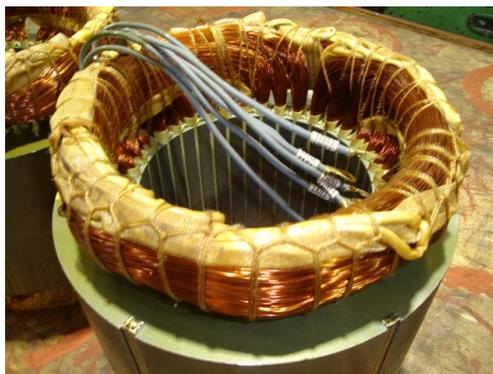


Figura 2.12 – Cabo EPR.

Os cabos de ligação são construídos com materiais isolantes elastoméricos. Esses materiais têm única e exclusivamente a função de isolar eletricamente o condutor do meio externo. Eles têm alta resistência elétrica aliada à adequada flexibilidade para permitir o fácil manuseio durante o processo de fabricação, como durante a instalação e manutenção do motor. Os cabos de ligação são especificados conforme a classe térmica do motor, conforme tabela 2.3, e conforme o meio em que o motor irá ser aplicado. Um exemplo é o motor para bombas submersas em que o cabo deve ser quimicamente resistente ao óleo da bomba.

Tabela 2.3 – Tipos de cabos utilizados de acordo com as classes térmicas.

Classe	Cabos
A (105°C)	PVC
B(130°C)	EPR (borracha Etileno-Propileno)
F(155°C)	Teflon
F(155°C)	Silicone modificado
H(180°C)	Silicone

### 2.2.5 Verniz e resina de impregnação

Os vernizes e as resinas de impregnação têm como principal função manter unidos entre si todos os fios esmaltados da bobina com todos os componentes do estator através da aglutinação pelo verniz ou pela resina. Essa aglutinação impede que os fios vibrem e atritem entre si. Esse atrito poderia provocar falhas no esmalte do fio levando-o a um curto-circuito. A aglutinação ajuda ainda na dissipação térmica do calor gerado pelo condutor.

Utilizam-se atualmente dois tipos de vernizes e dois tipos de resinas de impregnação, todos à base de poliéster, para atender às necessidades construtivas e de aplicação dos motores. A resina de silicone é utilizada apenas para motores especiais projetados para altíssimas temperaturas. Os vernizes e as resinas melhoram as características térmica e elétrica dos materiais impregnados podendo-se atribuir uma classe térmica maior a estes, quando comparados aos materiais sem impregnação. Também atuam como proteção da bobina e de partes dela contra ambientes úmidos, marítimos e produtos químicos.

O verniz de impregnação tem a função de compactar a cabeça de bobina, impedir o atrito entre os fios, proteger os fios de ambientes agressivos e também proteger a chapa do

estator da oxidação. Deve possuir a temperatura de cura baixa para não prejudicar os cabos e fios.

## 2.3 Principais causas dos curtos-circuitos

As principais causas dos curtos-circuitos em estatores de motores de indução trifásicos de baixa tensão, conforme [4 e 5], estão ligadas principalmente ao tipo de estresse a que os materiais são submetidos, sendo que dentre estes tipos de estresse, pode-se citar:

### 2.3.1 Estresse de origem ambiental

O tipo de ambiente que o motor irá operar contribui para a escolha dos materiais isolantes que devem ser utilizados nos motores. Os motores especialmente projetados para operar em ambientes ácidos, por exemplo, utilizam um verniz de impregnação diferenciado, reduzindo o risco de falha devido à redução da vida útil do verniz.

Ambientes muito úmidos representam um problema para os motores elétricos, sendo que nestes casos existe a opção de solicitar que o motor possua resistências de aquecimento, de forma a impedir a entrada de água, por condensação, e posterior degradação do isolamento causada pela redução da resistência de isolamento do motor.

### 2.3.2 Estresse de Origem térmica

Deve-se observar que os materiais isolantes e os sistemas de isolamento são agrupados em classes de isolamento, conforme NBR-7034, descrita de forma resumida na tabela 2.4. Quando estes materiais são expostos a temperaturas acima do limite de suas respectivas classes, sofrem envelhecimento térmico podendo apresentar perda de integridade física, que fica caracterizada pelo ressecamento e aspecto quebradiço do material isolante. Estudos indicam que um aumento de 8°C a 10°C na temperatura do isolamento reduz a vida útil do material isolante pela metade [6]. O envelhecimento térmico do enrolamento confere vulnerabilidade ao sistema de isolamento quanto a outros fatores que podem causar curto-circuito entre espiras, como o estresse mecânico e ambiental.

Tabela 2.4 – Temperatura máxima das classes térmicas.

<b>Classe</b>	<b>Temperatura Máxima (°C)</b>
B	130
F	155
H	180

As sobrecargas térmicas causadas pelos fatores abaixo também contribuem para o desgaste dos materiais isolantes:

- Ø Variações de tensão: variações fora da faixa de  $\pm 10\%$  da tensão nominal, prevista por norma para o funcionamento do equipamento;
- Ø Tensões de fase desbalanceadas: um pequeno desbalanceamento causa um incremento grande de temperatura no enrolamento. Estima-se que a cada 3,5% de desbalanceamento, corresponderá um aumento de temperatura de 25% na fase com a mais alta corrente;
- Ø Partidas repetitivas: dependendo do tipo do motor, a corrente de partida pode variar de 5 a 8 vezes a corrente nominal. Se o motor não for projetado para este regime de funcionamento, a temperatura aumentará rapidamente causando desgaste do material isolante;
- Ø Obstrução da ventilação: o calor gerado no motor é dissipado por condução, convecção e radiação. Qualquer coisa que obstrua o fluxo de ar ou impeça a troca de calor das partes do motor, causará um incremento na temperatura dos enrolamentos;
- Ø Temperatura ambiente: os motores que possuem configuração padrão são projetados para operar em uma temperatura ambiente máxima de 40° C. Caso o motor seja submetido, sem que tenha sido projetado para isto, a temperaturas acima da especificada, também ocorrerá desgaste do material isolante.

### 2.3.3 Estresse de origem elétrica

O estresse de origem elétrica, conforme [5 e 6], pode ter várias causas, dentre elas cabe citar:

- Ø Tensão elevada: os materiais isolantes suportam até certo nível de tensão. Esta tolerância é ditada pelos materiais que entram na composição dos

mesmos. A especificação do tipo de material isolante deve ser feita de acordo com a aplicação a que se destina o motor, garantindo que o material isolante não venha a se deteriorar com os picos de tensão e assegurando um tempo de vida adequado. O problema ocorre quando as tensões entre fases estão acima do suportado pelos isolantes que estão entre as fases (gerando curto-circuito entre fases) ou quando a tensão está acima do suportado pelo verniz de isolamento (gerando curto-circuito entre espiras) ou ainda quando a tensão é superior à suportada pelo isolante de fundo de ranhura, que pode vir a causar um curto-circuito entre a bobina e a massa (curto-circuito contra a massa);

- Ø Corona: este fenômeno caracteriza-se por descargas localizadas, resultantes da ionização gasosa transitória em um sistema de isolamento operando acima de 3 kV, onde a tensão aplicada excede um valor considerado crítico. São tipos básicos de descargas: as descargas internas que ocorrem nas cavidades do dielétrico; as descargas que podem ocorrer na superfície das bobinas; os pontos de descarga que ocorrem em um forte campo elétrico ao redor de uma ponta (poder das pontas). Os fatores que afetam a descarga por corona incluem: frequência, espessura do dielétrico, material, vácuos, nível de tensão, geometria, umidade, estresse mecânico e temperatura. O mecanismo de falta é o aquecimento, desgaste ou reação química, resultando em uma deterioração do isolamento do enrolamento;
- Ø Condições transitórias de tensão: a exposição dos motores a condições transitórias de tensão causa falha no isolamento dos enrolamentos, porque o estresse elétrico não é uniformemente distribuído através dos enrolamentos. Essas tensões transitórias podem ser causadas por curtos-circuitos, por altas oscilações de tensão causadas por repetitivos religamentos, por oscilações de tensão ou ressonâncias causadas por interrupção de corrente em circuitos indutivos quando a energia do campo magnético não é zero, rápida transferência de barramentos gerando um vetor diferença entre a tensão do barramento reserva e a tensão em decaimento, abertura e fechamento de disjuntores gerando ondas de impulso que dão origem a tensões irregulares, chaveamento de capacitores gerando surtos em função das capacitâncias utilizadas, perfurações no isolamento em outros pontos do sistema de

potência que podem criar surtos de tensão que excedem o triplo das tensões fase-terra normais em um sistema não solidamente aterrado, surtos de tensão gerados por raios através de descarga direta ou indução, acionamentos de frequência variável cujos efeitos surgem nos enrolamentos como curto-circuito entre espiras ou espira-terra e rápidas variações de tensão originadas no chaveamento de inversores.

#### 2.3.4 Estresse de origem mecânica

O estresse de origem mecânica, conforme [5 e 6] é caracterizado e originado por:

- Ø Partidas repetitivas: além dos efeitos mencionados anteriormente, devido às elevadas correntes na partida, surgem forças de origem eletromagnética que podem causar deformações nas cabeças de bobinas do estator, provocando a expansão ou contração do sistema de isolamento, cujos materiais, em longo prazo podem se deteriorar. Em máquinas maiores, falhas nos enrolamentos por fadiga podem ocorrer quando o enrolamento fica frouxo o suficiente para permitir um movimento significativo do condutor durante operação normal, na partida ou em partidas subseqüentes;
- Ø A vibração excessiva ou a ocorrência de defeitos construtivos podem ser responsáveis pela ocorrência de curto-circuito dentro das ranhuras do estator, fazendo com que as correntes circulantes no núcleo assumam valores elevados, chegando a derreter as chapas;
- Ø Movimento de bobinas: este efeito ocorre com maior intensidade em grandes máquinas de alta velocidade, do que em pequenas máquinas de baixa velocidade. Caracteriza-se pelo fato de que, durante a partida, a força que surge nas bobinas, produzida pela corrente no enrolamento estático, causa vibração nas bobinas com uma frequência de duas vezes a frequência de linha, criando movimentos nas direções radial e tangencial. Este movimento pode causar severos danos ao isolamento das bobinas e aos condutores de cobre;
- Ø Danos causados pelo rotor: existem casos em que o rotor pode danificar o estator, como por exemplo, em situações de falhas na conformação dos rolamentos, deflexão do eixo, desalinhamento entre o estator e o rotor e

ainda um processo inadequado de colocação do rotor. Se o contato entre estator e rotor ocorrer na partida, a força do rotor pode fazer com que as laminações do rotor perfurem o isolamento da bobina, aterrando-a;

Ø Danos causados nos fios e nos materiais isolantes por falhas operacionais durante o processo produtivo, sendo que estes ocorrem por uma série de falhas, tais como:

- Transporte incorreto das bobinas localizadas nas máquinas de fazer bobinas para as máquinas que inserem as bobinas, onde o formato da bobina pode ser alterado, fazendo com os fios fiquem entrelaçados, aumentando substancialmente a área dos fios. Durante a inserção, a máquina acaba exercendo grande força sobre os isolantes de fundo de ranhura e os fios, os quais acabam se danificando;
- Ajuste incorreto dos parâmetros das máquinas de amarrar, fazendo com que a agulha danifique o isolamento dos fios;
- Respingos de solda também podem ocasionar falhas no isolamento dos fios, isolantes entre fases, de fundo e fechamento de ranhura e nos tubos isolantes;
- Colocação e/ou retirada incorreta dos estatores nas gancheiras das estufas de impregnação;
- Prensagem da cabeça de bobina insuficiente, fazendo com a bobina se danifique nas gancheiras das estufas de impregnação ou durante o processo de prensagem da carcaça.

Os quatro tipos de estresse destacados anteriormente, normalmente causam os seguintes tipos de curto-circuito:

- Ø Entre espiras de um mesmo grupo de bobinas;
- Ø Entre grupos de bobinas de uma mesma fase;
- Ø Entre grupos de bobinas de fases diferentes;
- Ø Entre bobina e terra.

Dentre os tipos de falha citados anteriormente, o curto-circuito entre espiras merece um cuidado especial, uma vez que é de difícil detecção antes e após a queima do motor.

Uma das causas da dificuldade de detecção antes da falha são as variações no processo de bobinagem dos estatores. Estas variações muitas vezes acabam interferindo na avaliação do defeito, de forma que é necessário trabalhar com uma tolerância na configuração dos painéis de teste a fim de evitar que estatores contendo apenas variações de processo não sejam confundidos com produtos defeituosos. Estas variações de processo podem ser introduzidas por algumas situações, dentre elas:

- Ø Variações no processo de trefilação dos fios de cobre, que podem alterar a bitola dos mesmos;
- Ø Variações nos dispositivos de fazer bobinas, que podem causar diferenças nos comprimentos das espiras;
- Ø Variações nas dimensões da chapa do estator e/ou rotor, que podem causar diferenças no comprimento do pacote de chapas;
- Ø Conforme demonstrado por [7], até mesmo variações nos processos de grampeamento dos estatores podem ocasionar variações nas curvas  $B \times H$ , que por sua vez causam um aumento das perdas e alteração no campo coercitivo, interferindo nas avaliações de curto-circuito em estatores bobinados. Ainda, segundo os autores, bobinas em curto-circuito alteram mais a permeabilidade da chapa do que suas perdas.

## 2.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou resumidamente o sistema de isolamento dos motores elétricos de indução de baixa tensão, bem como alguns fatores que causam curto-circuito nas bobinas dos estatores, que segundo [4 e 5], são causados por diversos tipos de estresses.

## 3 METODOLOGIA DE DETECÇÃO

### 3.1 Introdução

Na literatura e comercialmente há métodos e aparelhos que procuram detectar falhas incipientes e/ou já consolidadas nas bobinas de estatores de motores de indução antes de estes entrarem em operação normal, enquanto estão sendo aplicados testes para comprovar a qualidade do material na fábrica. Neste capítulo serão abordadas as principais técnicas apresentadas na literatura e aquelas utilizadas por fabricantes de máquinas elétricas. Quando possível, detalha-se algumas das formas de detecção que vem sendo utilizadas e/ou desenvolvidas pelas empresas.

### 3.2 Análise do Circuito do Motor (MCA – Motor Circuit Analysis)

A Análise do Circuito do Motor é uma técnica que vem sendo utilizada desde 1985 e emprega uma série de testes de baixa tensão para a detecção e monitoramento de falhas em motores e/ou estatores bobinados desenergizados. O teste é realizado de forma comparativa, ou seja, comparando uma bobina (ou fase) contra outra. De acordo com [8], os testes que basicamente compõem esta técnica são:

- Ø Medição de resistência;
- Ø Medição da impedância;
- Ø Medição da indutância;
- Ø Medição do ângulo de fase;
- Ø Medição da resposta de corrente/frequência;
- Ø Medição da resistência de isolamento.

O ensaio considera que a maioria dos motores possui uma distribuição homogênea de 120° elétricos entre as fases e que as fases da fonte de tensão igualmente possuem uma defasagem de 120° elétricos. Desta forma, em cada fase quando a tensão aumenta, a corrente aumenta proporcional e igualmente em cada fase, e é limitada devido à impedância do circuito do motor, conforme a figura a 3.1.

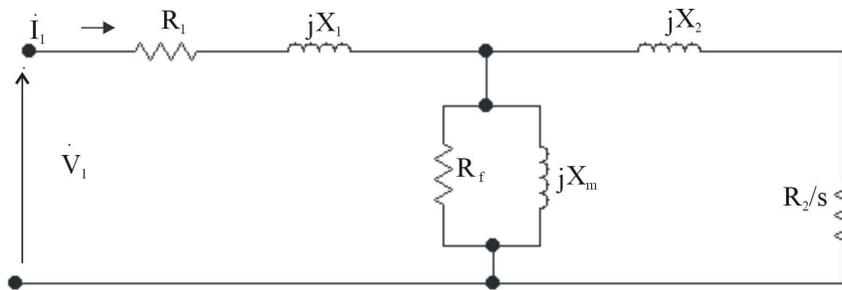


Figura 3.1 – Modelo do circuito equivalente do motor.

Onde  $V_1$  representa a tensão fase-neutro do estator,  $I_1$  representa a corrente de fase no estator,  $R_1$  representa a resistência do enrolamento do estator,  $jX_1$  representa a reatância de dispersão do estator,  $R_f$  representa a resistência causada pelas perdas no núcleo,  $jX_m$  representa a reatância de magnetização,  $jX_2$  representa a reatância de dispersão do rotor e  $R_2$  representa a resistência do rotor e  $s$  representa o escorregamento do motor.

### 3.2.1 Falhas no bobinado

Quando uma falha ocorre em um estator bobinado devido ao desenvolvimento de um curto-circuito, contaminação do bobinado ou dano severo nas chapas de aço, ele afeta as propriedades elétricas do sistema isolante.

Caso a falha seja no bobinado, mudanças na capacitância ou resistência causarão um problema reativo devido a mudanças na construção do sistema isolante. Por instantes, um curto-circuito em desenvolvimento, que modifica o sistema isolante causa mudanças na capacitância devido às mudanças na forma como os dipolos são excitados. Como resultado, há alterações na forma como o isolamento reage naquela área, causando variações na reatância e aquecimento, pois força o isolamento a se polarizar com um potencial mais elevado. A contaminação do bobinado também causa mudanças na resistência e nas reatâncias capacitivas entre as superfícies isolantes. Esta contaminação pode ocorrer devido à presença de pedaços de chapas do estator que ficam presos nas ranhuras dos estatores, óleos utilizados nas máquinas que inserem os materiais isolantes no estator, pequenos pedaços de ferro fundido que acabam caindo dentro do estator bobinado durante o processo de usinagem e a umidade.

Até certo valor de tensão, a maioria dos defeitos não se torna aparente até que uma mudança distinta ocorra, que pode ser representada por um desbalanceamento severo na corrente, vibração ou um curto-circuito, com tensões equilibradas aplicadas no motor. No caso da contaminação do bobinado, o resultado final é o mesmo que um curto-circuito entre espiras ou contra a massa.

Como resultado, enquanto as falhas ocorrem devido à deterioração térmica, contaminação, absorção de umidade ou por outras causas, a impedância do circuito mudará de forma pouco significativa no início e de maneira drástica durante o progresso da falha [8].

### 3.2.2 Métodos tradicionais do teste

A maioria dos métodos tradicionais de teste necessita da aplicação de uma tensão significativa para funcionar. O propósito é estressar o sistema isolante forçando a reação dos dipolos ou para forçar um potencial por uma falha resistiva ou capacitiva. A seguir, apresenta-se uma descrição breve dos ensaios que normalmente compõem o método MCA.

#### a) Medição de Resistência

A medição da resistência utiliza uma baixa tensão DC (tensão contínua) e uma ponte de Wheatstone ou Kelvin. O principal propósito é detectar conexões com alta resistência (mal feitas), conexões abertas e curtos-circuitos que apresentem grande variação de resistência elétrica.

#### b) Resistência de isolamento (Megôhmetros)

Consiste na aplicação de uma tensão DC entre os condutores do motor e a terra, resultando em uma corrente de fuga que atravessa o isolamento. Este valor é convertido em resistência usando equipamentos chamados Megôhmetros. Como neste teste os dipolos do isolamento são excitados apenas em DC, é necessário algum tempo para que eles se polarizem. As normas normalmente indicam um tempo de carga de um minuto [8]. A resistência de isolamento é diretamente afetada pela temperatura e umidade.

