UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

LEANDRO CARVALHO MAGALHÃES

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUXILIAR NO DIAGNÓSTICO PREDITIVO DE FALHAS NO ISOLAMENTO ESTATÓRICO DE MAQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2018

LEANDRO CARVALHO MAGALHÃES

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUXILIAR NO DIAGNÓSTICO PREDITIVO DE FALHAS NO ISOLAMENTO ESTATÓRICO DE MAQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Leandro Carvalho Magalhães**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

_____

Prof. Dr. Oureste Elias Batista
Orientador

_____

Leandro Carvalho Magalhães
Aluno

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2018

LEANDRO CARVALHO MAGALHÃES

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUXILIAR NO DIAGNÓSTICO PREDITIVO DE FALHAS NO ISOLAMENTO ESTATÓRICO DE MAQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Leandro Carvalho Magalhães**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 6, de dezembro de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA:

_____

Prof. Dr. Oureste Elias Batista
Universidade Federal do Espirito santo
Orientador

_____

Prof. M. Sc. Edmilson Bermudes Rocha Junior
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador

_____

M. Sc. Luiz Guilherme Riva Tonini
Universidade Federal do Espirito santo
Examinador

RESUMO

O setor industrial apresenta diversas aplicações onde força mecânica é necessária, seja para laminação de metais, transporte de insumos, compressão ou diversas outras atividades. Tais atividades são, em maior parte, realizadas por motores trifásicos de indução. A vida útil dessas maquinas estão diretamente ligadas ao isolamento do enrolamento estatórico das mesmas. Uma manutenção feita de maneira efetiva pode estender de forma concisa essa vida útil, além de prevenir paradas inesperadas nas plantas, por falhas inesperadas, que podem causar prejuízos milionários. O presente trabalho apresenta, com base em referências bibliográficas, o desenvolvimento de um software auxiliar no diagnóstico preditivo de falhas no isolamento do enrolamento estatórico para prevenir justamente que falhas inesperadas ocorram. O software foi completamente desenvolvido utilizando a plataforma GUIDE do Matlab, com interface gráfica, possibilitando que o usuário insira os sintomas observados na máquina e receba recomendações de inspeção ou diagnósticos precisos.

Palavras-chave: Manutenção preditiva, Isolamento Elétrico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tempo de vida útil para as diferentes classes de isolamento 11
Figura 2 – Estator com isolamento altamente deteriorado termicamente..... 20
Figura 3 – Exemplo de estator com problemas de ciclos térmicos..... 23
Figura 4– Visão em corte de isolamento com sinais claros de descamação causados por impregnação inadequada 25
Figura 5 – Visão em corte de bobinado aleatório com espaçamento inadequado entre os fios magnéticos 27
Figura 6 – Estator com um calço removido apresentando sinais claros de falta de camada semicondutora..... 29
Figura 7 – Bobina pré-moldada com camada semicondutora e camada de sobreposição expostas..... 31
Figura 8 – Bobinado com manchas brancas circulares na saída da ranhura, indicando sinais de problemas na camada de sobreposição 32
Figura 9 – Bobinado em fios magnéticos com falha causada por surtos..... 34
Figura 10 – Motor com alto grau de contaminação por excesso de lubrificação 35
Figura 11 – Isolamento de máquina elétrica altamente contaminado por poeira e umidade.. 36
Figura 12 – Isolamento de estator apresentando sinais de rastro elétrico..... 36
Figura 13 – Dutos de ventilação de máquina elétrica entupidos por contaminantes externos 37
Figura 14 – Cabeça de bobina com espaçamento desuniforme e inadequado..... 42
Figura 15 – Pó branco gerado por descargas parciais entre bobinas próximas com espaçamento inadequado 43
Figura 16 – Menu de seleção do tipo de isolamento 45
Figura 17 – Fluxograma de avarias da sessão 5 46
Figura 18 – Nova abordagem proposta para a montagem da lógica do software..... 46
Figura 19 – Fluxograma resultante para avarias do motor de enrolamento aleatório 47
Figura 20 – Fluxograma resultante para avarias do motor de enrolamento aleatório 47
Figura 21 – Fluxograma resultante para avarias do motor de enrolamento pré-moldado 48
Figura 22– Fluxograma resultante para avarias do motor de enrolamento pré-moldado 48
Figura 23 – Tela de preenchimento de sintomas em enrolamentos aleatórios 49
Figura 24 – Tela de preenchimento de sintomas em enrolamentos pré-moldados..... 50
Figura 25 – Preenchimento testes exemplo 1 52
Figura 26 – Telas de alerta resultante do exemplo 1 53

Figura 27 – Preenchimento sintomas após desmontagem no exemplo 1 54
Figura 28 – Resultado diagnostico exemplo 1..... 54
Figura 29 – Resultado diagnostico exemplo 1 part 2 55
Figura 30 – Preenchimento testes exemplo 2 56
Figura 31– Telas de alerta resultante do exemplo 2 57
Figura 32 – Preenchimento sintomas após desmontagem no exemplo 1 58
Figura 33 – Resultado diagnostico exemplo 1 part 2 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Origem da falha de motores em uma planta industrial 10
Tabela 2 – Temperatura para 20.000 horas de operação das diferentes classes de isolamento 20
Tabela 3 – Valores de HIC para cada classe de isolamento 20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
TEREME	Técnica De Recuperação de Maquina Eletrica Ltda
VPI	Impregnação por pressão a vácuo
HIPOT	Teste de alto potencial
RI	Resistencia de Isolamento
IP	Índice de Polarização

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO 10
2 JUSTIFICATIVA 13
3 OBJETIVOS 14
4 ALOCAÇÃO DE RECURSOS 15
5 EMBASAMENTO TEÓRICO 16
5.1.Tipos de enrolamento do estator 16
5.2. Testes e inspeções 16
5.2.1 Teste de Resistência de isolamento 16
5.2.2 Descargas Parciais 17
5.2.3 Teste de alta potência 18
5.2.4 Teste resistência dos enrolamentos 18
5.2.5 Fator de Potência tip-up 18
5.2.6 Inspeção visual 19
5.3. Mecanismos de Falha 19
5.3.1 Deterioração térmica 19
5.3.2 Ciclos térmicos 22
5.3.3 Impregnação inadequada 24
5.3.4 Bobinado frouxo na ranhura 26
5.3.5 Falha na camada semicondutora 28
5.3.6 Falha de sobreposição na camada semicondutora 30
5.3.7 Falhas por surtos repetitivos de tensão 33
5.3.8 Contaminação 35
5.3.9 Partículas Abrasivas 39
5.3.10 Conexões Elétricas Deficientes 40
5.3.11 Espaçamento inadequado na cabeça de bobina 41
5.3.12 Vibração na cabeça de bobina 43
6 DESENVOLVIMENTO 45
7 ESTUDO DA APLICAÇÃO DO SOFTWARE 51
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO 60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 62

1 APRESENTAÇÃO

Em um estudo financiado pelo EPRI realizado em 1985 foram analisados cerca de 7500 motores de indução defeituosos quanto a origem de suas falhas (1). Após investigação rigorosa os autores chegaram a seguinte conclusão estatística:

Tabela 1 – Origem da falha de motores em uma planta industrial

Componente	Taxa de falha
Mancais	41%
Estator	37%
Rotor	10%
Outro tipo de falha	12%

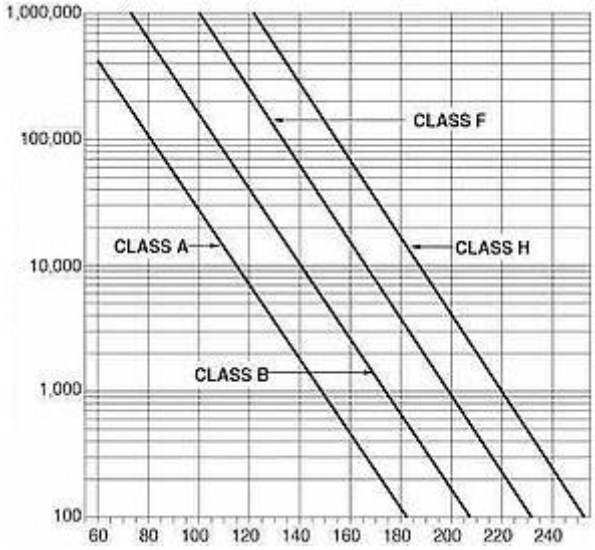
Fonte: Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations,1985

Observa-se que a grande parte das falhas dos motores elétricos aconteceram nos enrolamentos do estator. A maior parte dessas falhas não estão relacionadas a eventos catastróficos, mas sim com uma deterioração gradual ao longo do tempo, justificando assim o emprego do termo “Vida útil” de um motor.