### c) Índice de Polarização (IP)

É executado para medir quantitativamente a habilidade do isolamento em se polarizar. Quando um isolante se polariza, os dipolos elétricos distribuídos no isolante se alinham com o campo elétrico aplicado. Como as moléculas se polarizam, uma corrente de polarização (também chamada de corrente de absorção), é desenvolvida e adicionada à corrente de fuga. O índice de polarização geralmente é efetuado na mesma tensão do teste de resistência de isolamento e leva 10 minutos para ser completado [8]. O valor IP é calculado dividindo-se o valor da resistência de isolamento obtido em 10 minutos pelo valor da resistência de isolamento obtido em 1 minuto. Em geral, isolamentos em boas condições apresentarão altos valores IP, enquanto baixos valores IP representarão isolamentos danificados ou comprometidos. Em alguns casos, deve-se tomar algum cuidado com testes de motores com novos e modernos materiais de isolamento que não polarizam e que apresentarão, portanto, baixa corrente de polarização e conseqüente baixo valor IP. Nota-se que nesse caso, apesar do IP ser baixo, o isolamento pode perfeitamente estar adequado, conforme é discutido na norma IEEE 43-2000.

### d) Resposta de corrente/frequência

A análise da resposta de corrente/frequência ocorre através do percentual de redução de corrente como resultado direto da duplicação da frequência aplicada. Ao duplicar a frequência, tem-se uma alteração nas propriedades eletromagnéticas das bobinas, fazendo com que a corrente flua próxima à superfície dos condutores (efeito pelicular). A impedância resultante se altera baseada na capacitância do circuito, causando uma diferença no valor da corrente em relação ao valor original. A divisão deste valor reduzido de corrente pela corrente original fornece o percentual de redução [9].

## 3.2.3 Técnicas de avaliação utilizando MCA

Os aparelhos modernos que executam o método de análise do circuito do motor utilizam uma baixa tensão de saída senoidal para excitar os dipolos do sistema de isolamento. Existem vários pontos positivos nesta abordagem: o tamanho e a tensão da máquina testada não interferem; critérios específicos do tipo "passa/não passa" podem ser aplicados para comparações entre fases e a tendência de degradação pode ser verificada ao longo do tempo, pois a repetição destas medições não causa qualquer efeito adverso para a

condição existente do isolamento [8]. A Análise do Circuito do Motor permite detectar os seguintes tipos de falhas no estator:

a) Detecção de contaminação do bobinado

Segundo [8], a contaminação do bobinado causa pequenas alterações na capacitância do circuito, sendo que em muitos casos ela acaba aumentando, causando uma redução na impedância [9].

O resultado, de acordo com [8], é que ao utilizar uma frequência de saída relativamente baixa e senoidal, a impedância da fase que possui os efeitos capacitivos da contaminação ou absorção de água é composta principalmente da parcela indutiva, alterando o ângulo de fase.

b) Sobreaquecimento das bobinas

O sobreaquecimento das bobinas, assim como a contaminação destas, também causa alterações na capacitância, porém neste caso a capacitância pode diminuir causando aumento da impedância em uma ou mais fases. Outra diferença do sobreaquecimento em relação aos efeitos da contaminação no material isolante é que o isolamento acaba sendo termicamente degradado, causando aumento na resistência da ação dos dipolos.

c) Curto-circuito nas bobinas

Um dos pontos chaves do teste MCA é que a medição da indutância não é utilizada como um único método para a detecção de curtos-circuitos. Em vez disto, dois parâmetros de medição específicos são utilizados de forma combinada para determinar o tipo e a severidade do defeito. Os parâmetros a serem medidos são: o ângulo de fase do circuito e a redução de corrente como resultado direto da duplicação da frequência aplicando o método de resposta da corrente/frequência. Quando um defeito ocorre nas bobinas, este altera a capacitância efetiva do circuito, afetando diretamente o defasamento entre as tensões e as correntes, as quais são relativamente baixas. Quanto há defeito, a capacitância aumenta, reduzindo o ângulo de fase. Uma vez que a falha se torna mais severa, começará também a afetar as demais fases. Isto normalmente ocorre quando o defeito está localizado em uma bobina ou entre bobinas da mesma fase. Uma pequena mudança na capacitância do circuito pode ser detectada, permitindo a detecção de curto-circuito entre espiras [8].

Um segundo método de detecção de curtos-circuitos utiliza a relação de corrente, similar ao método de resposta de frequência utilizado para testes de transformadores. Entretanto, a corrente é medida em baixa tensão, então a frequência é exatamente duplicada e um percentual de redução na corrente é produzido. Quando a frequência é dobrada, pequenas alterações na capacitância entre espiras ou entre fases são amplificadas, causando uma mudança no percentual de redução da corrente quando comparado com as demais fases.

Segundo [8], a combinação da avaliação das alterações no ângulo de fase e na resposta da frequência da corrente permitirá a detecção de curtos-circuitos e o tipo de curto-circuito em qualquer tamanho de máquina, tanto nos estatores quanto nos motores.

### 3.3 Teste de surto (impulso)

O teste de surto de tensão, também conhecido como teste de impulso de tensão, é normalmente utilizado para testar bobinas ou estatores bobinados novos durante o processo de fabricação ou para a detecção de falhas existentes em uma máquina antes de uma manutenção ou reparo, no que diz respeito ao isolamento tanto entre espiras quanto em relação à massa. Assim como o ensaio de rigidez dielétrica, o teste de surto pode ser utilizado como um teste do tipo passa/não passa. Tem sido utilizado também para simular os esforços que um enrolamento pode sofrer durante as condições de operação.

A norma IEEE 522-1992 (Guide for Testing Turn-to-turn Insulation on Form-Wound Stator Coils For Alternating-Current Rotating Electric Machines) sugere que sejam submetidos a este teste também bobinas individuais e enrolamentos de máquinas rebobinadas.

Além de detectar pontos onde o isolamento encontra-se danificado ou deficiente, o teste pode detectar várias outras falhas relacionadas a diferenças no circuito indutivo do motor, como número errado de espiras ou conexões invertidas de bobinas, bem como variações no material do estator [10].

Sendo o teste de surto baseado na comparação de formas de onda resultantes de um pulso de tensão, as bobinas a serem testadas devem apresentar características idênticas quanto à espessura do isolamento, comprimentos das espiras, disposição no estator e quantidade de conexões em paralelo ou série. Diferenças nestas características podem levar à discrepância nas formas de onda e a interpretações errôneas dos resultados do teste.

Também pode ser difícil a detecção de falhas em circuitos paralelos com mais de 10 (dez) bobinas, uma vez que uma única espira de uma bobina representaria pouca variação na impedância total do circuito [10]. De maneira geral, o teste apresenta uma capacidade de detecção de aproximadamente 1 (uma) espira curto-circuitada em 100 (cem), obviamente variando de acordo com a disposição e características do enrolamento e tecnologia de medição empregada. Assim, quanto mais espiras apresentar uma bobina, mais difícil é a detecção de falhas. Da mesma maneira, quanto mais bobinas em paralelo contiver o circuito, mais subjetiva será a avaliação da presença ou não de uma falha [10]. Isso requer uma experiência maior por parte do encarregado dos testes para evitar rejeições ou aceitações indevidas.

Com o advento de novas tecnologias na fabricação de equipamentos de teste, as limitações acima citadas tendem a ser superadas ou atenuadas com a evolução das técnicas e equipamentos de medição. Assim, com o uso de um bom equipamento e métodos matemáticos adequados, pode-se tornar o teste mais sensível a determinados tipos de falhas em que se tenha especial interesse, possibilitando a determinação de níveis específicos de qualidade desejada ou necessidades de processo [10].

### 3.3.1 Descrição do teste

O teste de surto é realizado, de uma maneira geral, aplicando-se um pulso de tensão ao enrolamento por um período muito curto, fazendo com que pontos onde o isolamento é deficiente sejam detectados. Isso é obtido através da descarga de um capacitor diretamente no circuito indutivo do motor (vide Figura 3.2). A resposta a este pulso é da forma de uma senóide amortecida (vide Figura 3.3).

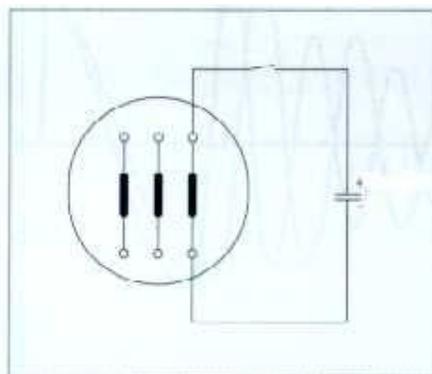


Figura 3.2 – Conexão ao enrolamento [11].

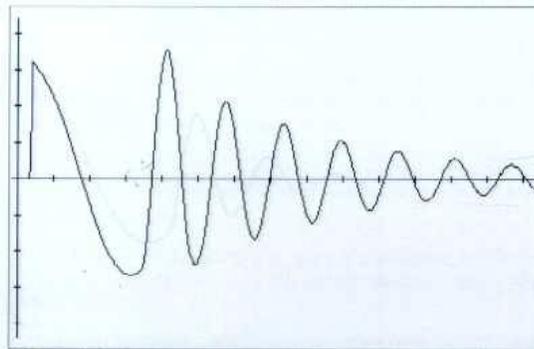


Figura 3.3 – Curva de tensão típica obtida no teste de surto de um motor aprovado [11].

Como este pulso tem um tempo de subida curto (da ordem de 0,2 microssegundos), é garantida uma alta tensão entre as espiras ao longo do enrolamento, o que permite avaliar o isolamento entre espiras. Devido ao fato de que o impulso de tensão percorre o enrolamento como uma onda, é criada uma tensão entre espiras durante um tempo extremamente curto. Por esta razão, o teste de surto não é um teste destrutivo ao motor, ao contrário do teste de rigidez dielétrica (*hipot*).

Atualmente, a maioria dos equipamentos utilizados para o teste de surto aplica um pulso simultaneamente a dois enrolamentos, como por exemplo, duas fases de um motor trifásico, comparando por superposição as formas de onda resultantes através de um osciloscópio ou monitor de vídeo. Pode-se, em casos de motores com características elétricas e construtivas idênticas, e produzidos em larga escala, utilizar um enrolamento padrão como referência para a comparação entre as formas de onda. Por exemplo, caso os dois enrolamentos estejam em concordância, isto é, suas impedâncias bastante próximas, o que equivale a não terem defeitos, as duas formas de onda ficarão sobrepostas. Qualquer discrepância entre as formas de onda indica uma possível falha no isolamento de um dos enrolamentos.

A cada tipo de discrepância corresponde uma determinada falha, o que pode ser evidenciado analisando-se as características da forma de onda no que diz respeito à amplitude, frequência e decaimento. Normalmente, tabelas contendo as possíveis formas de onda são providenciadas pelo fabricante do equipamento, visando orientar os operadores na identificação das falhas.

### 3.4 Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA)

A análise da assinatura de corrente do motor tem sido considerada um dos métodos mais promissores de detecção de falhas, permitindo detectar vários tipos de defeitos, entre eles curtos-circuitos e problemas relacionados com a excentricidade dos componentes, sem a necessidade de desmontar as máquinas ou suas partes estruturais.

O método se baseia na aquisição da corrente nominal do estator, que pode ser adquirida com simples equipamentos de medição durante a operação normal da máquina, e na transformação deste sinal, que se encontra no domínio do tempo, para o domínio da frequência utilizando um algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Através da decomposição espectral da corrente nominal do estator é possível identificar alguns componentes específicos de frequência que indicam uma falha iminente ou uma possível degradação da máquina.

Conforme citado por [12] e [13], as falhas relacionadas a curtos-circuitos possuem componentes específicas no espectro de frequência da corrente do estator, sendo que estas frequências são descritas pela equação (1).

$$f_{cc} = f_f \times \left[ k \pm \frac{n}{p} \times (1 - s) \right] \quad (1)$$

Onde  $f_{cc}$  é a frequência relacionada ao curto-circuito (Hz),  $f_f$  é a frequência fundamental (Hz),  $k$  é a ordem do harmônico de frequência,  $n$  é um número inteiro,  $p$  é o número de pares de pólos e  $s$  é o escorregamento.

Os autores da referência [12] demonstram em seus trabalhos que este método possibilita a detecção de curtos-circuitos tanto em máquinas com carga acoplada como em máquinas sem carga acoplada. A referência [12] ainda chega a apresentar de forma simplificada o sistema de diagnóstico e o diagrama de blocos para determinação do espectro da corrente, conforme as Figuras 3.4 e 3.5, respectivamente.

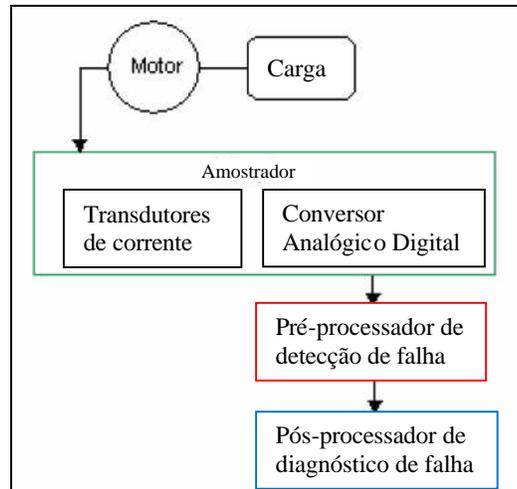


Figura 3.4 – Sistema simplificado de diagnóstico do método MCSA [12].

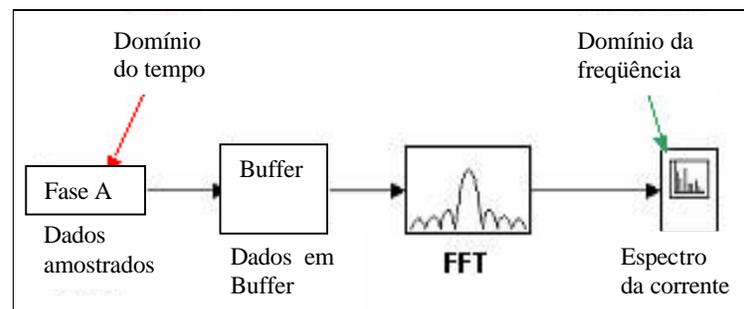


Figura 3.5 – Diagrama de blocos para obtenção do espectro de frequência da corrente [12].

Analisando os resultados apresentados pelos autores em [12] e [13], pode-se observar que em ambos os casos foram detectadas alterações significativas nos espectros de frequência. A referência [14] também descreve a utilização de MCSA na detecção de falhas e, como parte da conclusão, também cita que os curtos-circuitos da máquina causaram um aumento substancial na amplitude das componentes harmônicas.

As Figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 mostram resultados comparativos, realizados por [12], entre o espectro de frequência de um motor que não possui curto-circuito entre espiras e espectros de frequência de motores que possuem curto-circuito entre espiras. A Figura 3.6 mostra o espectro de frequência de um motor sem carga e sem curto-circuito entre espiras, onde se visualiza a contribuição da fundamental em 60Hz. As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 apresentam, respectivamente, o espectro de frequência da corrente de um motor sem carga com 4%, 16% e 32%, respectivamente, das espiras curto-circuitadas. Percebe-se que

quanto maior for a quantidade de espiras curto-circuitadas, maior é o aumento na amplitude das harmônicas laterais à frequência de 60Hz.

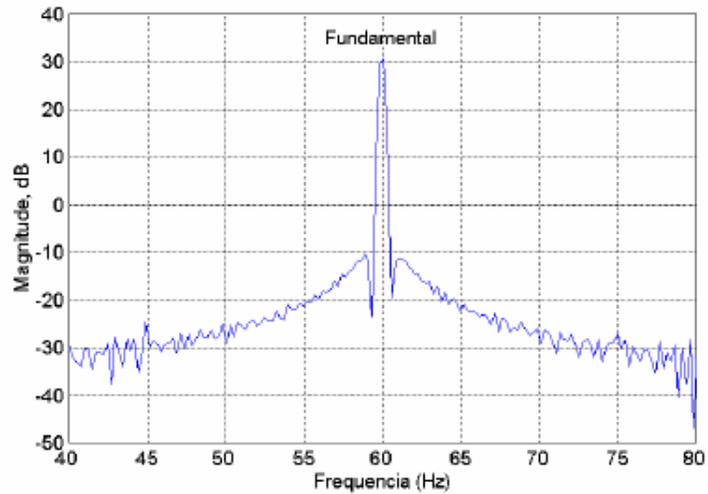


Figura 3.6 – Espectro de frequência da corrente de um motor sem carga e sem curto-circuito entre espiras [12].

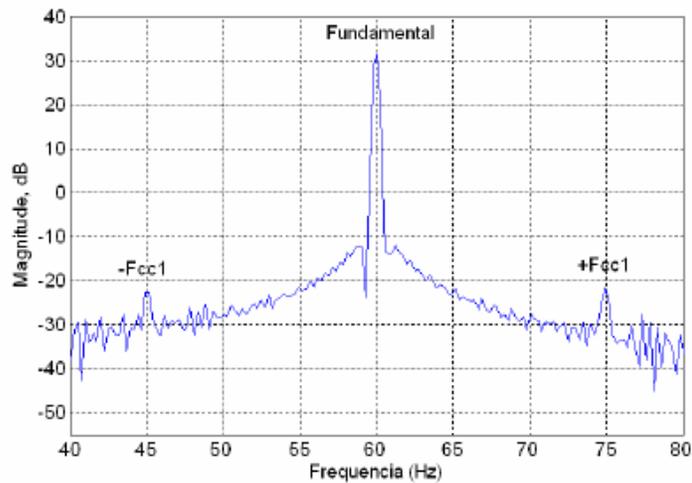


Figura 3.7 – Espectro de frequência da corrente de um motor sem carga e com 4% das espiras curto-circuitadas [12].

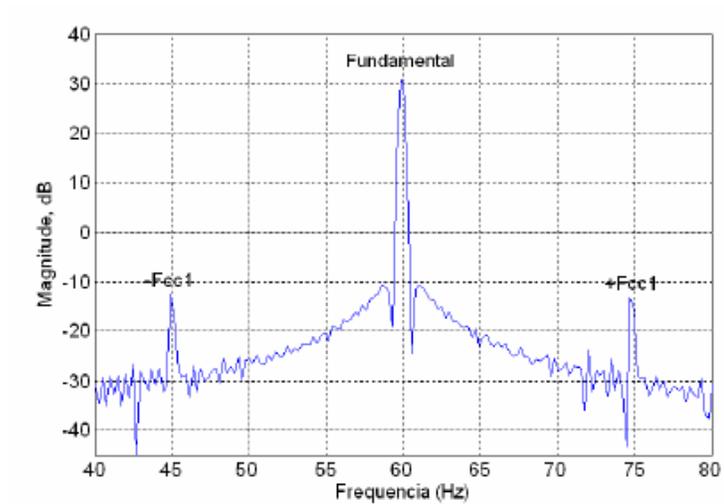


Figura 3.8 – Espectro de frequência da corrente de um motor sem carga e com 16% das espiras curto-circuitadas [12].