Como o material isolante predominantemente orgânico deteriora mais rapidamente que o cobre e o aço devido a suas propriedades mecânicas e térmicas inferiores, pode-se afirmar que a vida útil do motor é o seu isolamento. Se o isolamento falha, um curto circuito para a massa ou entre fases ocorrerá, danificando o enrolamento e levando a máquina para ser reenrolada. Portanto a vida de um motor é o tempo de operação desde a fabricação até a sua queima. (2)

É comum que mesmo apresentando um isolamento severamente deteriorados pela ação térmica e do tempo, motores continuem operando de maneira normal. Isso acontece já que é necessário que uma segunda condição danosa (Transitória) simultaneamente ocorra para que o colapso do isolamento aconteça, como por exemplo: uma falta fase terra, relâmpago, sincronização fora de fase, erros de operação, problemas na alimentação, problemas na fonte de energia. Assim é impossível estimar a data exata em que a máquina irá falhar, mas fabricantes projetam seus motores para operarem por 10 a 40 anos antes que um rebobinamento seja necessário. A figura 1 mostra a relação da expectativa de vida de um motor com relação a temperatura de operação em seus enrolamentos, para cada classe de isolamento. (2)(3)

Figura 1 – Tempo de vida útil para as diferentes classes de isolamento



Fonte: Servicce fator:What is it and what does it do?,2015

Para que a máxima vida útil seja extraída da máquina rotativa, a mesma deve operar de acordo com suas especificações de projeto, no ambiente adequado para qual ela foi projetada e com seus dispositivos de proteção corretamente ajustados. Acima de tudo isso, uma manutenção preventiva e preditiva, seguindo padrões de execução, de preferência seguindo normas internacionais, irá estender de maneira exponencial o tempo operacional da máquina. (5)(6)

Falhas inesperadas de motores que acionam máquinas críticas para o processo produtivo causam perdas de produção com altos custos e em muitos casos falhas com motor em operação podem levar a danos economicamente irreparáveis, levando até a condenação completa do motor. Uma inspeção feita de maneira adequada, pode identificar uma falha iminente, sinalizando a necessidade da substituição da máquina ou de uma medida mitigadora, evitando assim que as tragédias anteriormente citadas ocorram. (2)

Esse trabalho tem como objetivo expor o desenvolvimento de um algoritmo para auxiliar o engenheiro de manutenção justamente no diagnostico dessas falhas iminentes no estator, dando suporte na tomada de decisões e guiando o usuário na melhor forma de tratar ou mitigar o problema.

O algoritmo não possui a pretensão de substituir o trabalho do engenheiro de manutenção na análise dos dados obtidos através dos testes e inspeções, mas somente auxiliar o mesmo no diagnóstico. O seu funcionamento será de caráter qualitativo, cabendo ao engenheiro de

manutenção avaliar quantitativamente o resultado dos testes e inspeções visuais e classificar os resultados em uma escala adequada.

Conforme (2),(7),(8),(9),(10), devido à grande variabilidade nas dimensões e propriedades físicas dos diferente tipos de estatores de maquinas elétricas rotativas, é de extrema dificuldade estimar valores absolutos adequados para os resultados obtidos nos testes de manutenção, portanto o funcionamento do algoritmo será todo enraizado na comparação dos resultados atuais com resultados de testes anteriores ou até mesmo com resultado de testes de maquinas semelhantes, na análise de tendência e na análise visual. Assume-se que o engenheiro de manutenção possui acesso ao histórico do equipamento a ser avaliado, que testes tenham sido realizados na periodicidade correta, de maneira uniforme, e que a manutenção tenha acesso ao interior do equipamento em uma periodicidade 8 anos, mesmo que talvez essa seja uma realidade muito distante do atual cenário da manutenção brasileira.

O desenvolvimento está focado em maquinas críticas para o processo industrial, que estão associadas a grandes perdas econômicas em caso de falha e preferencialmente de grande potência e tensão de operação.

2 JUSTIFICATIVA

A diagnose da condição do isolamento pode ser ardilosa até mesmo para os engenheiros mais experientes, devido a inúmeras diferentes possibilidades de avaria no isolamento da máquina elétrica, além disso a pressão que a manutenção recebe para que a máquina entre em operação o mais rápido possível é intensa, tornando o processo de diagnose ainda mais ardiloso. Muitas das vezes a melhor decisão a ser tomada não é a mais econômica financeiramente a curto prazo e pode ser interpretada por profissionais de outros setores como gasto, mas a longo prazo essa tomada de decisão pode resultar na prevenção de prejuízos milionários. Sendo assim, a existência de um algoritmo que apoie o engenheiro de manutenção, intensificando suas argumentativas para os outros setores da indústria e expandindo ainda mais os seus conhecimentos, é de extrema conveniência.

Como foi dito na sessão anterior, as versões mais atuais das bibliografias internacionais seguem um conceito de análise de tendência, analise do histórico da máquina, não somente analise singular dos resultados dos testes. As bibliografias nacionais encontram-se defasadas em relação a essa tendência mundial, e muita das vezes a indústria também segue esse padrão (11). O desenvolvimento de um algoritmo completamente em português apoiado em histórico do equipamento, por consequência estimularia a utilização dessa abordagem, estimularia a organização dos dados dos equipamentos de maneira mais efetiva e até mesmo a adoção de softwares com maior eficiência na gestão e organização do histórico dos equipamentos.

3 OBJETIVOS

Apresenta-se aqui o objetivo geral do trabalho e os objetivos específicos, os quais informarão a finalidade deste trabalho.

3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um algoritmo em MATLAB, de fácil utilização e com interface gráfica, capaz de estimar, através de sintomas visuais, histórico de testes off-line e online, falhas iminentes no enrolamento estatórico de maquinas elétricas rotativas.

3.2 Objetivos específicos

Apresentam-se aqui os objetivos específicos como meio se de alcançar o objetivo geral proposto:

- Estudar sobre o funcionamento do isolamento em motores elétricos;
- Estudar sobre os diferentes testes a serem realizados na manutenção do estator da máquina elétrica;
- Estudar sobre todas as possíveis falhas que podem ocorrer no enrolamento estatórico;
- Estudar sobre todos os sintomas relacionados a essas possíveis falhas;
- Estudar sobre as melhores medidas para solucionar ou mitigar as as possíveis falhas;
- Desenvolver um algoritmo em MATLAB que organize e exponha todas as falhas iminentes possíveis no enrolamento estatórico, a partir dos sintomas preenchidos pelo usuário e apresente a melhor ação a ser tomada para aquela condição.

4 ALOCAÇÃO DE RECURSOS

O material bibliográfico relativo a livros foi fornecido parte pela biblioteca central do campus da UFES, acervo na biblioteca da TEREME engenharia e parte por acervo pessoal obtido ao longo do curso de Engenharia Elétrica. O material relativo a artigos e publicações foram obtidas através da plataforma do IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos), sendo o acesso fornecido pela UFES. Normas ABNT foram acessadas através do acervo online da empresa TEREME engenharia.

Para a realização do desenvolvimento do software, foi utilizado a plataforma GUIDE do *MatLab. O* desenvolvimento do software foi realizado no laboratório LabTel, que possui senha de licença para uso do programa. Não foi necessária a aquisição de nenhum dispositivo e/ou equipamento a priori.

5 EMBASAMENTO TEÓRICO

5.1. Tipos de enrolamento do estator

Dois tipos básicos de estrutura de enrolamento são utilizados em estatores de maquinas elétricas rotativas: Enrolamentos aleatório e Pré-moldados.

Maquinas de enrolamentos aleatórios em geral operam com menos de 1000V, limitando a potência da máquina a algumas centenas de KW. Ela recebe esse nome porque cada laço dos fios magnéticos pode, em princípio, ser posicionado aleatoriamente entre eles. A volta conectada a fase pode estar adjacente a uma conectada ao neutro.

Estatores de enrolamento pré-moldado são feitos para máquinas operando com mais de 1000V. Esses enrolamentos são feitos de bobinas pré-formadas antes da inserção nas ranhuras do estator. O desenvolvimento do bobinado é cuidadosamente feito para que cada volta fique adjacente a outra volta com a menor diferença de tensão possível.

5.2. Testes e inspeções

5.2.1 Teste de Resistência de isolamento

O teste de resistência de isolamento mede a resistência do isolamento entre os condutores de cobre e o corpo do estator. Idealmente essa resistência é infinita, já que o propósito do isolamento é justamente bloquear a corrente que flui entre o cobre e o corpo do estator. Comumente, quanto menor a resistência de isolamento, maiores as chances de o isolamento apresentar problemas.

Uma continua tensão é aplicada no isolamento para que a resistência seja medida. A corrente resultante desse processo é composta de quatro componentes: corrente capacitiva (exponencial), corrente de condução (constante), corrente de fuga superficial (constante) e a corrente de absorção (exponencial). Isolamento com sérios danos ou contaminação apresentarão uma corrente de fuga superficial e de condução elevadas, fazendo com que assim a resistência de isolamento apresente valores bem inferiores.

Medições são feitas após 1 minuto de aplicação da tensão DC para que a componente absortiva da corrente não influencie no teste. Pode-se medir também as correntes em tempos subsequentes, em especial após 10 minutos, obtendo assim o valor do índice de polarização:

$$IP = \frac{R_{10}}{R_1}$$

Onde:

IP é o índice de polarização

R_{10} é a resistência de isolamento medida após 10 minutos

R_1 é a resistência de isolamento medida após 1 minuto

O índice de polarização tem grande relação com o grau de contaminação do isolamento, pois com o incremente da corrente superficial (constante) causada pela contaminação, os valores que decaem exponencialmente com o tempo passam a ser uma parcela muito menor da corrente total.

Para análise de tendência, valores de Resistencia de isolamento devem ser corrigidos para mesma temperatura, recomenda-se especialmente 40º graus Celsius. O índice de polarização pode ser comparado diretamente em medições feitas em diferentes datas, já que R_{10} e R_1 foram medidos em mesma temperatura. (7)

5.2.2 Descargas Parciais

Descarga parcial é um processo que ocorre em resultado de grande estresse elétrico no estator da máquina rotativa.

Pelas propriedades capacitivas, a distribuição de potencial elétrico no isolamento tende a se acumular nas bolhas de ar contidas nele. Assim, se uma bolha de ar existe dentro do isolamento, a tensão elétrica no isolamento pode levar a um colapso no ar da bolha (robustez elétrica do ar é próxima de 3kv/mm), gerando faíscas. Os elétrons e íons nas faíscas degradarão o isolamento, e se não corrigidos, eventualmente causarão um buraco através do isolamento, levando a completa falha do mesmo. (2)

Nos dias atuais, existem métodos extremamente eficazes na medição de descargas parciais na máquina elétrica, tanto com a máquina em operação, quanto com a máquina parada. Estimasse que um bom indicativo para problemas relacionados a descargas parciais seja a duplicação dos valores medidos em um tempo igual ou menor que seis meses. (15)

5.2.3 Teste de alta potência

O proposito principal desse tipo de teste é determinar se existe falhas maiores no isolamento da máquina antes que o enrolamento entre em operação. O princípio é que se existe alguma falha no isolamento, uma tensão grande o bastante aplicado no enrolamento fará com que o isolamento entre em colapso na falha. (8)

5.2.4 Teste resistência dos enrolamentos

Se os condutores nos enrolamentos do estator quebrarem ou racharem, a resistência CC entre os terminais do enrolamento irá aumentar, devido a redução da seção transversal que a corrente passa. Existem diversas razões para o incremento na resistência do enrolamento: Vibração excessiva, conexões mal soldadas, forças centrifugas e curto entre voltas do bobinado.

A resistência do enrolamento é medida aplicando tensão nos terminais e medindo a corrente que percorre pelo enrolamento. A resistência é a tensão dividida pela corrente. Resistências do estator estão entre valores extremamente baixos, variando de menos de 1Ω para maquinas pequenas até menos de um miliohm para maquinas maiores.

Os valores obtidos são extremamente influenciados pela temperatura no enrolamento do estator, por isso para a análise de tendência ao longo dos anos, deve-se corrigir a resistência do cobre para o equivalente em 20° célsius.

A resistência medida de cada fase deve estar entre 3% de uma outra para enrolamentos aleatórios e 1% em enrolamentos pré-moldados. Valores diferentes disso podem indicar a quebra ou até mesmo conexões irregulares na fase. (12)(2)

5.2.5 Fator de Potência tip-up

Descargas parciais ocorrem somente onde há grande estresse elétrico. Então, descargas parciais só ocorrem em testes que aplicam grandes tensões. Usando desse princípio, o teste de fator de potência tip-up mede a capacitância do isolamento em tensões baixas e em tensões elevadas, realizando uma subtração entre elas.

Com a ocorrência de descargas parciais, as bolhas no isolamento “curto circuitam” assim, a capacitância medida em altas tensões equivale somente a capacitância do isolamento, enquanto que em baixas tensões as bolhas são inclusas nessa medição. Assim consegue-se medir a

quantidade de bolhas e o volume das bolhas no isolamento. Quanto maiores as bolhas, mais próximo o isolamento está de colapsar. (9)

5.2.6 Inspeção visual

Mesmo com o desenvolvimento de novas tecnologias de testes em operação e fora de operação, inspeção visual do enrolamento feita por um especialista em manutenção ainda é a ferramenta mais poderosa no diagnóstico das condições do isolamento e na determinação na causa do desenvolvimento do problema. Entretanto, existem diversões problemas com a inspeção visual:

- Requer a parada da máquina, e muita das vezes uma desmontagem parcial ou total do motor;
- Requer mão de obra extremamente experiente;
- Desmontagem da máquina pode levar a problemas que não existiam, causados pela remontagem da máquina.

Assim, a desmontagem deve ser desencadeada por resultados ruins nos testes e inspeções elétricas, ou até mesmo quando o modelo da máquina já apresenta um histórico de um problema especifico e deve ser monitorada com maior cautela. Recomenda-se a desmontagem de maquinas importantes com uma periodicidade de 6 a 8 anos. (14)(2)

5.3. Mecanismos de Falha

5.3.1 Deterioração térmica

A deterioração térmica ocorre tanto em estatores de enrolamento aleatório quanto em enrolamentos pré-moldados. É uma das causas mais comuns de falha nos enrolamentos, especialmente em maquinas com refrigeração a ar.

A deterioração térmica é essencialmente uma reação química de oxidação, ou seja, em temperaturas suficientemente, as ligações químicas nas partes orgânicas do isolamento ocasionalmente se rompem devido a vibração induzida termicamente das ligações químicas. O isolamento se torna quebradiço, com menor resistência mecânica e menor capacidade de aglutinação entre as camadas. (2)

Figura 2 – Estator com isolamento altamente deteriorado termicamente

Fonte: Root Cause Failure Analysis, 2016

A velocidade da deterioração depende do material isolante e da temperatura de operação do isolamento. A tabela 2 explicita a temperatura de operação das classes de isolamento mais comuns para uma expectativa de vida média de 20.000 horas (aproximadamente 3 anos).(18)

Tabela 2 – Temperatura para 20.000 horas de operação das diferentes classes de isolamento

Classe de isolamento	Temperatura
B	130
F	155
H	180

Fonte: "Desenvolvimento de um Algoritmo para estimar a para Estimar a Vida Útil de motores Trifásicos de Indução", 2016

Como o processo de oxidação é uma reação química, quanto maior a temperatura, mais rápida será a reação, e, portanto, menor o tempo para que o isolamento degrade. Para uma estimativa mais precisa da degradação do isolamento BONNETT (2000) propõe a utilização do HIC, que é a elevação da temperatura no isolamento em graus célsius para que a sua expectativa de vida caia em 50%. Segue a tabela de HIC para as diferentes classes de isolamento.