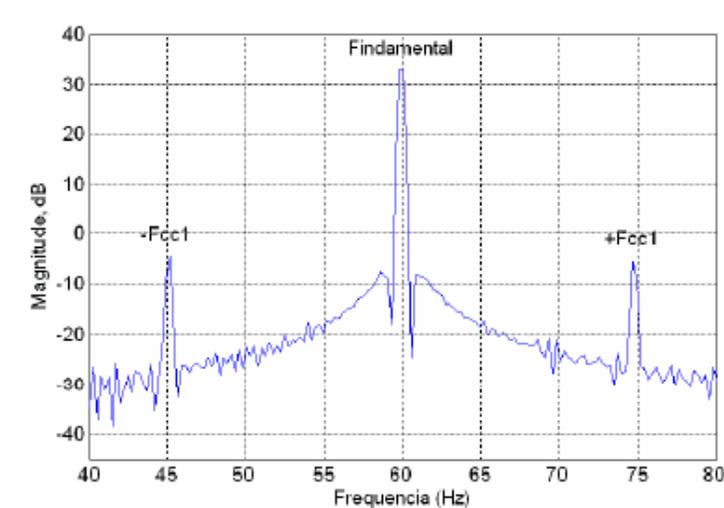


Figura 3.9 – Espectro de frequência da corrente de um motor sem carga e com 32% das espiras curto-circuitadas [12].

A referência [14] destaca em sua conclusão que é difícil descobrir qual o percentual de aumento da amplitude das componentes das harmônicas devido a estas também terem sido afetadas pela saturação magnética dos dentes do rotor.

Apesar dos trabalhos citados anteriormente demonstrarem bons resultados na análise e detecção de falhas, tanto [12], que descreve alguns problemas na diferenciação das falhas originadas por curto-circuito das falhas originadas por excentricidade, quanto [15] descrevem algumas dificuldades na aplicação desta técnica. Este último chega a

sugerir algumas modificações no método MCSA de forma a tornar mais evidente algumas componentes da corrente do motor.

Como parte da evolução deste método, pode-se destacar o estudo descrito por [12], que combina a metodologia MCSA com lógica Fuzzy para detecção de falhas em máquinas elétricas.

### 3.5 Análise do campo magnético externo

Conforme apresentado por [16], a análise do campo magnético externo é baseada no cálculo da densidade do fluxo no entreferro, que é a origem do campo magnético radial externo. Segundo este, o conteúdo espectral da densidade de fluxo no entreferro pode ser identificado como o gerado pelas correntes do estator sem carga.

O curto-circuito entre espiras gera componentes de densidade de fluxo que não existem em uma máquina que não contenha a falha. Segundo [16], estas componentes são criadas pelo rotor e como não são anuladas pela densidade de fluxo do estator, acabam criando novas linhas de espectro.

A referência [16] considera que a corrente que flui pelas espiras do curto-circuito é a soma da corrente da fonte com a corrente de curto-circuito, que é gerada pelas novas linhas de campo magnético.

O campo magnético externo é medido em [16] com uma bobina externa, a qual é utilizada como sensor de fluxo, sendo que os ensaios foram realizados sem carga. Os dados adquiridos são demonstrados de forma comparativa em relação a um estator sem curto-circuito, em análise de frequência, e demonstram um sensível aumento na amplitude de algumas componentes do espectro, principalmente na faixa de 750Hz e 850Hz, conforme as figuras 3.10 e 3.11. A Figura 3.10 mostra o espectro de frequência do campo magnético externo de um motor sem espiras em curto-circuito e a Figura 3.11 mostra o espectro de frequência do campo magnético externo de um motor com espiras curto-circuitadas, sendo que as frequências de 750Hz e de 850Hz representam a primeira harmônica de ranhura na máquina utilizada no teste.

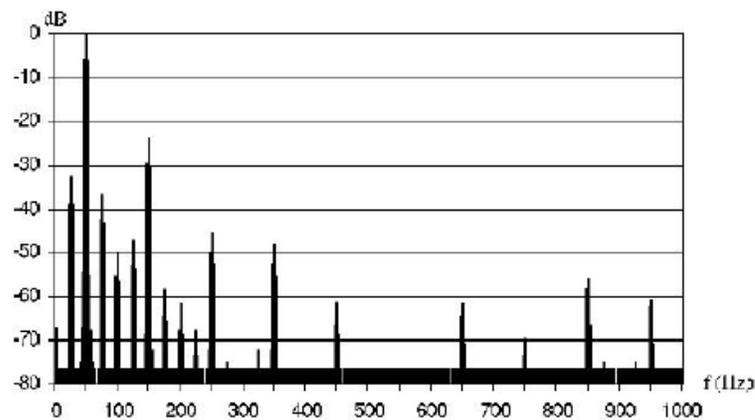


Figura 3.10 – Espectro de frequência do campo magnético externo de um estator sem curto-circuito entre espiras [16].

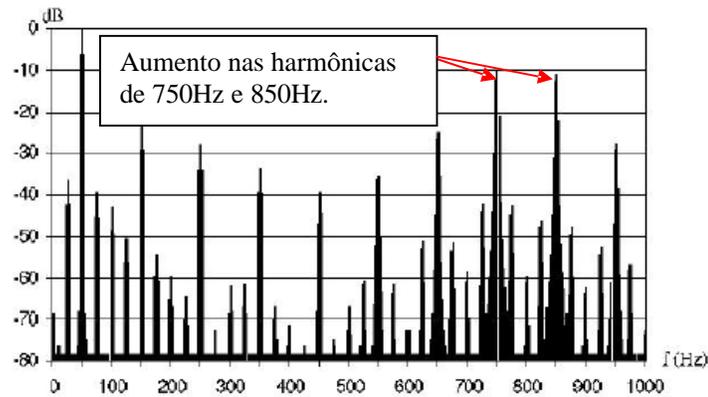


Figura 3.11 – Espectro de frequência do campo magnético externo de um estator com curto-circuito entre espiras [16].

Em seu estudo, a referência [16] também demonstra que o espectro de frequência apresenta variações de acordo com a posição do curto-circuito.

### 3.6 Descargas Parciais

O teste de descargas parciais possui um guia de diagnóstico IEEE relativamente novo, entretanto, é cada vez mais comum encontrar equipamentos com este tipo de teste, que vem sendo utilizado com bastante frequência para detectar falhas no isolamento dos motores. O guia de diagnóstico IEEE 1434 foi lançado em 2000 e descreve que o teste pode ser realizado com motores e/ou estatores em funcionamento ou não. O teste de descargas parciais mede diretamente as correntes resultantes de uma descarga parcial no

bobinado. Qualquer processo de falha que crie descargas parciais pode ser detectado com este método. Entretanto, conforme [17], este é mais indicado para estatores bobinados com tensão nominal maior ou igual a 2300V.

Conforme descrito na norma IEEE 1434, existe um grande número de métodos de testes [17]:

- a) Teste de descargas parciais off-line no estator para quantificar a atividade das descargas parciais;
- b) Ponta de teste TVA (corona) para localizar as descargas parciais;
- c) Ponta de teste ultrasônica para localizar as descargas parciais;
- d) Imagem ultravioleta ou de Blackout para localizar as descargas parciais;
- e) Teste on-line de descargas parciais para quantificar as descargas parciais enquanto o motor esta em funcionamento normal.

Os quatro primeiros métodos são realizados com o motor ou estator desconectado da fonte de alimentação, enquanto que o ultimo é realizado durante a operação normal do motor. Entretanto, é necessária uma avançada avaliação técnica ou utilização de proteções contra interferências para se assegurar que o ruído elétrico não cause uma falsa indicação de falha [17].

Muitos estatores bobinados apresentam descargas parciais como um sintoma de que contém algum tipo de defeito. Basicamente, o fenômeno é descrito conforme a seguir: quando uma descarga parcial ocorre, há um fluxo muito rápido de elétrons de um lado do gás que preenche a falha no isolamento para o outro lado. Como os elétrons estão se movendo perto da velocidade da luz em uma pequena distância, o pulso tem uma duração muito curta, sendo de tipicamente alguns nanosegundos. Como os elétrons carregam uma carga, cada descarga individual cria uma corrente de pulso. Adicionado ao fluxo de corrente do elétron, existe um fluxo de íons positivos, criados quando os elétrons são ionizados pelas moléculas de gás, na direção inversa.

Na Figura 3.12, conforme [18], pode-se ver a evolução da deterioração do material isolante causada pelas descargas parciais. Na primeira figura da esquerda para a direita, nota-se que a superfície irregular com pontas cria um elevado campo elétrico que ioniza o ar ao redor, gerando as descargas parciais. A figura central mostra que uma contaminação adicional da superfície ou umidade cria um caminho para a fuga da corrente para a terra. O aumento de temperatura causado pela fuga de corrente evapora a umidade, criando pequenos espaços vazios. A corrente que estava fluindo é interrompida por estes pequenos

espaços vazios. A figura da direita mostra que, como a superfície restante ainda está condutiva, a maioria da queda de tensão será aplicada para secar a superfície gerando um arco por ela. O arco da descarga parcial ocorre na região do ar ionizado, queimando o material isolante, criando um caminho permanente de carbono. As novas pontas criadas são ainda mais finas e o processo continua até a falha [18].

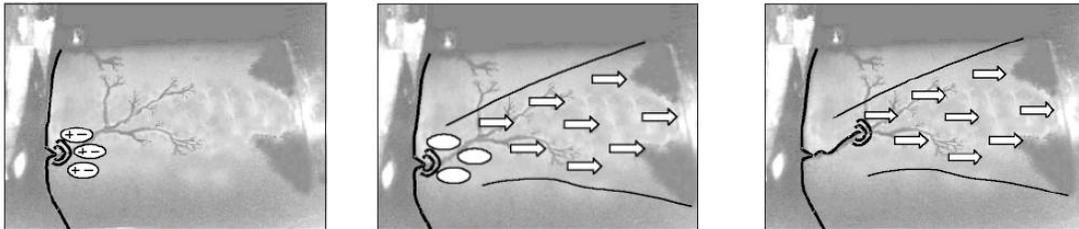


Figura 3.12 – Evolução da deterioração do isolamento provocada pelas descargas parciais [18].

A Figura 3.13 mostra as possíveis localizações das descargas parciais, considerando que elas podem ocorrer devido a espaços vazios entre o isolamento e o condutor de cobre, espaços vazios dentro do material isolante ou espaços vazios entre o material isolante e as chapas. A Figura 3.14 mostra uma situação específica das descargas parciais, quando estas ocorrem na superfície do material isolante, devido à contaminação do mesmo.

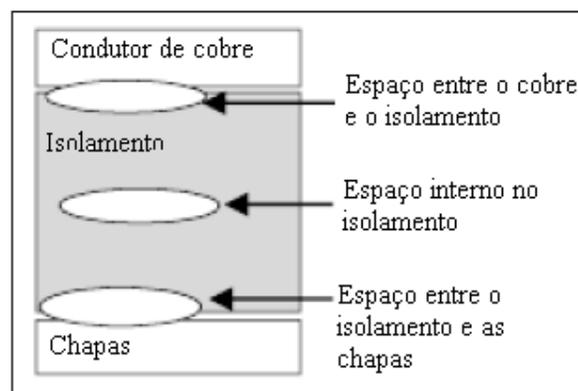


Figura 3.13 – Possíveis localizações dos espaços vazios no sistema de isolamento [18].

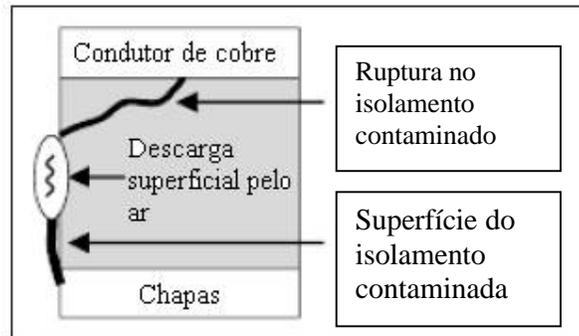


Figura 3.14 – Descargas parciais superficiais [18].

Cada corrente de pulso das descargas parciais se origina em uma parte específica do bobinado. A transformada de Fourier dos pulsos de corrente gera frequências de algumas centenas de megahertz e um equipamento que consiga operar em altas frequências pode detectar estas correntes. Em um teste de descargas parciais nas bobinas, o método mais comum para detectar as correntes das descargas parciais é utilizar um capacitor de alta tensão conectado aos terminais do estator, com capacitância típica entre 80pF e 1000pF [17]. O capacitor é uma impedância muito alta para a alta tensão AC e uma impedância muito baixa para as correntes de pulso das descargas parciais de alta frequência. A corrente do pulso originada pela descarga parcial que passa pelo capacitor criará um pulso de tensão na resistência ou malha indutiva/capacitiva, que pode ser demonstrada em um osciloscópio ou analisador de espectro de frequência.

Alguns pulsos originados pelas descargas parciais podem ser maiores do que outros, sendo que em geral a magnitude do pulso é proporcional ao tamanho do espaço vazio onde a descarga parcial ocorreu. Conseqüentemente, quanto maior for o pulso da descarga parcial, maior será a falha que originou a descarga.

A principal medição em teste de descargas parciais é a magnitude do pico da descarga parcial, que pode ser medido nas unidades abaixo:

- a) picoCoulomb (pC) no caso de um equipamento de descargas parciais de laboratório for utilizado. A unidade pC representa o número aparente de elétrons que estava envolvido em cada descarga;
- b) milivolt (mV), onde a magnitude das descargas parciais é medida com um osciloscópio ou analisador eletrônico de magnitude de pulso (electronic pulse magnitude analyzer –

PMA). Um PMA conta o número de pulsos de descargas parciais para cada de range de magnitude;

c) miliampere (mA) se os pulsos de descarga parcial forem medidos com um transformador de alta frequência e visualizados em um osciloscópio;

d) decibel (dBm) se um analisador de espectro de frequência for utilizado, gravando os pulsos.

A magnitude da descarga parcial detectada nos terminais do estator e causada por uma descarga parcial nas bobinas depende um grande número de fatores, tais como:

a) Tamanho da falha: em geral, quanto maior for o volume da falha, maior será o pulso detectado;

b) Capacitância do bobinado: se o bobinado tiver uma grande capacitância, a impedância para a terra será muito pequena em altas frequências. A maioria dos pulsos de corrente das descargas parciais é imediatamente curto-circuitada para a terra, havendo pouca corrente para sensibilizar e ser detectada nos terminais do estator;

c) Indutância entre o local da descarga parcial e o equipamento detector: o pulso será atenuado enquanto se propaga pelo bobinado até o terminal. Em geral, quanto mais longe for o local da descarga parcial do equipamento detector, menor será magnitude detectada nos terminais da máquina.

Os efeitos descritos anteriormente dificultam a definição de que uma grande magnitude nas descargas parciais indica que o bobinado possui uma séria deterioração [17]. O teste de descargas parciais é um teste comparativo e pode determinar qual fase possui maior pico de descargas parciais e, por conseqüência, maior degradação. Utilizando várias máquinas similares entre si, pode-se comparar o mesmo estator ou motor ao longo do tempo, sendo que em geral, se as descargas parciais dobrarem a cada seis meses, a degradação está aumentando [17].

De acordo com [17], estudos mostram que até dez mil pulsos de descargas parciais podem ocorrer por segundo em um estator e que um único defeito produz pelo menos um ou dois pulsos por meio ciclo. Caso apenas poucas centenas de pulsos de descargas parciais ocorram por segundo, então existem apenas alguns locais onde ocorrem descargas

parciais. Se o número alcançar, por exemplo, dez mil pulsos por segundo, a deterioração estará espalhada por vários locais do bobinado [17].

Caso exista um mecanismo predominante de deterioração em um bobinado, o teste de descargas parciais pode, às vezes, identificar de forma aproximada o local da deterioração, conforme as situações abaixo [17]:

- Ø Caso os pulsos positivos das descargas parciais sejam predominantes, então é possível dizer que as descargas parciais estão ocorrendo na superfície da bobina;
- Ø Caso os pulsos negativos das descargas parciais sejam predominantes, então as descargas parciais estão ocorrendo no cobre;
- Ø Caso não haja predominância na polaridade, então as descargas parciais estão entre as camadas dos isolantes de fundo de ranhura.

Apesar de se encontrar vários artigos descrevendo que o teste se aplica principalmente a máquinas com tensão nominal maior ou igual a 2300V, alguns autores, tal como [17], indicam que o teste tem se tornado muito importante para motores de baixa tensão devido à crescente utilização de inversores de frequência. Estes inversores utilizam pulsos de tensão do tipo PWM gerando picos de tensão que podem acabar causando descargas parciais.

### 3.7 Considerações finais

Apresentou-se neste capítulo alguns dos principais tipos de testes de detecção de falhas em estatores bobinados. Dentre os testes descritos, deve-se destacar que apenas alguns deles atendem ao critério definido no início deste trabalho, que era detectar curto-circuito entre espiras em estatores bobinados durante o processo de fabricação dos mesmos. Dentre os testes descritos acima, os que possibilitam este tipo de detecção são:

- Ø Análise do Circuito do Motor;
- Ø Teste de surto;
- Ø Descargas parciais.

A WEG Motores possui equipamentos que realizam o segundo e o terceiro tipos de teste, entretanto, o terceiro ensaio é mais utilizado para detectar curto-circuito nos estatores bobinados.

#### **4. EQUIPAMENTOS COMERCIAIS DE DETECÇÃO DE CURTO - CIRCUITO ENTRE ESPIRAS**

Este capítulo trata dos equipamentos comerciais utilizados na detecção de curto-circuito entre espiras em estatores de máquinas elétricas. Devido à ampla gama de testes para verificar as condições dos motores e/ou estatores bobinados, encontra-se também uma ampla lista de equipamentos e fornecedores, o que possibilita aos clientes escolher os equipamentos que possuam melhor relação custo/benefício, sem prejuízo em relação à qualidade dos testes.

A WEG possui uma grande diversidade de tipos de máquinas elétricas, sendo que estas são submetidas a diversos testes de acordo com suas características. Os estatores dos motores elétricos de baixa tensão podem ser submetidos aos seguintes tipos de testes:

- Ø Verificação de resistência;
- Ø Tensão aplicada AC (Hipot AC);
- Ø Tensão aplicada DC (Hipot DC);
- Ø Teste de surto;
- Ø Verificação de resistência de isolamento;
- Ø Teste de descargas parciais;
- Ø Sentido de rotação.

Foi verificado pelos técnicos da empresa WEG que, dos testes citados acima, o que apresenta melhor resultado na detecção de curto-circuito entre espiras nos motores de indução de baixa tensão é o teste de surto. A seguir, estão descritos os equipamentos de teste de surto disponíveis na WEG e alguns equipamentos disponíveis no mercado de acordo com o tipo de ensaio que realizam.

##### **4.1 Equipamentos de Teste de Surto Disponíveis na WEG**

Os equipamentos de teste de surto disponíveis na WEG são fabricados pelas empresas Schleich, Baker, Acematic e PJ Electronics.

#### 4.1.1 Schleich

A empresa Schleich, fundada há mais de cinquenta anos, está sediada na cidade alemã de Hemer e é especializada em equipamentos de testes utilizados em motores elétricos. A empresa possui uma ampla gama de equipamentos de testes, sendo que destes a WEG utiliza os painéis de testes MTC3 DSP1000. Estes painéis permitem a realização dos seguintes testes:

- Ø Medição de resistência;
- Ø Tensão aplicada (Hipot) AC;
- Ø Tensão aplicada (Hipot) DC;
- Ø Verificação do sentido de rotação;
- Ø Teste de surto;
- Ø Teste de descargas parciais.

O equipamento possui módulos que estão conectados a um computador responsável pela análise e arquivamento dos dados. Antes de realizar o teste em um novo item de estator, deve ser preenchido um cadastro descrevendo as informações sobre a quantidade de cabos, a ligação na qual o estator será testado, quais serão os testes realizados e os seus respectivos valores. O teste de surto deve ser configurado conforme os valores de tensão de teste, com os métodos de análise (que serão abordados a seguir), com suas respectivas tolerâncias e com o tipo de teste, podendo este ser uma comparação com uma forma de onda padrão ou uma comparação entre as fases (ou bobinas) do estator. O equipamento possibilita o teste simultâneo das três fases dos estatores.