Tabela 3 – Valores de HIC para cada classe de isolamento

Classe de isolamento	HIC
B	11
F	9,3
H	8

Fonte: BONNET, 2000

Assim um isolamento classe F operando a uma temperatura de 164,3° célsius terá sua vida útil reduzida para somente 10.000 horas.

A temperatura de operação no isolamento sofre influência direta da qualidade da fonte de potência do nosso motor, da carga a ser acionada e da sua capacidade do motor de trocar calor

com o ambiente (5). Podemos sumarizar uma grande elevação da temperatura do enrolamento nas seguintes causas (17):

- Operação em sobrecarga;
- Projeto inadequado;
- Manufatura inadequada;
- Tempo insuficiente entre as partidas;
- Alta quantidade de harmônicas de corrente gerada por inversores de frequência;
- Enrolamentos com alto grau de contaminação;
- Trocadores de calor entupidos ou com alto grau de contaminação;
- Enrolamentos frouxos na ranhura;
- Excesso de impregnação.

Sintomas

Enrolamentos aleatórios

Um isolamento deteriorado termicamente em enrolamentos aleatórios pode apresentar os seguintes sintomas (2):

- Evidencias de rachadura no filme do isolamento do fio magnético;
- Isolamento do fio magnético descascando;
- Forro e verniz descolorido ou quebradiço;
- Afundamento vertiginoso na resistência de isolamento e no IP indicam isolamento rachado;
- Decremento na tensão de falha em surto;
- Pequeno decremento na capacitância e um pequeno incremento do fator de dissipação.

Enrolamentos pré-moldados

Um isolamento deteriorado termicamente em enrolamentos pré-moldados pode apresentar os seguintes sintomas (2):

- Isolamento inchado;
- Isolamento soando oco ao ser batido com um martelo;

- Decremento na capacitância;
- Incremento no fator de potencia;
- Incremento nas descargas parciais.

Medidas a serem tomadas

A deterioração térmica não é reversível por si só, sendo assim a única forma de reparar uma máquina com o isolamento altamente deteriorado é através da rebobinagem.

A melhor medida contra esse tipo de problema é agir de forma preventiva, atacando as diferentes possíveis causas do sobre aquecimento de maneiras particulares, estendendo assim a vida útil do equipamento. As seguintes medidas podem ser tomadas (2):

- Limpar os enrolamentos e os trocadores de calor, caso de contaminação e tubulação entupida;
- Garantir que a tenha um desequilíbrio de no máximo 1%;
- Melhorar o trocador de calor;
- Resfriar o ar ambiente;
- Instalar relés de proteção para prevenir partidas frequentes;
- Reduzir a máxima carga permitida;
- Ajustar o fator de potência em maquinas síncronas para reduzir a corrente estatórica.

5.3.2 Ciclos térmicos

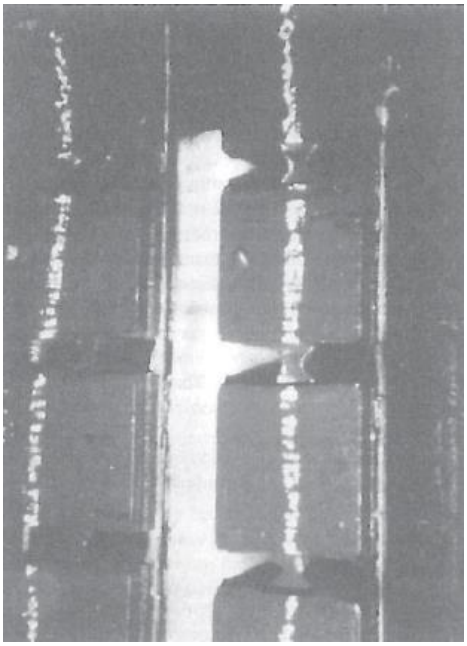
Esse tipo de deterioração mais comumente ocorre em maquinas mais longas (tipicamente maiores que 2m), ou em enrolamentos pré-moldados de maquinas que passam por muitas partidas frequentes e mudanças de carga (20).

A temperatura gerada devido as grandes correntes circulando nos enrolamentos irão criar expansões nos diferentes materiais da máquina. A diferença no fluxo de calor dentre cada uma dessas sessões irá levar a uma expansão térmica diferencial. Esse tipo de expansão diferencial na máquina pode resultar em um incremento nas forças atuando no isolamento e potenciais rachaduras que criam defeitos no isolamento principal da máquina. Um incremento vagaroso na carga, por exemplo, irá gerar um aumento de temperatura no cobre e no aço em taxas relativamente parecidas. Já com um incremento muito vertiginoso na carga uma expansão no

cobre será criada antes mesmo que a massa de aço do estator consiga expandir. Isso irá causa um incremento nas forças atuando no enrolamento, tornando-se assim propenso a danos. (2)

A figura 3 mostra um exemplo de um defeito resultante das forças geradas pela expansão dos diferentes materiais de um gerador

Figura 3 – Exemplo de estator com problemas de ciclos térmicos



Fonte: C. STONE, GREG, CULBERT, IANA. BOULTER, EDWARD, 2014

Podemos sumarizar a causa dos problemas relacionados a ciclos térmicos do enrolamento nas seguintes causas (2):

- Mudanças muito rápidas da carga para aquele projeto de maquina;
- Operação em temperatura de estator muito elevada;
- Projeto inadequado do sistema de isolamento.

Sintomas

Os seguintes sintomas estão relacionados a problemas com ciclos térmicos (2):

- Pouca indicação visual do problema em enrolamentos pré-moldados;
- Isolamento soando oco ao ser batido em enrolamentos pré-moldados;
- Pó branco nos dutos de ventilação e sinais de descargas parciais em estatores VPI;

- Incremento vertiginoso no Fator de potência tip-up e nos testes de descarga parcial online e off-line.

Medidas a serem tomadas

A deterioração por ciclos térmicos não é reversível, sendo assim a única forma de reparar uma máquina com o isolamento altamente deteriorado é através da rebobinagem. Entretanto há vários métodos disponíveis para que o processo de deterioração seja reduzido (2):

- Diminuir a taxa de incremento e decremento da carga;
- Reduzir a temperatura de operação, diminuindo a carga máxima permitida;
- Em caso de geradores, operar o mais próximo possível do FP unitário;
- Injetar epóxi carregado de carbono entre as ranhuras e os enrolamentos em caso de estatores VPI.

5.3.3 Impregnação inadequada

A maior parte dos estatores de enrolamento aleatório são mergulhado em resina ou em verniz após serem enrolados, com o intuito de proteger o enrolamento contra sujeira e humidade, melhorar a transferência de temperatura para a carcaça e firmar o enrolamento na ranhura. Enrolamentos pré-moldados passam pelo processo de VPI pelos mesmos motivos, além de prevenir descargas parciais em função dos espaços preenchidos pela resina. Falha por impregnação inadequada é mais comum em estatores que passaram pelo processo de VPI. Essa costuma ocorrer em um período inferior a 2 anos de operação. (14)

A impregnação inadequada torna o estator muito mais propenso a falhas devido a sujeira, poluição, óleo e humidade. Além disso, uma impregnação grosseira no estator pode levar a temperatura de operação superiores a adequada, devido a propriedade térmica de condução inferior do isolamento. Em enrolamentos operando a uma tensão nominal de 6kV descargas parciais irão ocorrer, principalmente nas bobinas conectadas aos terminais de fase. (2)

As principais causas de uma impregnação inadequada são:

Em estatores de enrolamento aleatório:

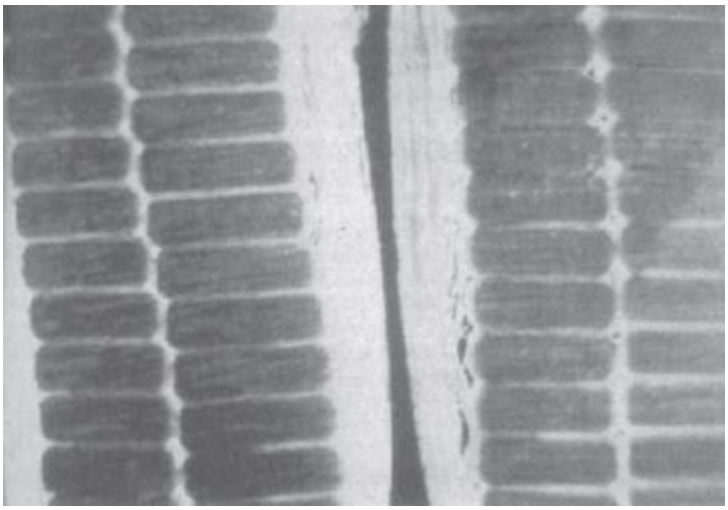
- Resina/Verniz com viscosidade inadequada;

- Utilizar procedimento inadequado de impregnação, não seguindo as recomendações do fabricante;
- Usar um fio magnético que não é compatível quimicamente com a resina/verniz;
- Temperatura e tempo inadequados de cura em estufa.