A forma de onda de um pulso de alta tensão aplicado em uma bobina, ou enrolamento, contém inúmeras informações a respeito da peça testada, uma vez que, variando as características da peça, alteram também as características da forma de onda. As características da forma de onda resultante são determinadas pela impedância total e pela qualidade do isolamento do enrolamento submetido ao teste. Assim, diferentes erros no enrolamento causam diferentes efeitos na forma de onda, exigindo diferentes procedimentos de análise.

Devido aos recursos eletrônicos contidos no painel em questão, estão disponíveis cinco métodos de análise que, quando combinados, proporcionam uma grande acuracidade na avaliação das possíveis falhas detectadas.

#### 4.1.1.1 Banda de tolerância de amplitude

O método mais simples, uma vez que não permite uma identificação específica da falha, consiste no estabelecimento de uma banda de tolerância em torno da forma de onda considerada padrão para a peça testada. A peça é considerada aprovada se sua forma de onda resultante estiver contida nos limites estabelecidos de variação em relação à forma padrão (vide Figura 4.1). Qualquer ponto fora destes limites conduz à rejeição. Logo, um pico ou ruído na forma de onda é interpretado como falha, podendo ser um curto-circuito ou um erro no enrolamento.

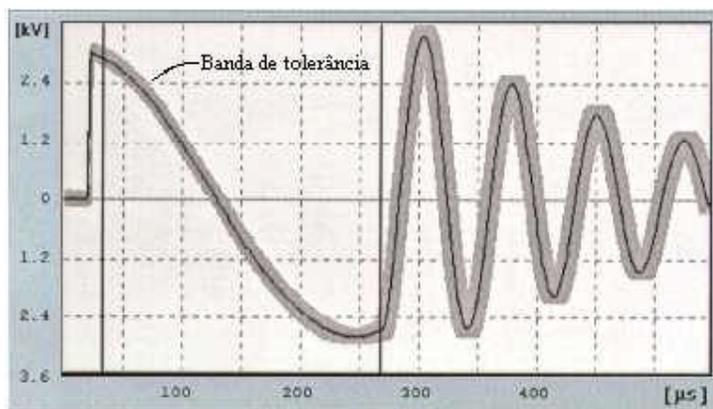


Figura 4.1 – Apresentação das bandas de tolerância de amplitude na forma de onda padrão [11].

Apesar de sua simplicidade em termos de programação e interpretação dos resultados, este método é utilizado apenas em aplicações que não necessitam de uma grande sensibilidade à falhas específicas e maiores análises. Este método é largamente utilizado como critério “passa/não passa”, uma vez que abrange as falhas mais corriqueiras (curtos-circuitos e erros de enrolamento que causam variação na amplitude da onda) e não demanda grande experiência do operador. Obviamente, a sensibilidade do ajuste da banda dependerá das características da peça avaliada e do nível de qualidade desejado, determinando o que será considerado aprovado (“passa”) ou rejeitado (“não passa”).

#### 4.1.1.2 Avaliação da frequência de oscilação (*zero crossings*)

A indutância do enrolamento em teste determina, entre outros aspectos, a frequência da sua forma de onda. Como a onda resultante tem a forma de uma senóide amortecida, podem ser contabilizadas várias passagens por zero (*zero crossings*), resultando em várias trocas de fase características para cada tipo de enrolamento (vide Figura 4.2). Isso permite que uma avaliação da frequência da forma de onda seja realizada fixando-se uma ou mais passagens por zero como referência e estabelecendo-se uma variação em torno destes pontos. Da mesma maneira que o método de tolerância de amplitude, para efeito de avaliação, qualquer ponto da onda fora destes limites resultará em uma rejeição.

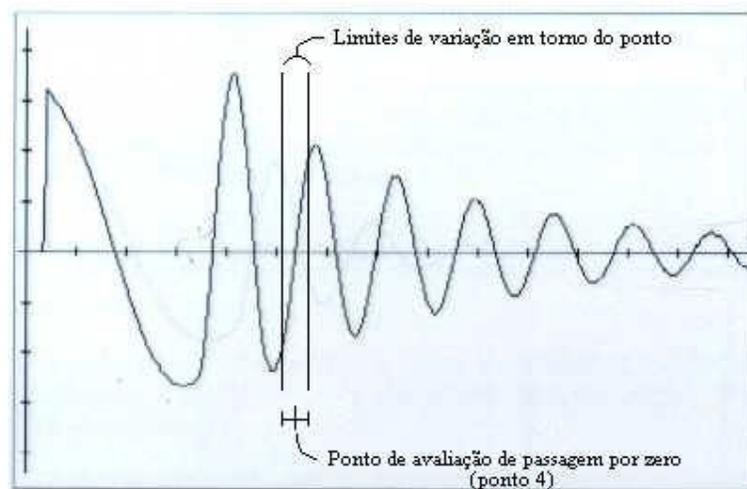


Figura 4.2 – Avaliação de frequência de oscilação (*zero crossings*) [11].

Este método também é de fácil programação e fácil interpretação dos resultados. Uma vantagem em relação ao método anterior é que, na maioria das aplicações, apenas falhas reais no enrolamento levarão a uma modificação da frequência e serão detectadas. Toda variação na indutância, como erros no número de espiras ou conexões erradas ou mal feitas, será evidenciada. Também espiras em curto-circuito levarão a uma redução na amplitude e a uma alteração da frequência, passíveis de detecção.

#### 4.1.1.3 Avaliação de erro de área

O método de avaliação de erro de área é um método bem mais complexo que os anteriores e demanda a utilização de artifícios matemáticos específicos. Consiste no cálculo da área sob a forma de onda considerada referência e na comparação do valor obtido para esta com o obtido para a forma de onda da peça em teste, expressando o erro como um valor percentual (vide Figura 4.3). Este método é muito sensível às variações na área sob a curva, mas não evidencia alterações de fase ou frequência da forma de onda. Muitas vezes, uma pequena variação na área pode estar relacionada a uma grande variação na frequência.

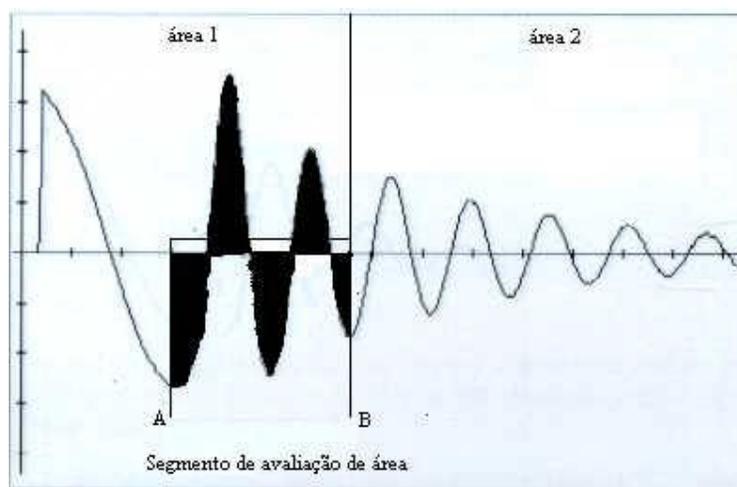


Figura 4.3 – Avaliação da área sob a forma de onda padrão [11].

Apesar disso, o método é suficientemente sensível às reduções na amplitude da onda que podem identificar espiras curto-circuitadas ou perdas aumentadas no material magnético. Isso se deve ao fato de que a modificação da área é proporcional à energia perdida no circuito.

#### 4.1.1.4 Avaliação de erro diferencial de área

Derivada do método anterior, esta avaliação baseia-se no cálculo da área formada entre a curva de referência e a curva da peça em teste, independentemente da referência de zero. A área diferencial de erro é expressa como uma porcentagem da área sob a curva de referência (vide Figura 4.4). Este método tem maior sensibilidade a alterações de frequência, uma vez que uma pequena variação na indutância do circuito leva a um erro diferencial de área significativo.

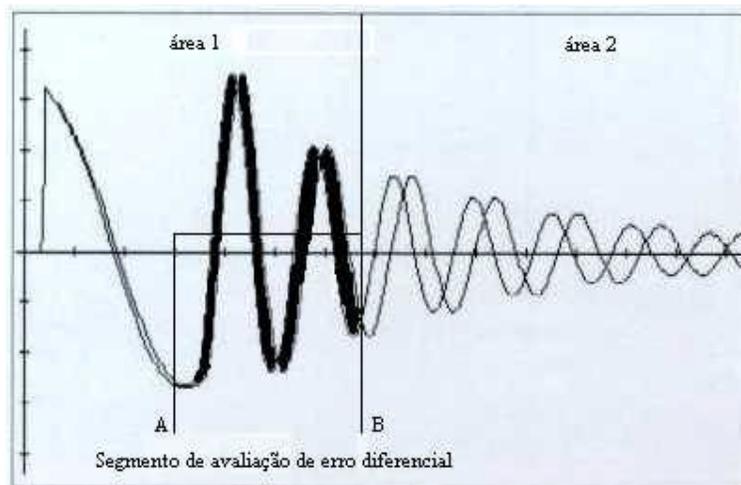


Figura 4.4 – Avaliação do erro diferencial através da área entre as formas de onda [11].

Este método pode ser utilizado para detecção de curtos entre espiras em motores com grande número de espiras ou várias bobinas em paralelo. Normalmente é utilizado em testes de bobinas de equipamentos de precisão e instrumentação.

#### 4.1.1.5 Avaliação de efeito corona

A análise de efeito corona durante a realização do teste de surto consiste em ampliar as altas frequências contidas na forma de onda e permitir sua avaliação. Estas altas frequências, visualizadas como ruído, são visíveis sob a forma de picos, pontos ou distorções ao longo da curva (vide Figura 4.5).

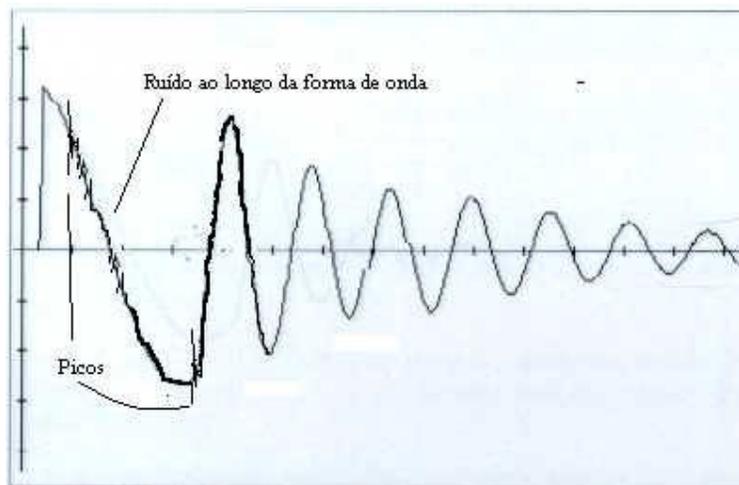


Figura 4.5 – Avaliação de efeito corona na curva [11].

A avaliação de efeito corona permite a detecção de falhas incipientes em pontos fracos do isolamento dos fios ou bobinas. O esforço causado pelo teste de surto provoca descargas relacionadas ao efeito corona e, eventualmente, às espiras curto-circuitadas (quando o isolamento está totalmente comprometido).

Este método não é sensível a falhas galvanicamente conectadas, ou seja, não são detectados curtos-circuitos francos, mas não é este o objeto da avaliação por este procedimento.

A tabela 4.1 apresenta resumidamente uma comparação entre os métodos de análise do teste de surto do painel da empresa Schleich.

Tabela 4.1 – Comparação geral entre os métodos

<b>Método</b>	<b>Tipo de falha detectada</b>	<b>Característica</b>
Banda de tolerância de amplitude	- Falhas de isolamento - Ligações erradas	Variação na amplitude da forma de onda
Avaliação da frequência de oscilação	- Falhas de isolamento - Erro no número de espiras - Ligações erradas ou mal feitas	Variação na frequência (período) da forma de onda
Avaliação de erro de área	- Curtos-circuitos entre espiras - Erro no número de espiras - Variações no circuito magnético	Variação da área sob a curva

Avaliação de erro diferencial de área	- Idem ao anterior para grande número de espiras e bobinas em paralelo. - Conexões mal feitas (mau contato)	Variação da área entre as curvas
Avaliação de efeito corona	- Pontos fracos no isolamento dos fios ou entre espiras e bobinas	"Ruído" nos períodos iniciais da curva, com picos e distorções em alta frequência

#### 4.1.2 Baker Instrument Company

A Baker Instrument Company, conforme [19], foi fundada há mais de 45 anos, está sediada na cidade americana de Fort Collins (Colorado) e é especializada no desenho, desenvolvimento e construção de sistema de teste de qualidade para motores elétricos e bobinados.

Diferentemente do equipamento citado anteriormente, o equipamento que a WEG possui deste fabricante não possui um computador central responsável pela análise e o arquivamento dos dados, tornando a análise da forma de onda totalmente manual. O equipamento possibilita apenas a aplicação do teste de surto e o "Hipot DC".

O teste de surto possui um procedimento de análise muito semelhante ao descrito anteriormente, onde os estatores são aprovados quando as formas de onda são coincidentes e rejeitados quando estas não coincidem. Este equipamento também permite a comparação entre as formas de ondas resultantes das fases ou bobinas dos estatores. Entretanto, a comparação deve ser feita entre duas fases ou bobinas de cada vez.

#### 4.1.3 PJ Electronics

Conforme [20], a PJ Electronics Inc. foi criada em 1969, está sediada na cidade americana Pittsburgh e é a líder mundial em equipamentos de teste de surto em alta tensão, estando presente em 50 países. Fornece equipamentos que, além do teste de surto, também realizam Hipot DC.

O fabricante também destaca que é o único fornecedor que utiliza tecnologia de alta frequência empregando uma chave bidirecional no dispositivo de descarga primária do surto e alega que os demais, por utilizar a chave unidirecional, devem chamar seus equipamentos de teste de impulso e não de surto. Além disso, também destaca que o ensaio pode ser realizado em motores montados, sem girar o rotor, enquanto que os demais fabricantes recomendam o teste para estatores bobinados.

O teste de surto possui o mesmo procedimento de análise descrito anteriormente, onde os estatores são aprovados quando as formas de onda são coincidentes e rejeitados quando estas não coincidem. Este equipamento também permite a comparação entre as formas de ondas resultantes das fases ou bobinas dos estatores, entretanto a comparação deve ser feita entre duas fases ou bobinas de cada vez.

#### 4.1.4 Acematic

A Acematic é uma empresa brasileira, sediada em São Paulo, que desenvolveu um equipamento próprio de teste de surto. Este equipamento não possibilita a realização do teste em uma ampla faixa de motores, como os equipamentos dos fabricantes citados anteriormente, sendo assim desenvolvidos de acordo com as necessidades do cliente.

O teste de surto possui o mesmo procedimento de análise descrito anteriormente, onde os estatores são aprovados quando as formas de onda são coincidentes e rejeitados quando estas não coincidem. Este equipamento também permite a comparação entre as formas de ondas resultantes das fases ou bobinas dos estatores, entretanto a comparação deve ser feita entre duas fases ou bobinas de cada vez.

## 4.2 Equipamentos Disponíveis no Mercado

Foram realizadas pesquisas de mercado e pôde-se observar que há uma ampla gama de fabricantes equipamentos de teste de motores e/ou estatores, que por sua vez disponibilizam uma considerável quantidade de equipamentos. Alguns destes são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Fabricantes de equipamentos de acordo com tipo de teste.

Tipos de ensaio	Fabricantes de equipamentos
Teste de surto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schleich;</li> <li>- Baker Instrument Company;</li> <li>- Acematic;</li> <li>- PJ Electronics Inc.;</li> <li>- Jenlor-Samatic;</li> <li>- SPS electronic;</li> <li>- Vettiner;</li> <li>- DAX Electronic Systems;</li> <li>- Slaughter Test System;</li> <li>- IRIS Power.</li> </ul>
MCA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- All Test Pro;</li> <li>- PdMA Corporation.</li> </ul>
ESA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PS Soluções;</li> <li>- All Test Pro;</li> </ul>
MCSA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- All Test Pro;</li> <li>- IRIS Power;</li> <li>- Pdma Corporation</li> </ul>
Descargas Parciais	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Phenix Technologies</li> <li>- HV TECHNOLOGIES</li> <li>- OMICRON</li> <li>- SCHLEICH</li> </ul>

## 5. DESENVOLVIMENTO DE TESTES

Após a realização do estudo bibliográfico e o levantamento dos equipamentos disponíveis na empresa WEG, fez-se a avaliação das alternativas descritas no capítulo metodologia de detecção. Os testes foram selecionados de acordo com o objetivo definido na introdução deste trabalho, que é possibilitar a detecção de falhas em estatores bobinados. Para que o processo de avaliação/detecção tenha o menor custo, as análises devem ser realizadas enquanto os estatores ainda estão na etapa de bobinagem, ou seja, antes da montagem do motor. Dos métodos descritos anteriormente, o que melhor se encaixa neste objetivo é o teste de surto com os equipamentos disponíveis na WEG.

A Análise da Assinatura da Corrente do Motor (MCSA) também foi avaliada, pois apesar do ensaio ser realizado apenas em motores montados, que não era parte do objetivo principal definido neste estudo, ela se torna uma alternativa interessante visto que pode ser utilizada durante o teste realizado sem carga nas linhas de montagem da WEG.

### 5.1 Teste de Surto

Para o desenvolvimento dos testes, foram selecionados nove estatores bobinados com a seguinte especificação:

- 10 cv;
- 220 / 380 /440 V;
- 60 Hz;
- 4 pólos;
- Carcaça 132S;
- 4 bobinas por grupo;
- 2 grupos por fase;
- 3 fios;
- 30 espiras por grupo.

Os estatores foram separados em três grupos, sendo eles: estatores bons (estatores numero 1, 2, 3), estatores com espiras seqüenciais de uma fase curto-circuitadas (estatores

numero 4, 5 e 6), e estatores com a primeira e a última espira de uma fase curto-circuitadas (estatores numero 7, 8 e 9).

Para garantir que os estatores do primeiro grupo não continham defeito realmente, estes foram testados nos painéis que possuem teste de surto na WEG, e foram obtidos resultados que comprovaram a boa condição dos mesmos.

O segundo grupo de estatores foi obtido através de um processo de danificação dos fios dos estatores de maneira a criar espiras curto-circuitadas. Este procedimento, manual, apresentou uma pequena variação do estator número 4 para o estator número 5, porém o estator número 6 acabou recebendo uma avaria mais severa.

O terceiro grupo de estatores foi obtido através da danificação de um fio da primeira espira de um grupo de bobinas e um fio da última espira deste mesmo grupo de bobinas. Após o procedimento de danificação, conectaram-se os mesmos para que houvesse contato entre ambos.

O procedimento definido para a realização dos testes é fazer uma comparação entre os equipamentos de testes de forma a obter uma informação detalhada sobre quais equipamentos e/ou testes reúnem as melhores condições para detectar as falhas dos estatores. A análise se inicia com a comparação dos resultados por grupo de estatores em cada painel de teste e posteriormente passa a comparar os resultados dos grupos entre painéis diferentes.

### 5.1.1 Schleich

Os testes utilizando o equipamento da Schleich são apresentados a seguir.

- Ø Primeiro grupo: Os estatores bobinados do primeiro grupo foram todos aprovados, ratificando os testes realizados anteriormente. As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram os resultados de medição, sob uma tensão de descarga ajustada de 2000V (na realidade a tensão de pico registradas nas figuras é de cerca de 1900V), para os estatores número 1, 2 e 3 respectivamente. As formas de onda de tensão das três fases destes três estatores estão representadas nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3. Apesar das formas de onda de tensão apresentarem pequenas variações nos três estatores, estas não foram suficientes para reprová-los em nenhum dos critérios de análise automática utilizados pelo painel.