Em estatores de enrolamentos pré-moldados VPI:

- Fitas de isolamento com rugas;
- Viscosidade inadequada da resina;
- Resina que passou por muitos ciclos de VPI e não foi ajustada para as especificações químicas adequadas;
- Fita de isolamento incompatível com a resina utilizada;
- Pré-aquecimento inadequado, ciclo de vácuo VPI curto;
- Cobertura inadequada do estator ou enrolamento com resina na impregnação;
- Tempo e pressão inadequados na impregnação.

Figura 4– Visão em corte de isolamento com sinais claros de descamação causados por impregnação inadequada



Fonte: C. STONE, GREG, CULBERT, IANA. BOULTER, EDWARD, 2014

Sintomas

Enrolamentos aleatórios

Os seguintes sintomas estão relacionados a problemas com impregnação inadequada:

- Interstícios não preenchidos com resina;

- Ausência de brilho nas bobinas;
- Baixa resistência de isolamento.

Enrolamentos pré-moldados

Problemas desse tipo são de difícil identificação visual em enrolamentos pré-moldados, mas os seguintes sintomas podem ser obtidos através de testes off-line e on-line:

- Incremento nas descargas parciais;
- Resultados inconsistentes em teste de surto.

Medidas a serem tomadas

O Isolamento de estatores de enrolamento aleatório pode ser completamente restaurado repetindo o processo de impregnação e cura da resina, caso uma falha grave ainda não tenha ocorrido. Em estatores pré-moldados não há muito que ser feito para corrigir um processo de impregnação inadequado uma vez que o estator já está curado. (2)

5.3.4 Bobinado frouxo na ranhura

Enrolamentos ou as barras na ranhura do estator da máquina elétrica rotativa estão sujeitos a força mecânicas induzidas magneticamente oscilando com o dobro da frequência da rede. Se os enrolamentos estão justos na ranhura para uma carga nominal, essas forças causam pouco ou nem um impacto no isolamento. Entretanto, caso o enrolamento não esteja bem apertado, e vibre conforme a corrente no circuito estatórico aumente, o isolamento irá roçar no corpo do estator, principalmente em direção radial. Como o corpo do estator é composto de laminas de aço, as bordas serrilhadas das laminas de aço serão de grande efetividade abrasiva.

Existem basicamente dois estagio nesse processo de falha, um em que a camada semicondutora ainda se encontra intacta e outra em que a mesma já está raspada. No primeiro caso, faíscas serão geradas quando a camada semicondutora desencostar do corpo do estator e re encostar, descarregando a carga capacitiva acumulada no espaço vazio. Se a camada semicondutora já estiver danificada, descargas parciais irão ocorrer nas bobinas de maior tensão, descargas essas que irão acelerar ainda mais o processo de degradação do isolamento.

O fator fundamental para a causa da falha são forças magnéticas, mas as bobinas e barras não irão vibrar se elas não tiverem pelo menos com um mínimo de folga na ranhura para começar.

Em enrolamentos antigos, a expansão do isolamento conforme a temperatura do enrolamento sobe, mitiga esse tipo de problema. Em isolamentos mais modernos, entretanto, o coeficiente de expansão do isolamento com a temperatura não é tão acentuado, fazendo assim com que isolamentos folgados de uma máquina fria reflitam em folgas em operação. Parte desse problema pôde ser resolvido utilizando calços duplos com uma mola entre eles, que geram uma força positiva para dentro da ranhura.

Falhas induzidas por folga do bobinado dentro da ranhura são mais suscetíveis em grandes geradores modernos a gás e a vapor. O problema está comumente associado a enrolamentos pré-moldados que não foram produzidos utilizando processo de VPI. Estatores de enrolamentos aleatórios só apresentam essa falha em caso de impregnação inadequada. (2)

Figura 5 – Visão em corte de bobinado aleatório com espaçamento inadequado entre os fios magnéticos

Fonte: Root Cause Failure Analysis, 2016

Frouxidão no isolamento pode estar associado a (2):

- Encolhimento no isolamento. Materiais orgânicos tendem a encolher com o envelhecimento térmico;
- Perda de força tensora na mola com o passar do tempo, especialmente na presença de óleo;
- Presença de óleo que facilita a movimentação entre a bobina e o corpo da máquina, devido a sua propriedade lubrificante;
- Calços frouxos com o passar dos anos.

Sintomas

O estator da máquina elétrica rotativa apresenta os seguintes sintomas na presença de bobinados frouxos nas ranhuras:

- Pó branco nos dutos de ventilação da máquina rotativa, caso a máquina não esteja contaminada com óleo;
- Sinais visuais de queima causados por descargas parciais ;
- Calços frouxos, gerando um ruído surdo ao ser batido com uma marreta;
- Calço danificado por abrasão;
- Incrementos nos valores obtidos nos testes de resistência semicondutora;
- Incremento significativo nas descargas parciais;
- Presença significativa de ozônio nos dutos de ventilação.

Medidas a serem tomadas

Se o problema for detectado em seu estágio inicial, ou seja, no estágio 1 do processo (camada semicondutora ainda presente), pode-se restaurar o estator apenas reapertando o bobinado na ranhura. Pode-se tomar um ou mais dos seguintes passos (2):

- Substituir os calços;
- Substituir os calços comuns por calços duplos com molas;
- Substituir as molas, se elas perderam suas propriedades físicas;
- Injetar tinta rica em carbono, silicone ou epóxi nas ranhuras.

Em segundo estágio, com a camada semicondutora destruída em alguns lugares, todas a medidas a cima podem ser tomadas para diminuir o processo de falha, entretanto, experiência mostra que substituir completamente a camada semicondutora é impossível. (2)

5.3.5 Falha na camada semicondutora

Por razões obvias esse tipo de falha só ocorre em bobinas pré-moldadas e barras que possuem tinta rica em carbono ou fitas como camadas semicondutoras. Normalmente ocorre em estatores de tensão nominal acima de 6kV.Como o processo está diretamente relacionado com descargas parciais, o problema é mais comum de ocorrer em maquinas resfriadas a ar. Esse processo ocorre mesmo com as bobinas bem ajustadas na ranhura, se diferenciando assim do problema explicitado na sessão 4.4.

Figura 6 – Estator com um calço removido apresentando sinais claros de falta de camada semicondutora

Fonte: C. STONE, GREG, CULBERT, IANA. BOULTER, EDWARD, 2014

A camada semicondutora é colocada na superfície das barras e bobina de alta tensão para prevenir descargas parciais. Nesse processo de falha, a camada torna-se não condutiva por oxidação das partículas de carbono, e em algumas localidades pode até se tornar inexistente.

Em maquinas resfriadas a ar, descargas parciais irão criar ozônio, que combinado com outros gases ira formar ácido nítrico, atacando o isolamento em diversas substancias incluindo epóxi, poliéster, compostos de borracha e aço. Esse ataque químico na ranhura pode levar um bobinado que estava inicialmente justo a se tornar frouxo, desencadeando a um efeito cascata junto ao processo explicito em 4.4. Fora isso, a presença de ozônio pode tornar o ambiente de trabalho inseguro e corroer os trocadores de calor do equipamento.

A origem desse tipo de problema está relacionada a uma manufatura de baixa qualidade, tanto no processo de aplicação da camada quanto no processo de teste da regularidade na resistência da mesma. A irregularidade na camada fará com que existam pontos locais de calor Ri^2, pela corrente capacitiva que eventualmente irá passar pela camada semicondutora. Pontos de calor, juntamente com a elevação geral da temperatura no enrolamento, podem levar a oxidação da camada semicondutora, que eleva a resistência da camada semicondutora, que intensifica ainda mais o problema. (2)

Sintomas

Esse tipo de problema pode ser identificado facilmente através de inspeção visual, apresentando os seguintes aspectos:

- Camada semicondutora com manchas brancas, amarelas, cinzas ou verdes (verificar dutos de ventilação dos enrolamentos conectados aos terminais de fase);
- Trechos onde a camada semicondutora não existe (embaixo dos calços).

Tanto testes on-line e off-line de descargas parciais podem detectar esse problema em estágios iniciais. (15)

Medidas a serem tomadas

A melhor forma de prevenir a deterioração da camada semicondutora é garantir que a manufatura tenha sido realizada da forma correta. Isso significa medir frequentemente a resistividade superficial antes que o bobinado seja instalado na ranhura. Caso esse problema ocorra com o estator em operação, não há forma de reparar permanentemente o enrolamento, a não ser com uma remoção completa da bobina e uma nova camada seja aplicada. Como a remoção do enrolamento pode ser danosa ao bobinado, disponibilidade de bobinas reservas é crítica na execução dessa tarefa.

Medidas mitigadoras do problema podem ser tomadas como: Injetar verniz rico em carbono, silicone ou epóxi nas ranhuras operando em alta tensão.

Caso não ocorra frouxidão nas bobinas por consequência dessa falha, o colapso da máquina pode levar décadas. Entretanto, se os enrolamentos se tornar frouxo, ações apropriadas especificadas na sessão 4.4 devem ser tomadas. (2)

5.3.6 Falha de sobreposição na camada semicondutora

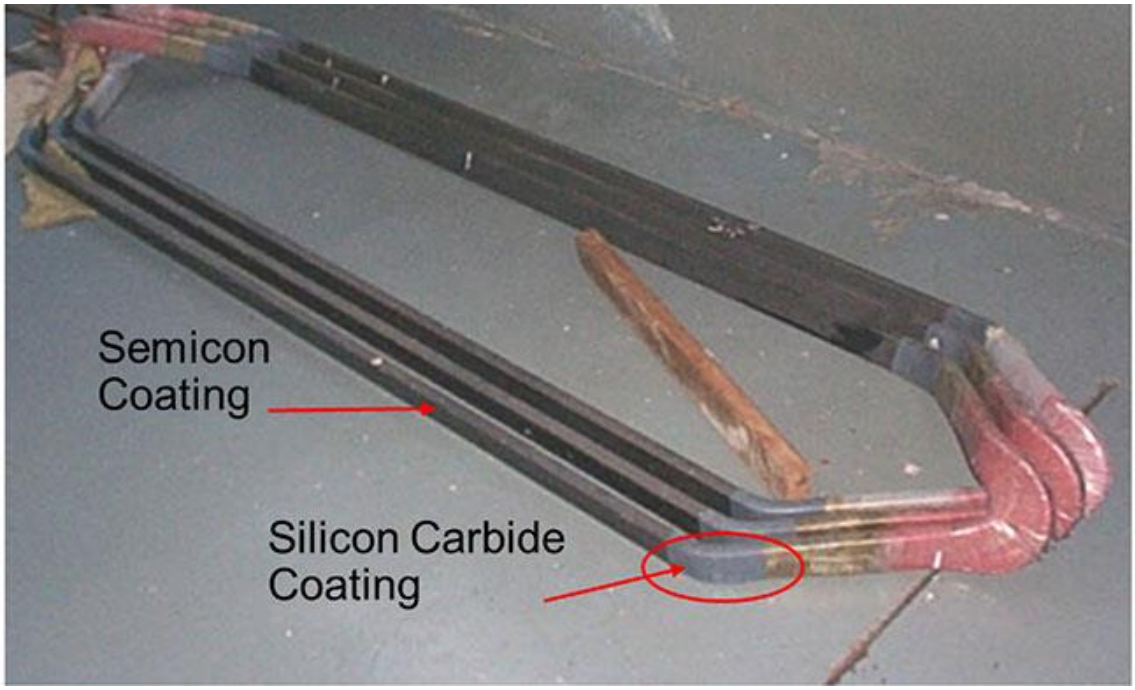
A camada semicondutora de baixa resistência se estende somente a alguns centímetros além da ranhura, caso contrário a superfície aterrada estaria muito próxima de uma conexão de uma barra/bobina com a outra.

Entretanto a camada semicondutora não pode terminar abruptamente, já que isso criaria um grande campo elétrico naquele local. O campo excederia 3kv/mm, e descargas parciais ocorreriam no local. Tais descargas iriam eventualmente destruir o isolamento na vizinhança, levando a falha na máquina.

Com intuito de solucionar esse problema, fabricantes adotaram o carboneto de silício, que possui propriedades interessantes: A medida que a tensão elétrica aumenta no material, a sua

resistência diminui. Ou seja, o material não é ôhmico. Quando aplicado no estator, o carboneto de silício apresenta baixa resistência de isolamento na região de grande estresse no final da camada semicondutora, e gradualmente tem sua resistência incrementada a medida que percorre em direção ao final do enrolamento. Essa resistência variante torna o campo elétrico no final da camada semicondutora muito mais uniforme. (2)

Figura 7 – Bobina pré-moldada com camada semicondutora e camada de sobreposição expostas



Fonte: Root Cause Failure Analysis, 2016

A camada de carboneto de silício deve sobrepor a camada semicondutora em cerca de 1 centímetro para que a mesma fique eletricamente aterrada. Caso a camada de sobreposição se torne não condutiva, o carboneto de silício não estará mais aterrado. Ele ficará com uma tensão flutuando, e tenderá a elevar sua tensão para próxima da do cobre na bobina, devido ao acoplamento capacitivo. Portanto assim uma grande tensão existira entre a camada semicondutora (a 0V) e a camada de carboneto de silício. Consequentemente causando colapso, resultando em descargas sobre a superfície do bobinado entre as suas diferentes camadas.

Essas descargas não são consideradas descargas parciais por não se apresentarem de forma perpendicular a superfície do isolamento, mas em paralelo. Dificilmente esse processo leva a uma falha no isolamento, não em pelo menos 20 anos. (2)

Descargas na sobreposição da camada semicondutora estão associados a uma fabricação inadequada ou controle de qualidade pobre. É geralmente causado por um aumento da temperatura no local de contato, causado por uma resistência de contato inicial alta, que leva a oxidação local, causando um incremente ainda maior na resistência. As causas iniciais de uma resistência alta de contato são (2):

- Densidade incorreta de partículas de carbono na camada semicondutora;
- Densidade incorreta das partículas de carboneto de silício;
- Área de sobreposição das camadas inadequada para as correntes capacitivas que ali circulam.

Sintomas

Esse problema pode ser facilmente identificado por uma inspeção visual no final dos enrolamentos. Bobinas que operam em alta tensão irão apresentar uma faixa branca em sua circunferência, logo em alguns centímetros da saída da ranhura. (2)

Figura 8 – Bobinado com manchas brancas circulares na saída da ranhura, indicando sinais de problemas na camada de sobreposição

Fonte: C. STONE, GREG, CULBERT, IANA. BOULTER, EDWARD, 2014

Testes de descargas parciais, inspeção visual durante o teste de blecaute e testes de ozônio também identificarão o problema.