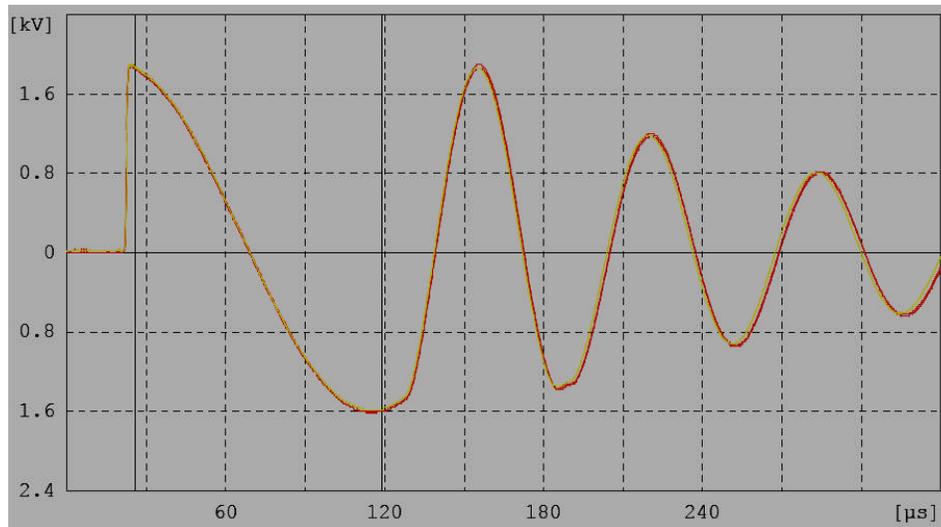


Figura 5.1 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 1 (tensão ajustada em 2000V).

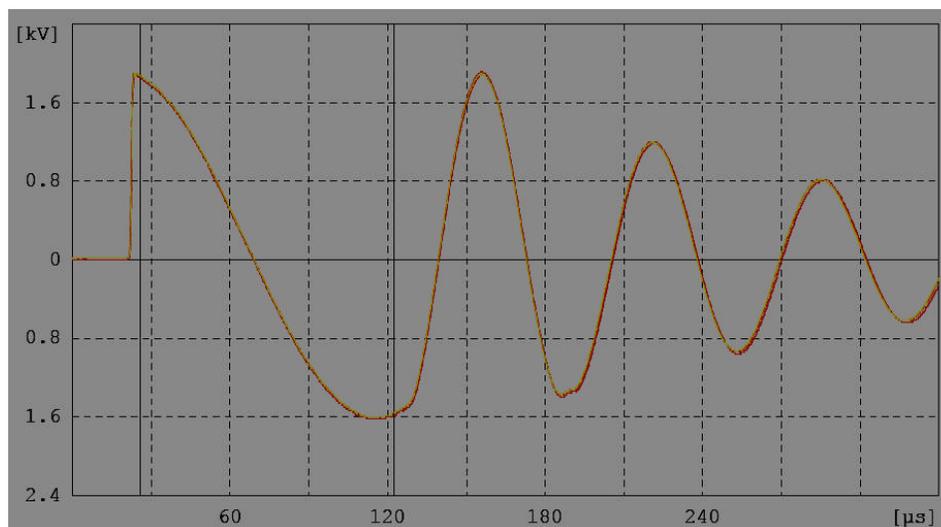


Figura 5.2 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 2 (tensão ajustada em 2000V).

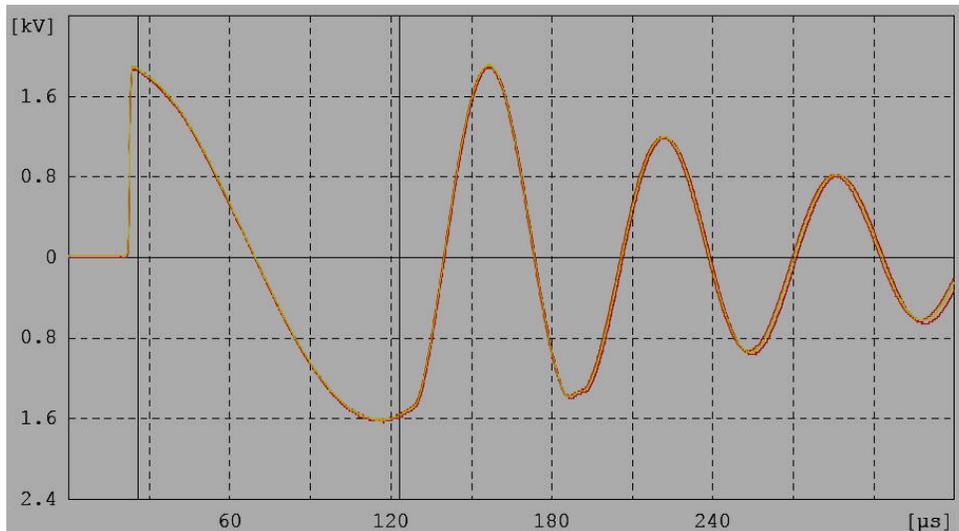


Figura 5.3 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 3 (tensão ajustada em 2000V).

Ø Segundo grupo: os três estatores (4, 5 e 6) foram aprovados no teste quando o mesmo foi realizado com tensão de ajuste de 2000V, apesar de possuírem fios curto-circuitados, conforme as Figuras 5.4, 5.5 e 5.6. Elevando a tensão ajustada para 5000V, o painel continuou aprovando os estatores 4 e 5, entretanto, o estator número 6, o qual apresentava uma avaria mais severa, acabou sendo rejeitado. Porém, não foi possível adquirir as formas de onda por motivos técnicos do ensaio naquela ocasião.

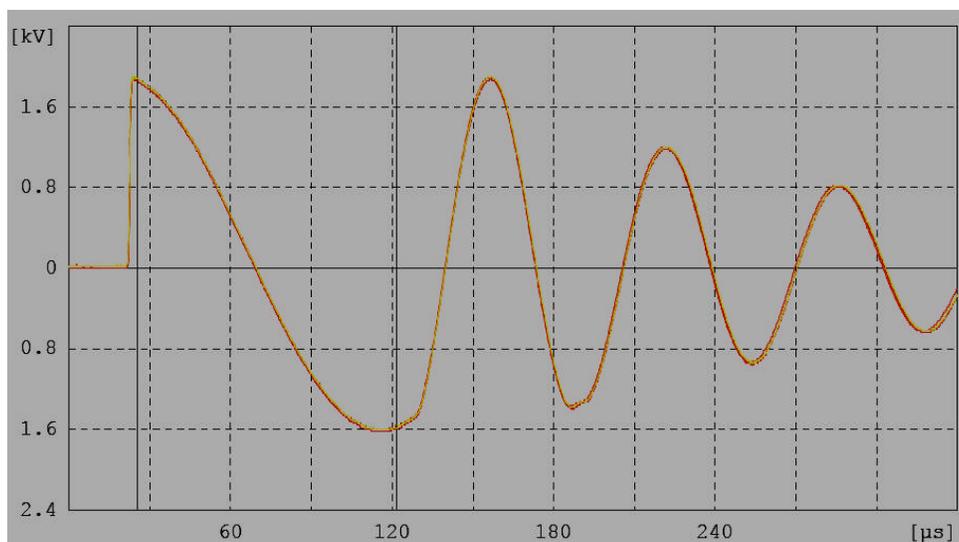


Figura 5.4 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 4 (tensão ajustada em 2000V).

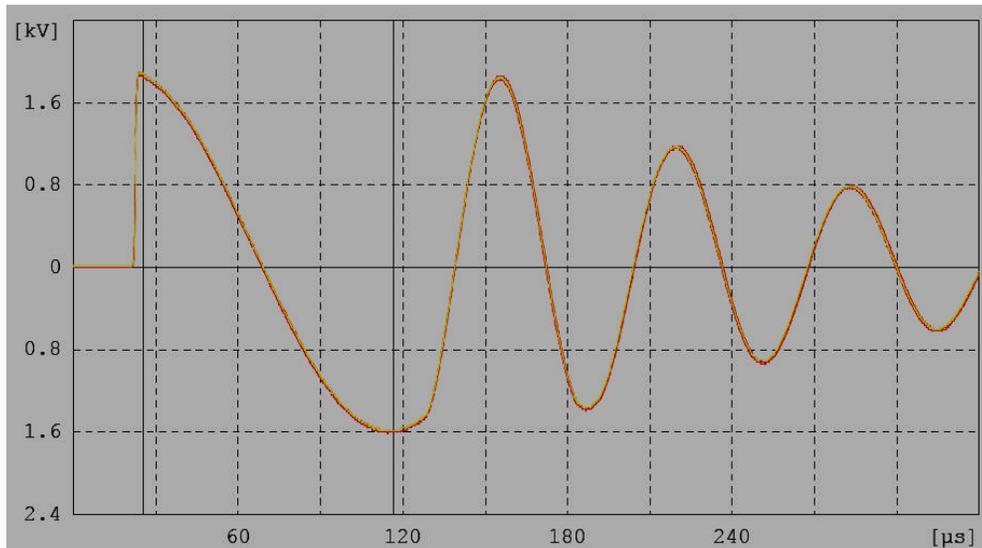


Figura 5.5 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 5 (tensão ajustada em 2000V).

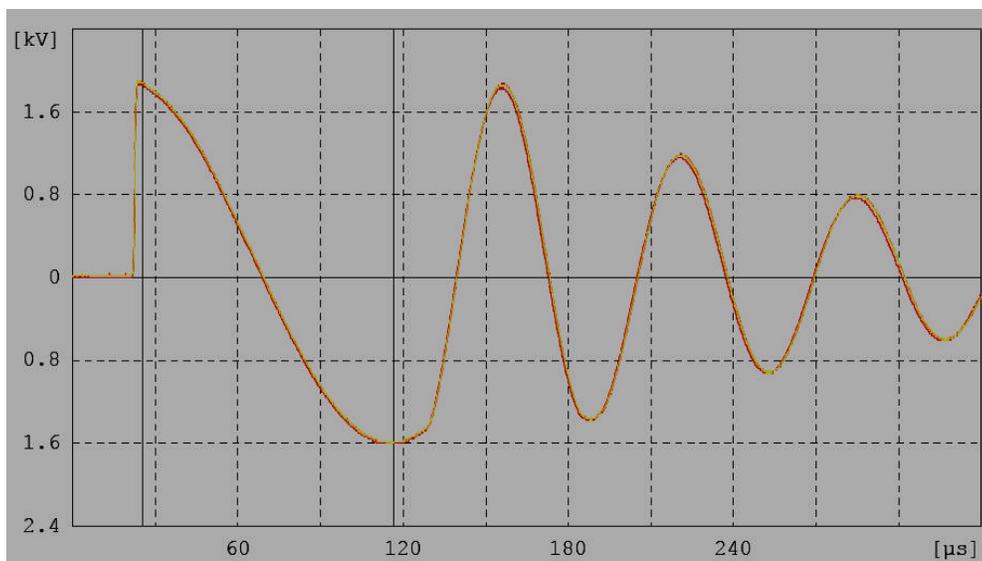


Figura 5.6 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 6 (tensão ajustada em 2000V).

Ø Terceiro grupo: os três estatores (7, 8 e 9) deste grupo foram detectados imediatamente como defeito pelo painel. Na Figura 5.7 pode-se observar que no estator 7 houve uma grande diferença no amortecimento das formas de onda e um grande defasamento entre elas, sendo que uma das formas de onda também apresenta distorções causadas por efeito corona. Nas figuras 5.8 e 5.9, que representam os estatores 8 e 9 respectivamente, também houve diferença no amortecimento das formas de onda e grande defasamento entre elas, entretanto,

nestas figuras fica claro que duas formas de onda estão apresentando efeito corona, apesar de apenas uma fase conter espiras curto-circuitadas.

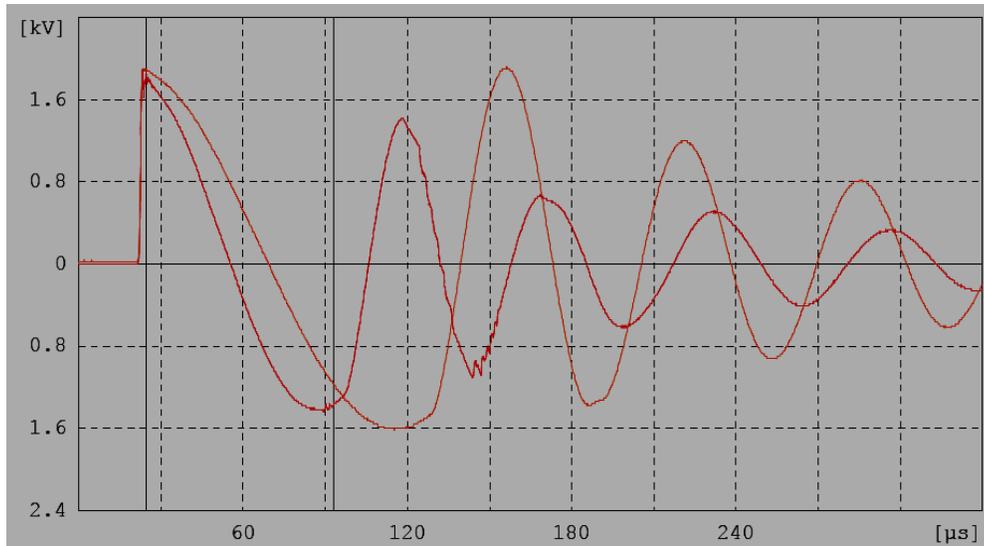


Figura 5.7 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 7 (tensão ajustada em 2000V).

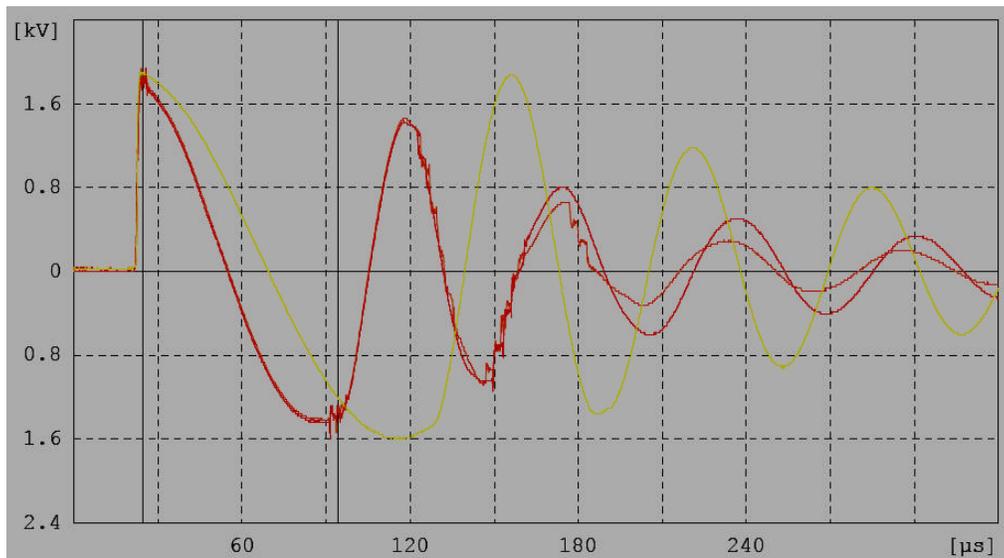


Figura 5.8 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 8 (tensão ajustada em 2000V).

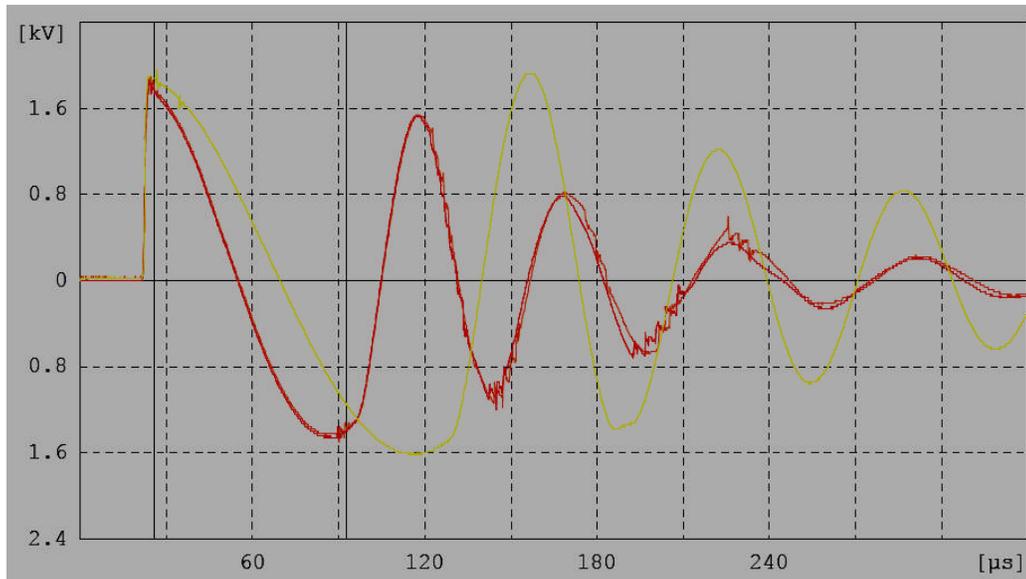


Figura 5.9 – Formas de onda de tensão nas três fases do estator 9 (tensão ajustada em 2000V).

### 5.1.2 Baker

Os testes utilizando o equipamento da Baker são apresentados a seguir.

- Ø Primeiro grupo: todos os estatores bobinados do primeiro grupo foram aprovados. As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 mostram os resultados do teste realizado nos estatores de número 1, 2 e 3 respectivamente, sob uma tensão de descarga de ajuste de 2000V. A Figura 5.13 mostra o resultado do teste sob uma tensão de ajuste de 5000V, onde pode-se perceber que as formas de onda estão sobrepostas.

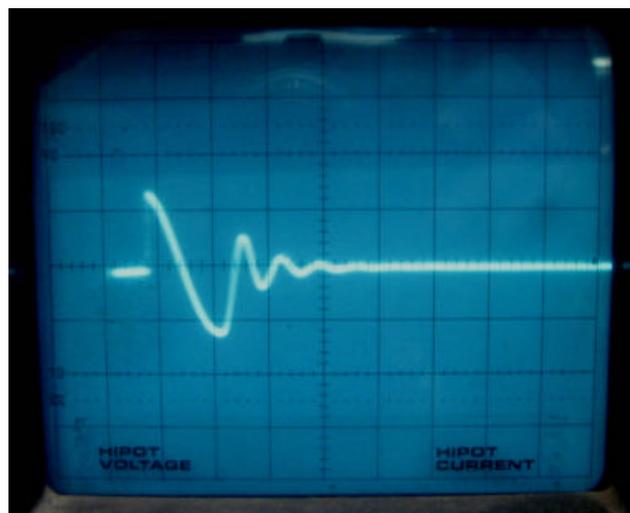


Figura 5.10 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 1 (tensão ajustada em 2000V).