Medidas a serem tomadas

Não existe reparo permanente uma vez que esse problema ocorre. Se o final do bobinado não foi pintado com verniz isolante, então um reparo efetivo pode ser feito. Isso envolve limpar a região de sobreposição e aplicar tinta parcialmente condutora sobre a camada semicondutora na superfície próxima da ranhura. A nova camada de tinta deve entender sobre a região de sobreposição e cobrir o carboneto de silício em pelo menos 1 centímetro. A ideia é recuperar a conexão de terra da camada de carboneto de silício. (2)

5.3.7 Falhas por surtos repetitivos de tensão

Surtos de tensão no enrolamento do estator em motores e geradores são descargas transientes de tensão relativamente altas que aumentam o estresse além daqueles que ocorrem em serviço normal. Surtos de tensão ocorrem (13):

- Com descargas atmosféricas;
- Com faltas fase terra no sistema de potência;
- Fechamento de disjuntor de geradores em condições fora de fase;
- Abertura e fechamento de disjuntores no circuito do motor;
- Inversores de frequência.

Até recentemente, acreditava-se que surtos de tensões poderiam somente causar a falha imediata, e não possuíam efeito a longo prazo. Isso é verdade apenas para as 4 primeiras fontes de falha, não sendo o caso dos surtos gerados por inversores de frequência.

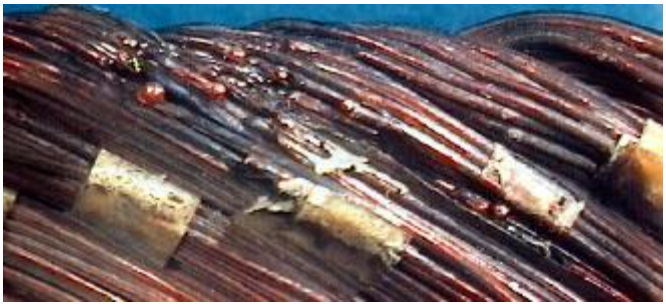
Com a introdução de inversores de frequência a deterioração gradual ocorre se as magnitudes dos surtos forem suficientemente altas, o tempo de subida baixo, e os surtos são frequentes.

Motores de enrolamento aleatório de tensão nominal entre 400V e 1000V acionados por inversores de frequência PWM usando elementos moderno de chaveamento como IGBT são mais prováveis de sofrerem ação desse mecanismo de falha. (13)

Surtos produzidos por inversores de frequência podem gerar transientes de tensão com tempo de subida tão baixos quanto 50ns, que por consequência gerarão frequências de até 10 MHz. A tensão na frequência da rede é distribuída linearmente entre as voltas adjacentes entre o terminal de fase e o neutro. Entretanto, para frequência altas, essa distribuição passa a ser não linear, com uma tensão entre voltas muito maior na bobina conectada a fase. Isso ocorro pois em altas frequência a indutância serie é relativamente alta em relação a capacitância shunt para a terra.

Uma alta tensão entre voltas pode resultar em descargas parciais entre os fios de cobre, na camada de ar entre eles. Como fios magnéticos convencionais de estatores de enrolamentos aleatório não são preparados para descargas parciais, esse tipo de equipamento fica suscetível a uma falha entre as voltas, podendo progredir para uma falha a terra. (2)

Figura 9 – Bobinado em fios magnéticos com falha causada por surtos



Fonte: Root Cause Failure Analysis, 2016

Sintomas

Em motores de enrolamento aleatório, problemas de descargas parciais gerados por surtos frequente apresentarão os seguintes sintomas:

- Presença de pó branco no fio magnético, especialmente nas voltas próximas a fase;
- Pontos de luz no teste de blackout;
- Descargas parciais em testes off-line e on-line;
- Medidores convencionais de descargas parciais são destruídos pelos surtos.

Não há marcas visuais desse problema em estatores de enrolamento pré-moldado, apenas a presencia de ozônio nos dutos de ventilação.

Medidas a serem tomadas

Para reduzir a severidade dos surtos causados por inversores de frequência, pode-se:

- Mudar o comprimento do cabo terminal conectado ao inversor ou isolamento do mesmo;
- Substituir o cabo por um com maior impedância de surto, ou um cabo com maiores perdas dielétricas;
- Instalar um filtro passa baixa entre o inversor e o motor.

5.3.8 Contaminação

Contaminação nos enrolamentos acarreta em diversos problemas, incluindo aumento da temperatura de operação, ataques químicos e rastreamento elétrico.

O ar refrigerado em equipamentos de ventilação em aberto pode estar contaminado com poeira, insetos, cinzas, produtos químicos, cimento, etc. Esse tipo de contaminante junto a presença de humidade ou óleo produzem uma camada parcialmente condutora na superfície do enrolamento. O óleo tem origem nos rolamentos, que muitas das vezes é lubrificada na frequência e em quantidade inadequada, causando a vazão do mesmo para os enrolamentos. A humidade tem origem no ambiente, vazamentos de gás ou até mesmo vazamentos em um sistema de refrigeração a ar. (23)

Figura 10 – Motor com alto grau de contaminação por excesso de lubrificação

Fonte: A Review of Cleaning Methods for Motor Windings,2008

Com uma camada parcialmente condutora na superfície do isolamento, a deterioração por rastro elétrico ocorre da seguinte forma: Assumimos que dois enrolamentos adjacentes, com presença de contaminação estejam conectados a diferentes fases. Por acoplamento capacitivo, as superfícies contaminadas desses isolamentos tenderão a adquirir uma tensão flutuante equivalente a do cobre envolvido. Essas superfícies contaminadas se interconectam pela superfície dos blocos usados para criar rigidez mecânica no final das bobinas, com isso uma pequena corrente flui através dessas superfícies contaminantes interligadas.

Figura 11 – Isolamento de máquina elétrica altamente contaminado por poeira e umidade

Fonte: Root Cause Failure Analysis, 2016

Se a superfície contaminante possuísse uma resistência uniforme, então uma deterioração inexpressiva iria acontecer, já que a corrente conduzida é mínima. Entretanto, na realidade, existem bandas onde a resistência no contaminante é muito maior. Nesse caso, pelo princípio de divisão de tensão, a queda de tensão se concentrará toda nessas bandas, causando colapso no ar ao redor, degradando e carbonizando a resina e a fitas isolantes naquele ponto. Eventualmente essa banda irá se tornar condutiva, e a degradação migrará para outra região do isolamento. Como resultado disso, um rastro que cresce em ramos, com aparência carbonizada, ou até mesmo com fendas, surge no isolamento do enrolamento. Esse mecanismo de degradação atua de forma vagarosa, levando comumente mais de 10 anos desde a contaminação até o colapso completo do enrolamento. (2)

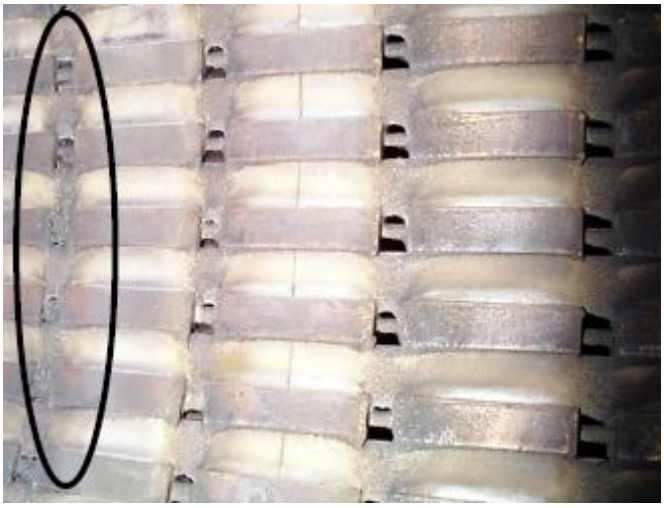
Figura 12 – Isolamento de estator apresentando sinais de rastro elétrico

Fonte: A Review of Cleaning Methods for Motor Windings,2008

Uma grande contaminação nos enrolamentos pode levar também a operações em temperaturas mais elevadas do que as condições normais de operação, devido as propriedades de condução térmica dos contaminantes não terem a mesma qualidade da do material utilizado na construção do motor. Em casos mais severos, os contaminantes podem causar até mesmo a obstrução do

ar refrigerante, bloqueando assim de forma expressiva a circulação de ar ambiente, levando a operação em temperaturas elevadíssimas, diminuindo severamente assim a vida útil do motor. (14)(6)

Figura 13 – Dutos de ventilação de máquina elétrica entupidos por contaminantes externos



Fonte: C. STONE, GREG, CULBERT, IANA. BOULTER, EDWARD, 2014

Sintomas

A evidencia mais óbvia do problema é a presença de contaminantes em uma inspeção visual. Na maioria dos casos ele irá aparecer em forma de um filme escuro que pode ser removido. Entretanto mesmo com o enrolamento limpo, o mesmo pode apresentar humidade por condensação ou por vazamentos. Assim mesmo em enrolamentos que aparentemente estão limpos podem ocorrer falhar por contaminação. Uma variação de mais de 10ºC na temperatura paras as mesmas condições de operação também é um forte indicativo de contaminação. (14)

Testes off-line podem ser muito confiáveis para detectar esse tipo de problema se comparados a valores medidos na máquina não contaminada (43) (9):

- Declínio nos valores de resistência de isolamento e IP;
- Declínio nos valores de capacitância e do fator de potência em maquinas de enrolamentos pré-moldados.