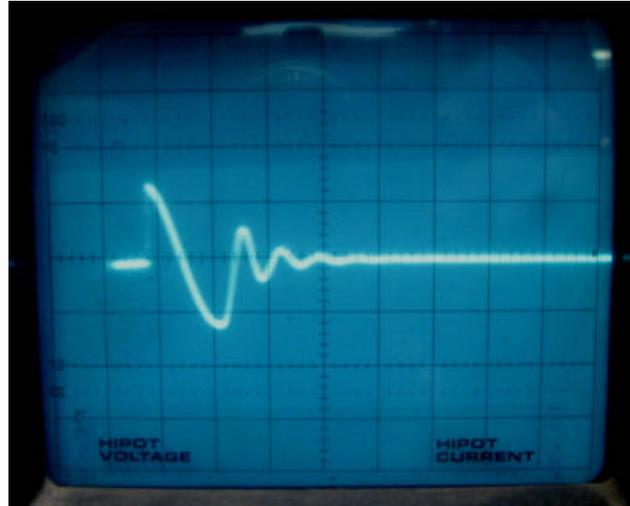


Figura 5.11 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 2 (tensão ajustada em 2000V).

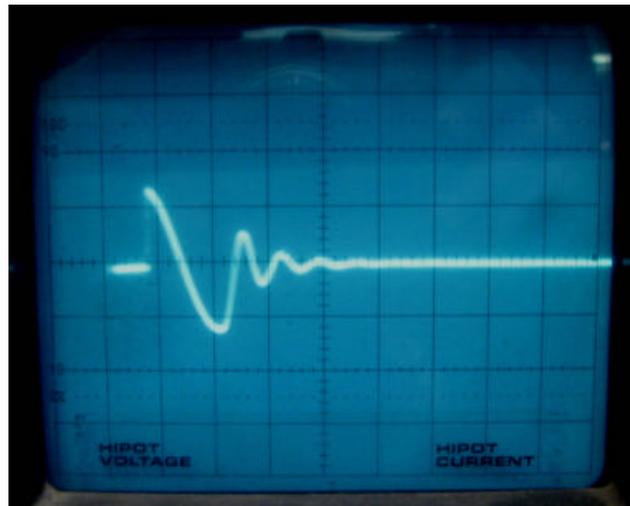


Figura 5.12 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 3 (tensão ajustada em 2000V).



Figura 5.13 – Formas de onda de tensão em duas fases dos estatores 1, 2 e 3 (tensão ajustada em 5000V).

Ø Segundo grupo: os três estatores (4, 5 e 6) foram aprovados no teste quando foi aplicada uma tensão ajustada em 2000V, apesar de possuírem fios curto-circuitados, conforme as Figuras 5.14, 5.15 e 5.16. Elevando a tensão ajustada do teste, apenas o estator 6 foi detectado como defeito. Entretanto, este só foi detectado quando foi aplicada uma tensão de 2100V, resultando em diferenças no amortecimento e defasamento entre as formas de onda, conforme Figura 5.19.

Os estatores 4 e 5 foram aprovados em condições semelhantes às do primeiro grupo de estatores tanto em 2000V quanto em 5000V, apesar de possuírem fios arranhados. O estator 5 apresentou uma ligeira diferença no amortecimento das curvas quando foi aplicado 5000V, porém seria aprovado de acordo com os critérios utilizados atualmente.

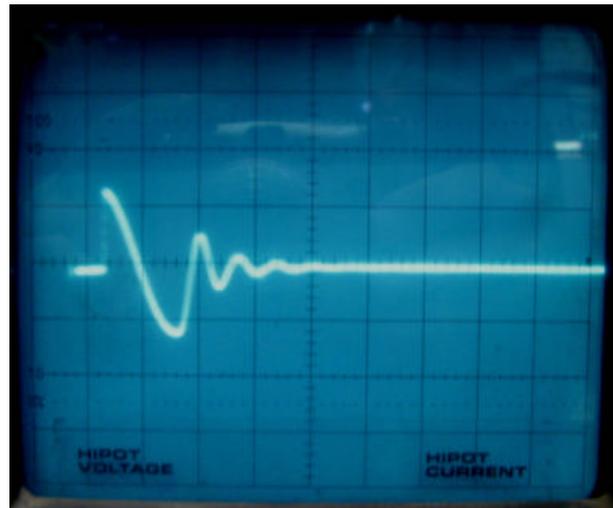


Figura 5.14 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 4 (tensão ajustada em 2000V).

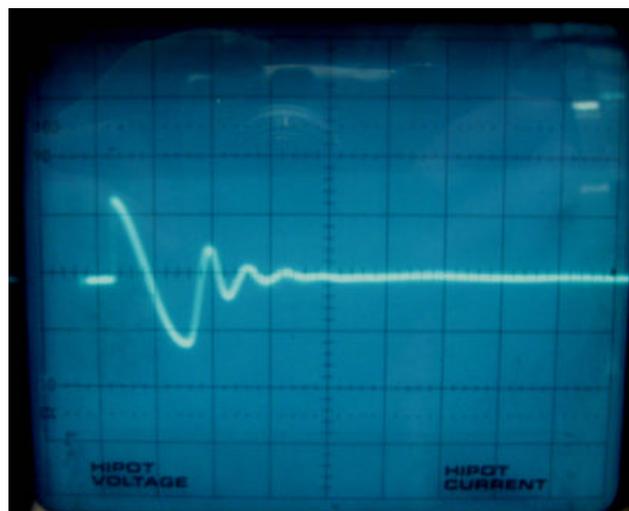


Figura 5.15 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 5 (tensão ajustada em 2000V).

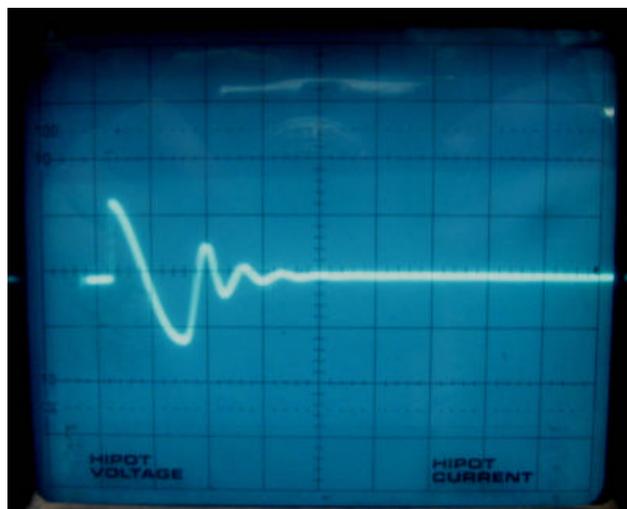


Figura 5.16 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 6 (tensão ajustada em 2000V).

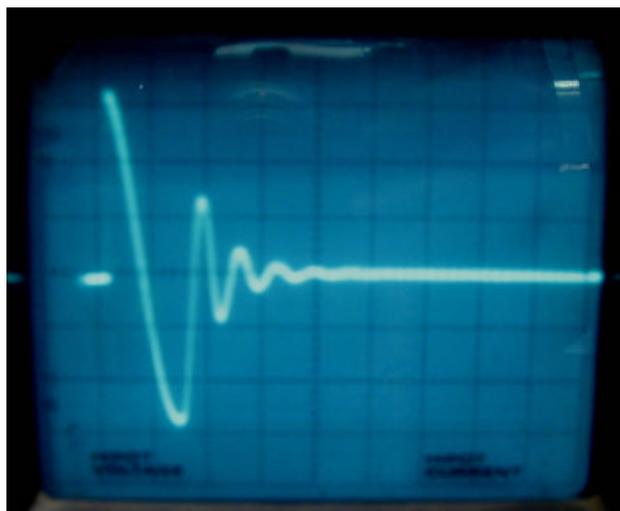


Figura 5.17 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 4 (tensão ajustada em 5000V).

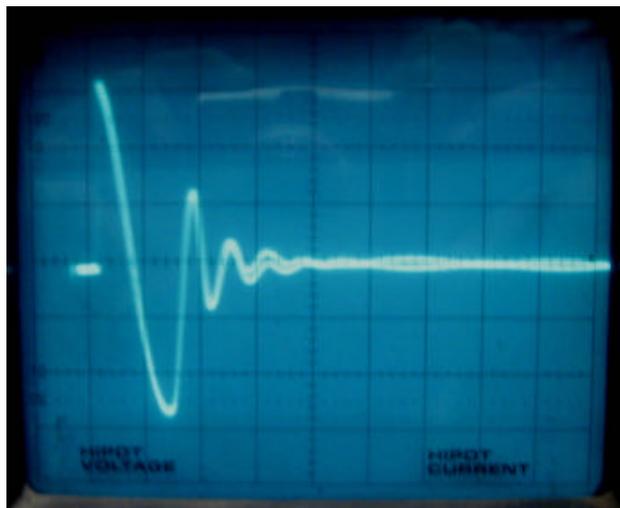


Figura 5.18 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 5 (tensão ajustada em 5000V).

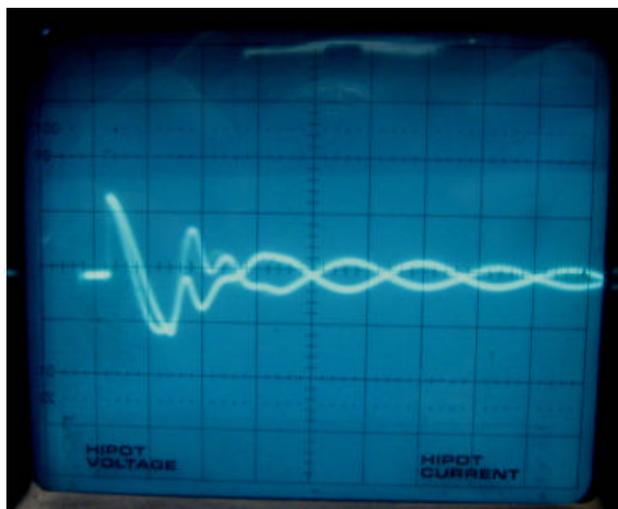


Figura 5.19 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 6 (tensão ajustada em 2100V).

Ø Terceiro grupo: os três estatores deste grupo (estatores 7, 8 e 9) foram detectados imediatamente como defeito pelo painel, mesmo com tensão inferior à normalmente utilizada nos testes. Nas Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 pode-se observar que em todos os estatores houve uma grande diferença no amortecimento das formas de onda e um grande defasamento entre elas, mesmo com apenas 800V de tensão ajustada.

A medida que a tensão ajustada é aumentada para valores como 2000V e 5000V (Figura 5.23), as formas de onda apresentam cada vez mais variação. Na Figura 5.23 pode-se ver que a forma de onda da fase que contém o defeito é apresentada praticamente como uma linha reta.

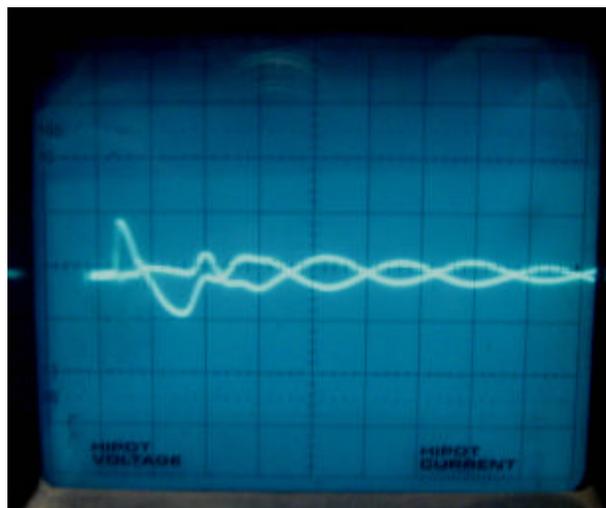


Figura 5.20 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 7 (tensão ajustada em 800V).

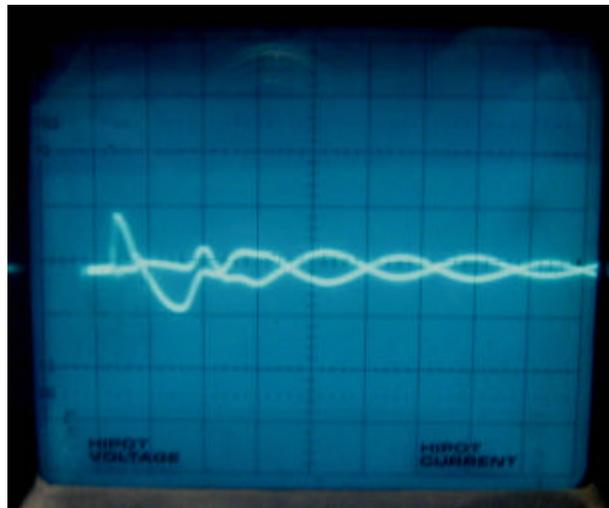


Figura 5.21 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 8 (tensão ajustada em 800V).

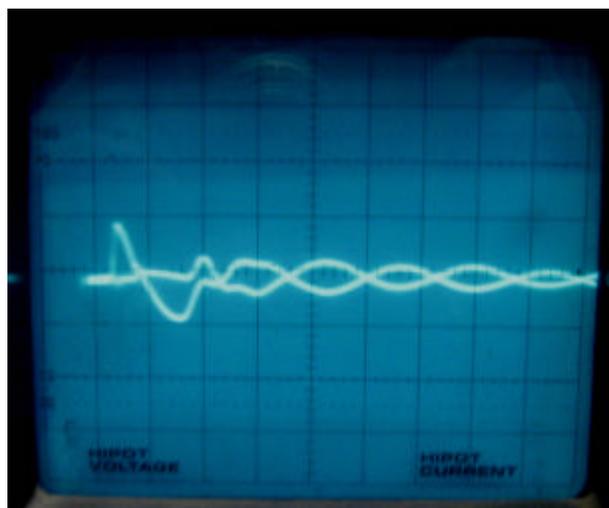


Figura 5.22 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 9 (tensão ajustada em 800V).

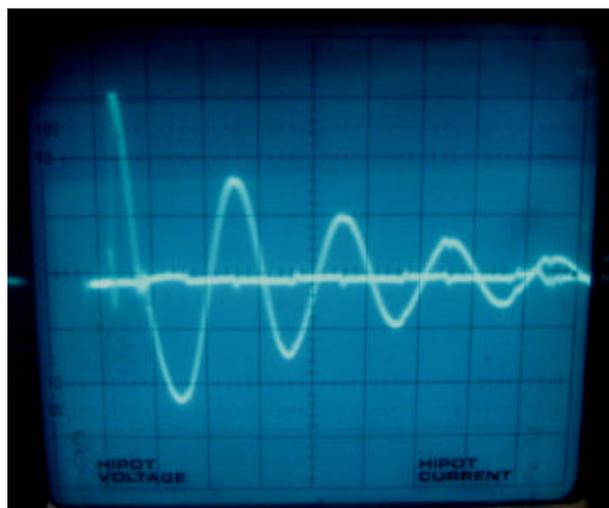


Figura 5.23 – Formas de onda de tensão em duas fases dos estatores 7, 8 e 9 (tensão ajustada em 5000V).

### 5.1.3 PJ Electronics

Ø Primeiro grupo: todos os estatores bobinados do primeiro grupo foram aprovados. As Figuras 5.24, 5.25 e 5.26 mostram os resultados, sob uma tensão ajustada em 2000V, do teste realizado nos estatores de número 1, 2 e 3 respectivamente. O equipamento também aprovou os estatores com 5000V, porém não foi possível obter as figuras. Pode-se verificar que as curvas dos três estatores apresentaram uma ligeira diferença, porém que não era suficiente para reprová-los.

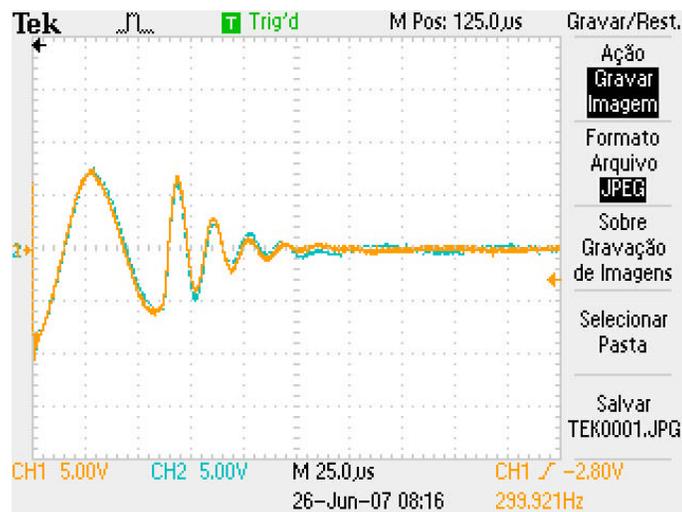


Figura 5.24 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 1 (tensão ajustada em 2000V).

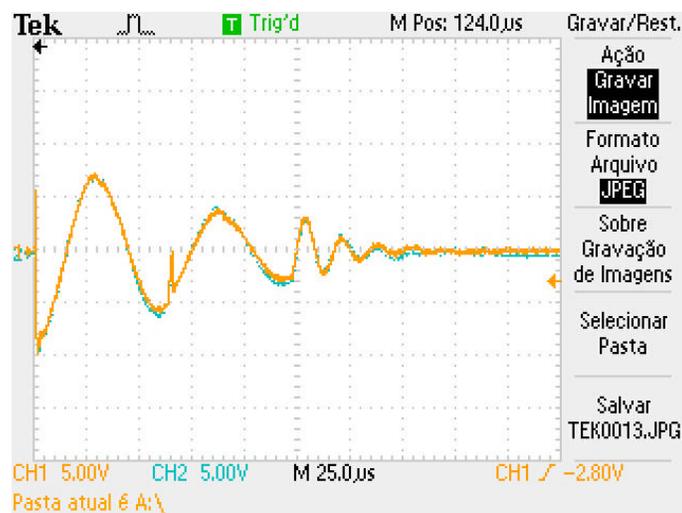


Figura 5.25 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 2 (tensão ajustada em 2000V).

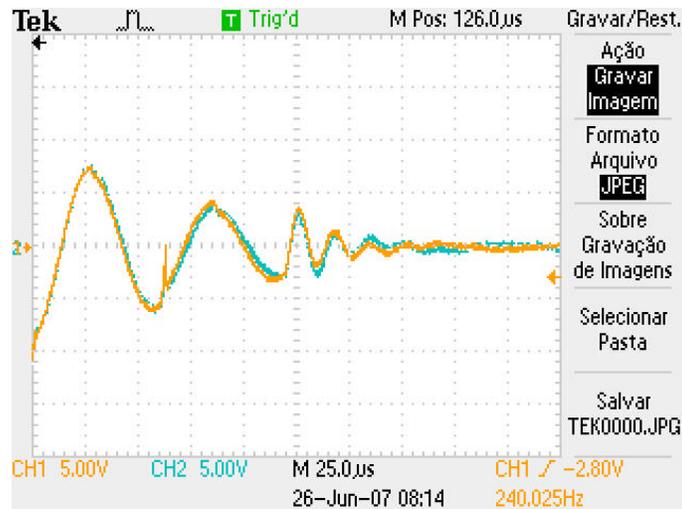


Figura 5.26 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 3 (tensão ajustada em 2000V).

Ø Segundo grupo: as figuras 5.27, 5.28 e 5.29 mostram os resultados dos testes realizados nos estatores 4, 5 e 6, respectivamente, com uma tensão ajustada em 2000V. Nelas pode-se observar que as formas de onda estão sobrepostas, resultando na aprovação de todos os estatores, apesar de possuírem fios arranhados. Quando a tensão ajustada foi aumentada para 5000V, os estatores 4 e 5 foram aprovados, no entanto, o estator 6 foi reprovado quando foram aplicadas tensões iguais ou superiores a 3900V. A figura 5.30 mostra a forma de onda obtida quando o teste foi realizado com 3900V, demonstrando diferenças no amortecimento e o defasamento entre as formas de onda.

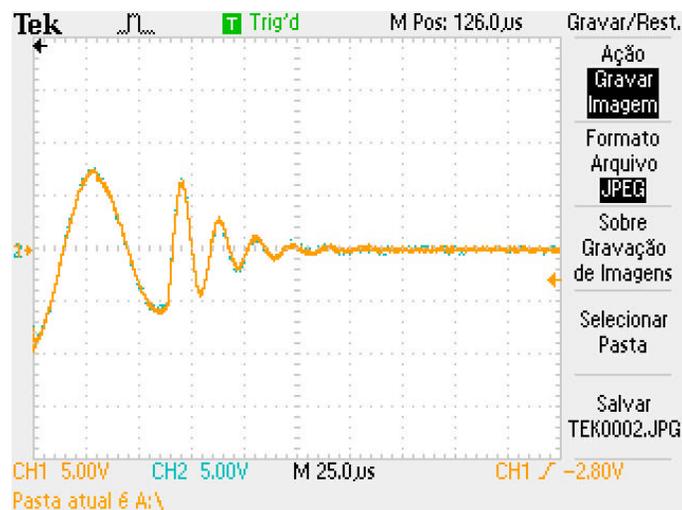


Figura 5.27 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 4 (tensão ajustada em 2000V).

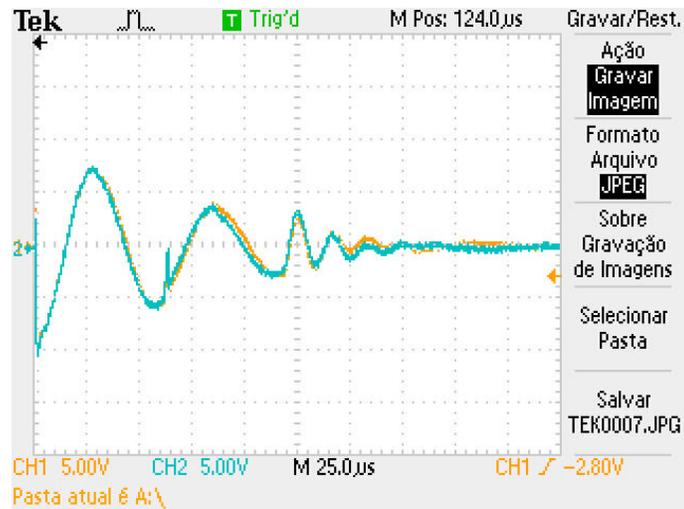


Figura 5.28 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 5 (tensão ajustada em 2000V).

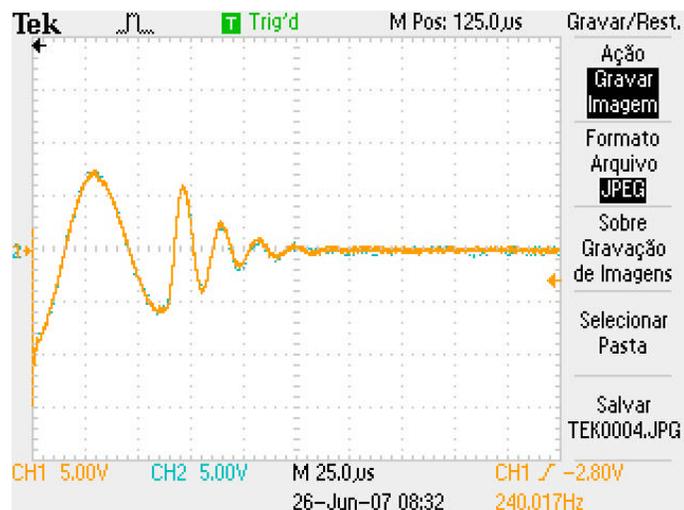


Figura 5.29 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 6 (tensão ajustada em 2000V).

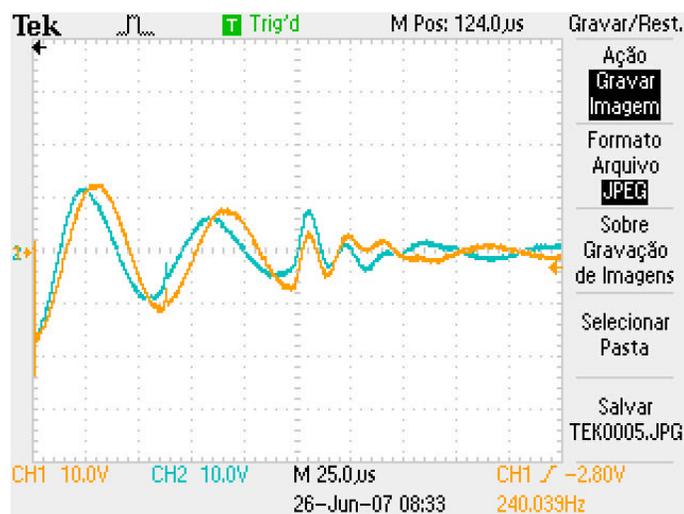


Figura 5.30 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 6 (tensão ajustada em 3900V).

- Ø Terceiro grupo: os três estatores (7, 8 e 9) deste grupo foram detectados imediatamente como defeito pelo painel. Na Figura 5.31 pode-se observar que no estator 7 houve uma grande diferença no amortecimento das formas de onda e um grande defasamento entre elas. Nas figuras 5.32 e 5.33, também ocorreram os mesmos problemas detectados no estator 7, porém as formas de ondas resultantes destes dois estatores estão muito parecidas entre si e apresentam diferenças para a forma de onda do estator 7.

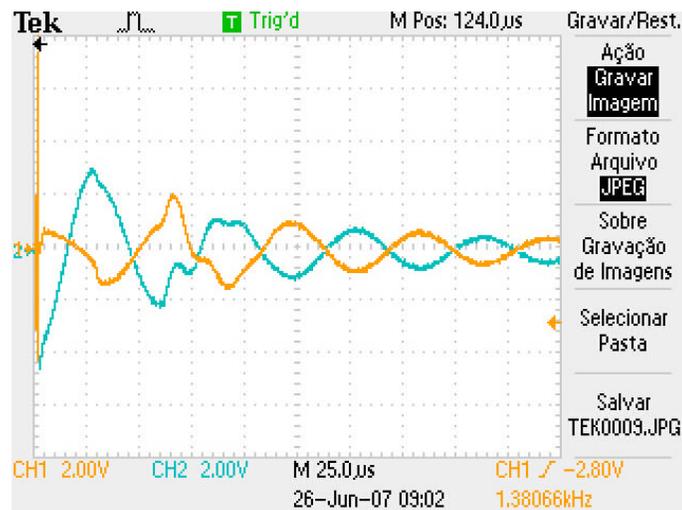


Figura 5.31 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 7 (tensão ajustada em 900V).

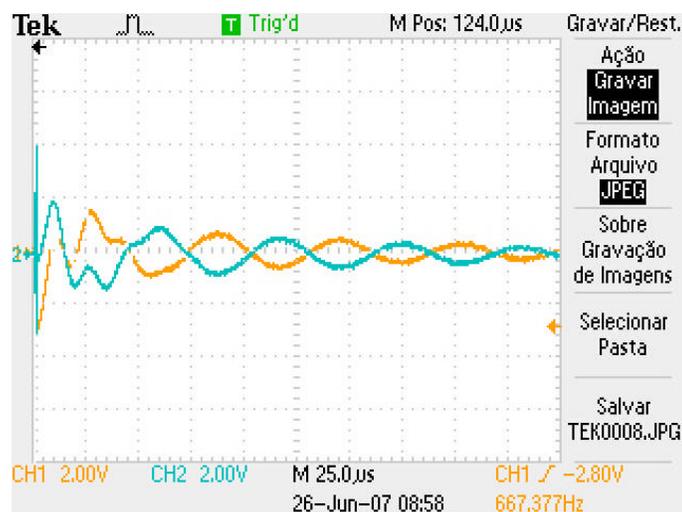


Figura 5.32 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 8 (tensão ajustada em 500V).

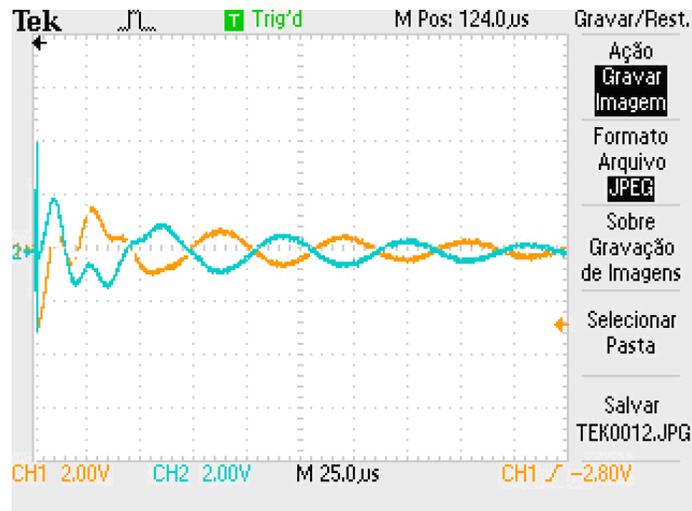


Figura 5.33 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 9 (tensão ajustada em 500V).

#### 5.1.4 Acematic

O equipamento da Acematic não pôde ser utilizado nestes testes, pois este foi construído de forma a obter resultados otimizados para estatores menores e que apresentam outras características construtivas, logo não apresentou bons resultados nestes estatores.

O fornecedor foi contatado e relatou que é possível adaptar seu aparelho para os estatores selecionados, porém não houve disponibilidade de reenvio do equipamento para a realização de novos testes.

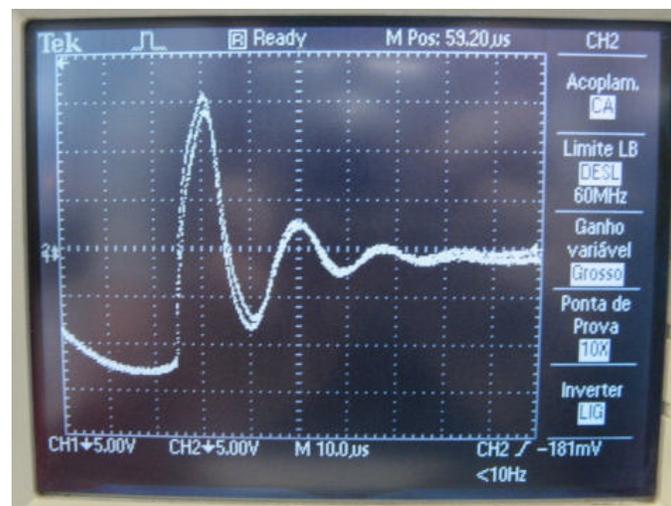


Figura 5.34 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 1 (tensão ajustada em 2000V).

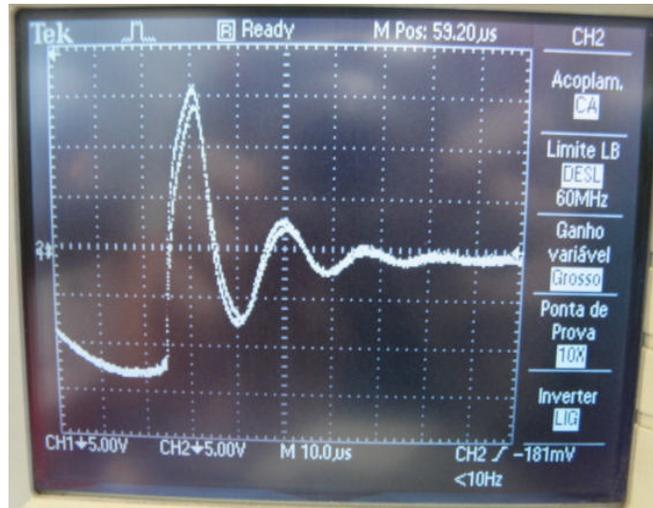


Figura 5.35 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 4 (tensão ajustada em 2000V).

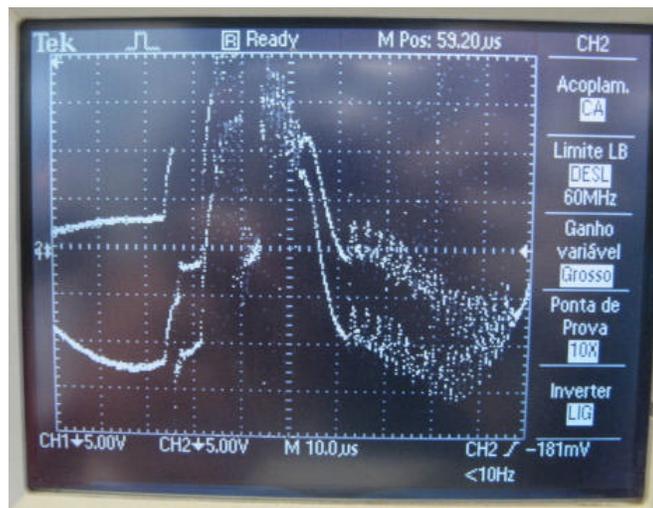


Figura 5.36 – Formas de onda de tensão em duas fases do estator 7 (tensão ajustada em 2000V).

As figuras 5.34, 5.35 e 5.36 mostram os resultados obtidos utilizando o equipamento da Acematic. Todos os testes realizados nos estatores 1 a 6 apresentaram formas de onda idênticas, enquanto que os testes realizados nos estatores 7 a 9 não puderam ser registrados, pois o equipamento não conseguiu realizar o teste e mostrar a forma de onda resultante.

## 5.2 Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA)

Para o desenvolvimento dos testes, foram selecionados 2 motores trifásicos de baixa tensão com a seguinte especificação:

- 1 cv;
- 220 / 380 V;
- 60 Hz;
- 4 pólos;
- Carcaça 80;
- 3 bobinas por grupo;
- 2 grupos por fase;
- 1 fio;
- 57 espiras por grupo.

Os motores foram separados em três grupos, sendo o primeiro deles utilizando um motor sem curto-circuito, o segundo utilizando um motor com 5 espiras curto-circuitadas e o terceiro utilizando o mesmo motor com espiras curto-circuitadas, porém com 10 espiras curto-circuitadas. Nas três etapas foram realizados ensaios nas condições sem carga e com carga.

- Ø Primeiro grupo: para a realização deste ensaio, foi selecionado um motor sem curto-circuito e o ensaio foi realizado tanto sem carga, conforme figura 5.37, como em carga, conforme figura 5.38, para que fosse possível avaliar as alterações causadas pela introdução do curto-circuito no espectro de frequência nas duas condições.

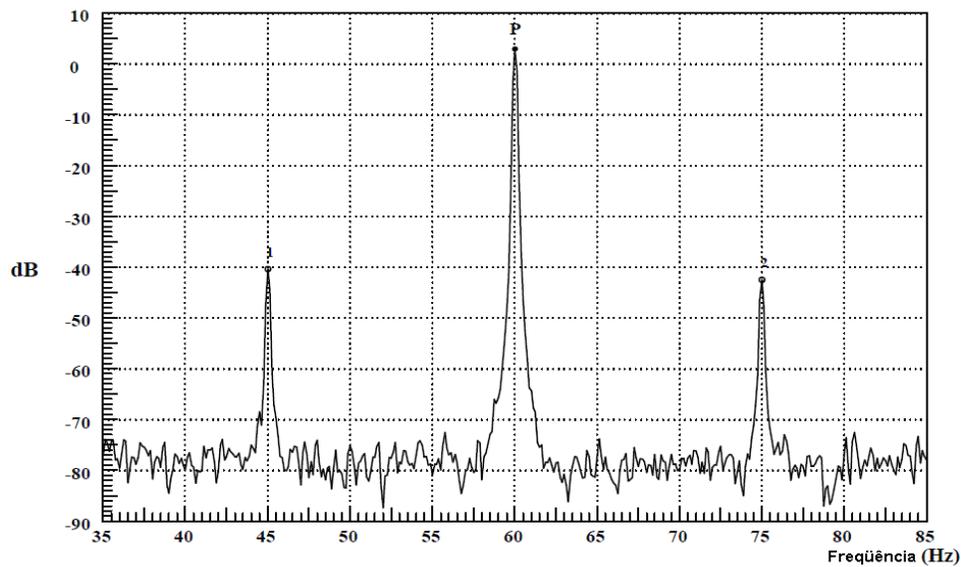


Figura 5.37 – Espectro de frequência da corrente do motor normal e sem carga.

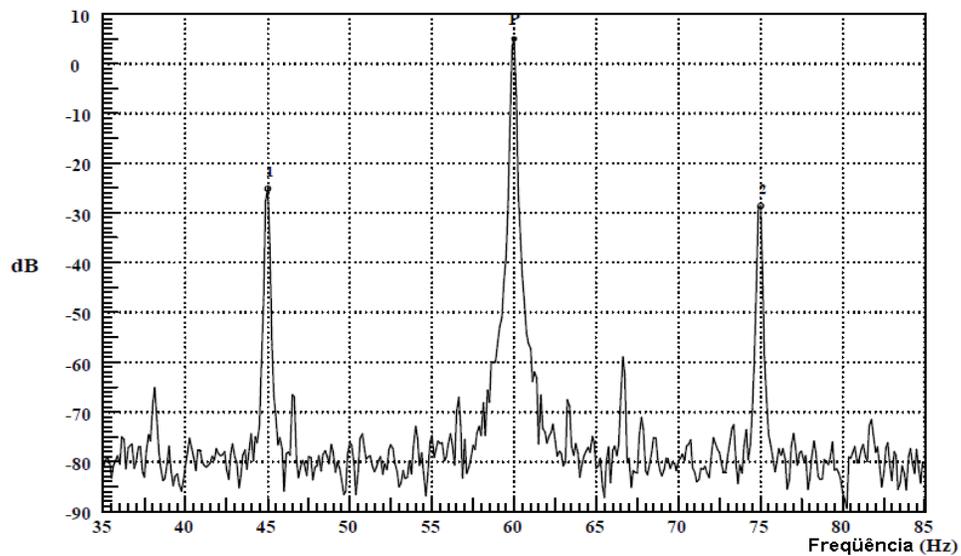


Figura 5.38 – Espectro de frequência da corrente do motor normal e com carga.

- Ø Segundo grupo: o estator bobinado utilizado neste grupo foi danificado manualmente para a realização deste ensaio, introduzindo um curto-circuito entre espiras. Neste grupo, o estator continha apenas 5 espiras curto-circuitadas e os ensaios também foram realizados sem carga, conforme figura 5.39, e em carga conforme figura 5.40.

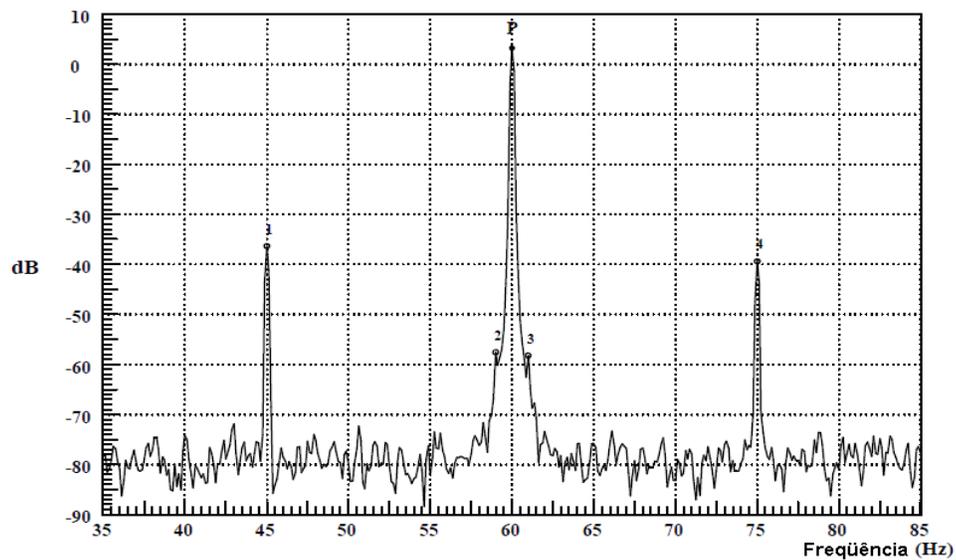


Figura 5.39 – Espectro de frequência da corrente do motor com 5 espiras curto-circuitadas e sem carga.

Comparando os espectros de frequência da corrente das figuras 5.37 e 5.39, é possível perceber que houve um aumento na amplitude das harmônicas em 45Hz e 75Hz quando o motor apresentava espiras curto-circuitadas, conforme os resultados apresentados por [12].

Tabela 5.1 – Amplitudes das harmônicas do primeiro e segundo grupos sem carga.

Tipo de motor	45Hz	75Hz
Sem curto-circuito e sem carga	- 40.38 dB	- 42.52 dB
Com 5 espiras curto-circuitadas e sem carga	- 36.39 dB	- 39.43 dB

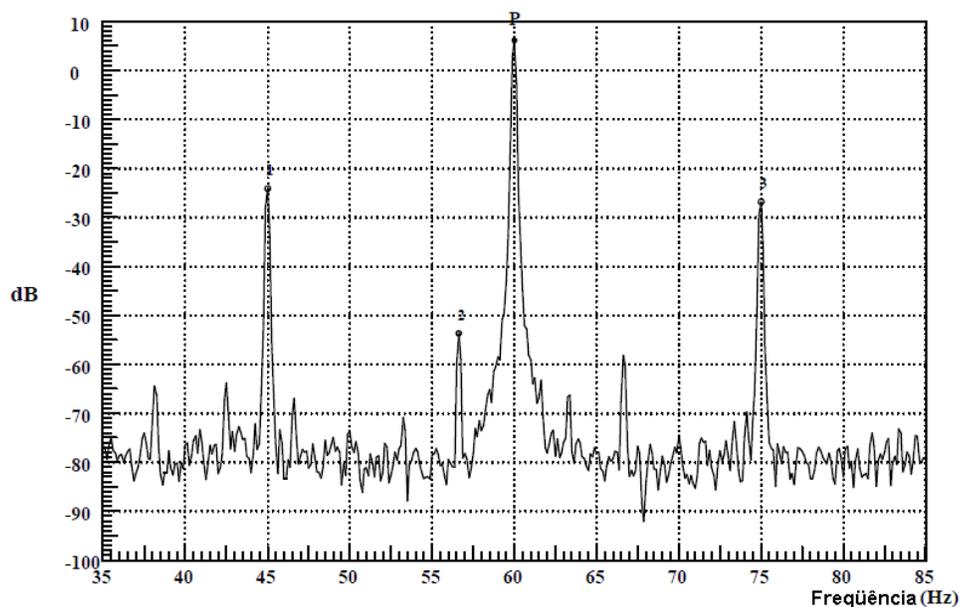


Figura 5.40 – Espectro de frequência da corrente do motor com 5 espiras curto-circuitadas e com carga.

Comparando os espectros de frequência da corrente das figuras 5.38 e 5.40, é possível perceber que houve um aumento na amplitude das harmônicas em 45Hz e 75Hz quando o motor apresentava espiras curto-circuitadas, conforme os resultados apresentados por [12].

Tabela 5.2 – Amplitudes das harmônicas do primeiro e segundo grupo com carga .

Tipo de motor	45Hz	75Hz
Sem curto-circuito em carga	- 25.17 dB	- 28.61 dB
Com 5 espiras curto-circuitadas em carga	- 24.08 dB	- 26.82 dB

Ø Terceiro grupo: o estator bobinado utilizado neste grupo foi o mesmo que o utilizado no segundo grupo, porém curto-circuitando manualmente mais 5 espiras, totalizando 10 espiras curto-circuitadas. Os ensaios também foram realizados sem carga, conforme figura 5.41, e em carga conforme figura 5.42.

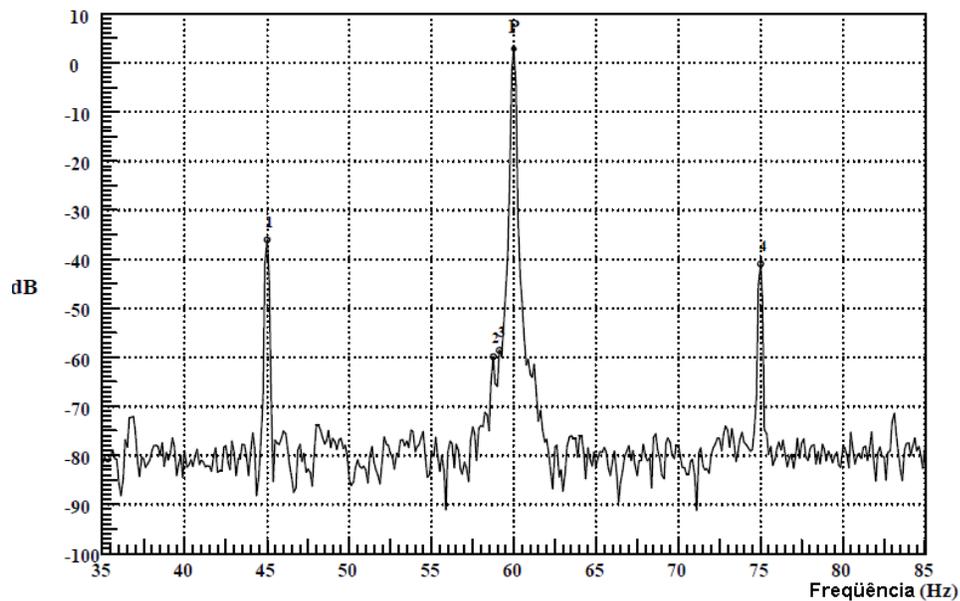


Figura 5.41 – Espectro de frequência da corrente do motor com 10 espiras curto-circuitadas e sem carga.

Comparando os espectros de frequência da corrente das figuras 5.37, 5.39 e 5.41, é possível perceber que houve um aumento na amplitude das harmônicas em 45Hz e 75Hz quando o motor apresentava espiras curto-circuitadas, conforme os resultados apresentados por [12]. Entretanto, nos ensaios realizados não foi possível identificar que o aumento na quantidade de espiras curto-circuitadas causava o aumento na amplitude das harmônicas de 45Hz e 75Hz, uma vez que o motor sem carga com 10 espiras curto-circuitadas apresentou amplitude inferior ao de 5 espiras curto-circuitadas em 75Hz.

Tabela 5.3 – Amplitudes das harmônicas do primeiro, segundo e terceiro grupos sem carga.

Tipo de motor	45Hz	75Hz
Sem curto-circuito	- 40.38 dB	- 42.52 dB
Com 5 espiras curto-circuitadas em vazio	- 36.39 dB	- 39.43 dB
Com 10 espiras curto-circuitadas em vazio	- 36.08 dB	- 40.98 dB

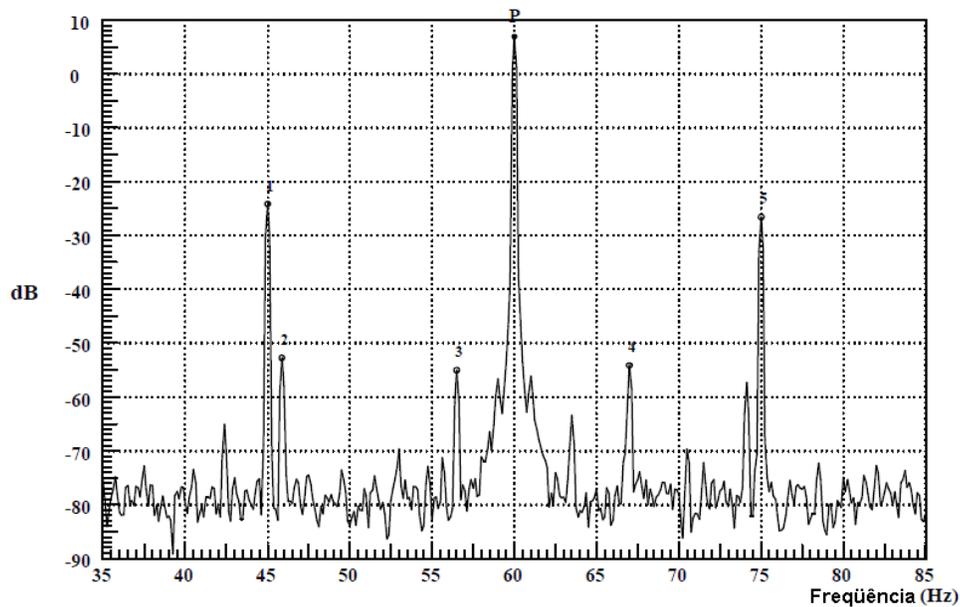


Figura 5.42 – Espectro de frequência da corrente do motor com 10 espiras curto-circuitadas e com carga.

Comparando os espectros de frequência da corrente das figuras 5.38, 5.40 e 5.42, é possível perceber que houve um aumento na amplitude das harmônicas em 45Hz e 75Hz quando o motor apresentava espiras curto-circuitadas, conforme os resultados apresentados por [12]. Entretanto, não foi possível identificar que o aumento na quantidade de espiras curto-circuitadas causava o aumento na amplitude das harmônicas de 45Hz e 75Hz, uma vez que o motor em carga com 10 espiras curto-circuitadas apresentou amplitude ligeiramente inferior ao de 5 espiras curto-circuitadas em 45Hz.

Tabela 5.4 – Amplitudes das harmônicas do primeiro, segundo e terceiro grupos com carga.

Tipo de motor	45Hz	75Hz
Sem curto-circuito	- 25.17 dB	- 28.61 dB
Com 5 espiras curto-circuitadas	- 24.08 dB	- 26.82 dB
Com 10 espiras curto-circuitadas	- 24.20 dB	- 26.61 dB

### 5.3 Considerações finais

Observando os resultados dos testes realizados nos painéis de surto, pode-se perceber que este teste consegue detectar todos os casos onde a diferença entre as fases ou entre as bobinas é muito significativa. Entretanto, quando o curto-circuito não chega a causar uma grande diferença no circuito do estator, o equipamento com avaliação automática aprova os estatores e os demais mostram formas de onda idênticas, resultando na aprovação, mesmo que eles contenham problemas. Deve-se lembrar que os painéis que possuem avaliação automática da qualidade do estator bobinado também possuem um percentual de tolerância, o qual é ajustável. Esta tolerância deve ser ajustada de acordo com testes realizados pelo fabricante de motores a fim de não rejeitar peças que não contenham falhas, mas sim variações de processo. Além disso, estas tolerâncias podem estar interferindo na qualidade dos resultados, fazendo com que estatores com curto-circuito acabem sendo aprovados. Neste caso, torna-se interessante a realização de novos testes com redução nas tolerâncias, de forma a verificar se as falhas serão detectadas.

Pode-se perceber também que o painel que apresenta maior quantidade de avaliações do resultado é o da empresa Schleich, porém mesmo com a maior quantidade de técnicas de avaliação, este painel acabou não detectando alguns defeitos.

O aumento da tensão aplicada no teste não é um procedimento comum durante os testes realizados no dia-a-dia, porém os resultados apresentados demonstram que caso o estator não apresente falhas, será aprovado tanto com a tensão normal de teste como com a tensão aumentada. Entretanto, quando o estator apresenta alguma falha, pode ocorrer do teste de surto não detectá-la com a tensão que é normalmente aplicada, mas detectá-la com uma tensão mais elevada.

Com relação à Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA), identificou-se que as amplitudes das harmônicas em 45Hz e 75Hz sofreram alterações e aumentaram em relação ao motor que não possuía curto-circuito entre espiras, conforme o resultado apresentado por [12]. Entretanto, o aumento da quantidade de espiras curto-circuitadas trouxe resultados distintos, onde nem sempre os resultados obtidos comprovaram os resultados obtidos por [12].

## 6. CONCLUSÃO

Foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o sistema de isolamento dos motores elétricos trifásicos de indução de baixa tensão, onde foram descritos os principais materiais isolantes utilizados atualmente pelo fabricante de motores WEG, suas respectivas classes térmicas e composição. Posteriormente, foram relacionadas as principais causas de falhas nos motores elétricos, onde pode-se destacar os estresses de origem ambiental, térmico, elétrico e mecânico.

Métodos utilizados na detecção de falhas em estatores, principalmente curto-circuito entre espiras, também foram levantados e descritos. Dentre os métodos da análise do circuito do motor (MCA), do teste de surto, do teste de análise da assinatura da corrente do motor (MCSA), da análise do campo/fluxo magnético externo e das descargas parciais, apenas o primeiro, o segundo e o último descritos anteriormente podem ser utilizados para a detecção de curto-circuito em estatores bobinados. Os demais são utilizados apenas em motores montados.

Dentre os testes descritos anteriormente, optou-se por realizar primeiramente testes comparativos entre os equipamentos de teste de surto disponíveis na WEG. Nestes testes, pode-se perceber que apenas estatores com falhas que apresentassem grande diferença no circuito dos estatores eram sempre detectadas como falha. Nos casos onde havia espiras seqüenciais curto-circuitadas, os equipamentos nem sempre conseguiram detectar as falhas, tornando necessário um aumento na tensão aplicada pelo equipamento.

Mesmo aumentando a tensão aplicada, os estatores 4 e 5, que possuíam espiras seqüenciais curto-circuitadas não foram detectados como defeito pelos painéis. O estator 6 acabou sendo detectado, porém este possuía uma avaria mais severa. Estas variações nas avarias foram provocadas devido ao processo manual de danificação dos fios, entretanto, demonstrou que mesmo que a variação nos danos do isolamento dos fios não seja tão grande, também interfere diretamente no resultado do teste.

Com relação aos painéis testados, o que melhor atende a situação da WEG Motores, atualmente é o Schleich, pois o painel realiza a avaliação do estator de forma automática. O painel também apresenta vantagens quando se compara a velocidade do teste, uma vez que não é necessário conectar as fases duas a duas e a WEG Motores possui um elevado número de motores produzidos por dia.

A variação na intensidade dos danos acabou trazendo resultados diferentes para estatores que apresentavam o mesmo problema de curto-circuito entre espiras. Neste ponto, pode-se sugerir como trabalho futuro, mapear a interferência da intensidade dos danos nos fios em relação aos resultados apresentados pelo painel. Este é um assunto importante, pois a avaliação dos painéis deve ser eficiente de modo que detecte os defeitos, porém não detecte variações de processo como defeito.

Outra sugestão para trabalho futuro é avaliar a implantação do teste de surto em motores montados. O teste em estatores bobinados garante rápida detecção das falhas e redução na quantidade de materiais refugados, porém permite que estatores que foram aprovados no teste sejam danificados durante alguma etapa posterior do processo, como por exemplo, impregnação, prensagem da carcaça, colocação do rotor ou montagem das tampas. Caso o teste fosse realizado nos painéis de teste da montagem, não existiria mais a possibilidade dos estatores se danificarem após o teste, porém traria um maior atraso à fábrica e poderia trazer aumento na quantidade de material refugado.

A Análise da Assinatura de Corrente do Motor também foi avaliada, pois poderia ser inserida como teste complementar nas cabines de testes das linhas de montagem. Os resultados demonstraram um aumento na amplitude das harmônicas, indicando que a presença do curto-circuito entre espiras causa esta variação no espectro de frequência da corrente. Entretanto, torna-se necessário um estudo complementar sobre este ensaio, levando em consideração os diferentes tipos de estatores bobinados para que sejam mapeadas como estas variações interferem nos resultados. Uma vez mapeadas estas variações e suas interferências no espectro de frequência da corrente, também é necessária a avaliação das adaptações necessárias nos equipamentos de teste disponíveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Xu Bo-qiangu; Li He-ming; Sun Li-ling. Joint detection of stator winding inter-turn short circuit and rotor breaking fault in squirrel cage induction motors. In: International Conference on Power System Technology (Oct. 2002. : Kunming), v. 2, p. 761-764.
- [2] Manop, C.; Senavongse, W.; Kinnares, V. A low cost prototype for testing stator winding shorted turns in 3-phase induction motors. In: IEEE International Conference on Industrial Technology 2005 (Dec. 2005. : Hong Kong), p. 734-738.
- [3] Boqiang Xu; Liling Sun; Heming Li. Research on stator and rotor winding double fault in squirrel cage induction motor. In: 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting (June 2006. : Montreal), p. 1-5.
- [4] Melero, M. G.; Cabanas, M. F.; Rojas, C. et al. Study of an induction motor working under stator winding inter-turn short circuit condition. In: 4<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (4. : Aug. 2003. : Atlanta), p. 52 - 57.
- [5] Faraco, R. A. L. Detecção de Falhas Elétricas em Motores de Indução Utilizando Redes Neurais. Belo Horizonte, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- [6] WEG, Catálogo Geral Motores Elétricos.
- [7] Meurer E. J., "Study of interlaminar magnetic losses on electrical machines", MSc Dissertation, UFSC, Brazil, 2005 (in Portuguese).
- [8] Penrose, H. W. Motor Circuit Analysis Concept and Principle. ALL Test Pro, 2004.
- [9] Penrose, H. W. Theory of Static Winding Circuit Analysis. BJM Corp, ALL-TEST Division, 2001.
- [10] Martinez, A. M. P.; Wolf, E.; Schwartz, A. Padronização do Ensaio de Surto de acordo com os critérios definidos pelo cliente Ebara. WEG; PDT - 18; 2004.
- [11] SCHLEICH; Operating Manual of the surge tester for the devices MTC3 DSP1000 (MTC4).
- [12] Pereira, L. A.; da Silva Gazzana, D.; Pereira, L. F. A. Motor current signature analysis and fuzzy logic applied to the diagnosis of short-circuit faults in induction motors. In: 32<sup>nd</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (n. 32. : Nov. 2005. : North Carolina), p. 275-280.
- [13] Thomson, William T. On-Line MCSA to Diagnose Shorted Turns in Low Voltage Stator Windings of 3-Phase Induction Motors Prior to Failure. In: IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Jun. 2001. . Cambridge), p. 891-898.

- [14] Gentile, G.; Meo, S.; Ometto, A. Induction motor current signature analysis to diagnostics of stator short circuits. In: 4<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (n. 4. : Aug. 2003. : Atlanta), p. 47-51.
- [15] Cusido, J.; Rosero J.; Aldabas, E. New fault detection techniques for induction motors. Electrical Power Quality and Utilization, Magazine, v. 2, n. 1, p. 39 -46, 2006.
- [16] Thaily, D.; Romary, R.; Brudny, J. F. Quantitative analysis of the external radial magnetic field for detection of stator inter-turn short-circuit in induction machines. In: 2005 European Conference on Power Electronics and Applications (11. : Sept. 2005. : Dresden), p.1 -8.
- [17] Stone, G. C. Recent Important Changes in IEEE Motor and Generator Winding Insulation Diagnostic Testing Standards. 2003.
- [18] Paoletti, G.; Golubev, A. Partial Discharge Theory and Technologies Related to Medium Voltage Electrical Equipment. EATON Application Engineers Edition. July 2002.
- [19] <http://www.bakerinst.com>
- [20] <http://www.pjelectronics.com>