Medidas a serem tomadas

Problemas por contaminação são provavelmente os mais simples de serem resolvidos, mesmo que em condições severas de contaminação, o estator pode ser restaurado para condições quase novas através de uma limpeza, secagem, impregnação, e uma pintura ou um processo de VPI. Se rastreamento elétrico é presente do isolamento, é prudente remover os rastros utilizando lixa. (2)

Existem inúmeros métodos diferentes de limpeza do enrolamento, sendo cada um mais adequado para uma determinada situação (23) (14):

O uso de Pressão de agua ou vapor ainda é o método mais eficiente na limpeza do isolamento, e deve ser utilizado quando o enrolamento possui alto graus de contaminação. Entretanto esse método nem sempre pode ser utilizado, por questões tempo de secagem e dimensões da máquina que impossibilitam a secagem da mesma. Pode-se utilizar um desengraxante alcalino junto a agua, recomenda-se uma pressão entre 1 a 1,5 kg/m². Após a limpeza o enrolamento deve ser secado em estufa a uma temperatura de até 90 graus e o IP pode ser utilizado para controlar e indicar o tempo em que a máquina fica para secagem.

Em enrolamentos com um leve grau de contaminação ou em maquinas muito grandes que a secagem é dificultosa, a limpeza manual utilizando um pano livre de fiapos com um solvente a base cítrica pode ser a mais adequada. Assim utilizando esse método, pode-se reduzir drasticamente o tempo ocioso da máquina e os custos energéticos relacionados ao processo de secagem em estufa. Esse método é altamente contraindicado na presença de pó de carbono de escovas, podendo até mesmo piorar a situação do isolamento em caso de utilização. O IP pode ser utilizado para controlar e indicar a qualidade da limpeza efetuada.

Em casos de contaminação leve, sem sujeira encrostada, o uso de aspirador de pó pode ser suficiente para a remoção do particulado. Recomenda-se uma pressão máxima de 2kg/cm².

Em casos de contaminação de difícil remoção, para enrolamentos que não podem ir a estufa, pode-se utilizar jato de ar com material abrasivo (Carca de noz, gelo seco, sabugo de milho triturados) para a remoção da camada contaminante. Esse método é altamente delicado, podendo danificar o isolamento do enrolamento, portanto somente pessoas especializadas devem executar esse procedimento. Após a realização, deve-se aspirar ao material abrasivo restante.

As seguintes medidas podem ser tomadas para retardar o processo de contaminação:

- Instalação de filtros e garantir que sua manutenção seja feita regularmente
- Mudar ou atualizar o sistema de refrigeração para um completamente fechado
- Garantir que a lubrificação dos isolamentos seja feita em uma periodização adequada
- Reparar vazamentos de gás próximos
- Aspirar o carbono regularmente em maquinas com escovas dentro do encapsulamento
- Prestar atenção no ponto de orvalho dos equipamentos

5.3.9 Partículas Abrasivas

Presença de partículas abrasivas no fluxo do gás refrigerante podem raspar o isolamento do enrolamento do estator. Esse problema é comum de ocorrer em maquinas de ventilação aberta operando em ambientes com areia e outros materiais abrasivos.

A causa fundamental para esse problema é a operação de motores de ventilação aberta em ambientes não adequados para a operação desse tipo de equipamento. Ou seja, o problema em si está relacionado a uma especificação errônea do motor, ou da manutenção inadequada dos filtros que bloqueiam as partículas que ingressam na máquina. (2)

Sintomas

Problemas relacionados a partículas abrasivas apresentarão os seguintes sintomas:

- Sinas de abrasão no final do enrolamento são facilmente visíveis;
- Variações significativas da resistência de isolamento, índice de polarização e nos testes hipot aparecerão em casos mais severos, onde o cobre já se encontra exposto.

Medidas a serem tomadas

A solução mais óbvia nesse caso é especificar um motor apropriado ou aprimorar o sistema de refrigeração existente. Pode-se impregnar o enrolamento para uma restauração do mesmo. Em casos em que a introdução de abrasivos pelos dutos da máquina é inevitável, pode ser adequado cobrir o enrolamento com uma fina camada de material resistente a abrasão. Silicone e alguns poliuretanos possuem essa propriedade. (2)

5.3.10 Conexões Elétricas Deficientes

Em um estator de uma máquina elétrica rotativa típica, existem várias conexões elétricas. Essas conexões devem apresentar baixa resistência de isolamento, caso contrário irá aquecer e degradar o isolamento elétrico naquele ponto, e eventualmente levar a falha. Estatores de enrolamento pré-moldados são mais propícios a esse tipo de problema, já que requerem inúmeras conexões entre as bobinas e as barras. Entretanto, qualquer estator está sujeito a esse tipo de problema.

Uma conexão com resistência elevada, as pontas ficarão mais quentes que o necessário. O aumento de temperatura no cobre incrementa ainda mais sua resistência, e a oxidação é acelerada ainda mais com a temperatura, aumentando ainda mais a resistência. Nesse processo em cascata, o cobre pode se tornar tão quente a ponto de derreter, levando assim a falha da máquina.

Falhas como essas estão associadas a mão de obra deficiente, soldagem de ma qualidade ou projeto inadequado de conexões por parafuso. Excesso de vibração pode levar a rachaduras nas conexões, levando ao mesmo processo em cadeia citado anteriormente.

Sintomas

Estatores com problemas nas suas conexões elétricas apresentarão os seguintes sintomas:

- Conexões com aspecto descolorido, com isolamento rachado ou descascando;
- Mudanças no perfil de calor da maquinas, em mesmas condições de operação, vistos através de câmera infravermelha;
- Mudanças significativas de temperatura na caixa de terminais durante a operação;
- Aumento significativo da resistência dos enrolamentos medidos no teste de condutividade off-line.

Medidas a serem tomadas

Em situações onde há sobreaquecimento nas conexões, a vida da máquina elétrica pode ser estendida diminuindo a carga exigida pela máquina e garantido que o máximo de ar refrigerante atinja a região afetada. Caso contrário, durante uma parada de usina, pode-se separa a conexão naquele ponto e ressoldar, instalando um novo isolamento. (2)

5.3.11 Espaçamento inadequado na cabeça de bobina

Em estatores de grande porte, espaçamento existe na cabeça de bobina para garantir que ar refrigerante suficiente flua através dela, ajudando assim a amenizar a temperatura no enrolamento. Ademais, em estatores operando em tensão a cima de 6kV, espaçamento adequado também é necessário para prevenir descargas parciais no exterior das ranhuras.

Aproximando dois isolamentos adjacentes e o ar entre eles por um modelo de placas capacitivas e considerando o princípio de divisão de tensão, uma grande porcentagem da queda de tensão aparecerá no espaçamento de ar. Assim se essa queda de tensão for suficientemente grande e o espaçamento suficientemente pequeno, descargas parciais ocorrerão, que se desenvolverão em falhas fase terra ou até mesmo fase.

Como essas descargas estarão ocorrendo em ar livre, ozônio será criado, que acelera ainda mais o processo de deterioração. O ozônio pode corroer os trocadores de calor e as juntas de borracha.

Descargas parciais são mais propensas a ocorrerem em altas altitudes, já que as tensões para colapsar o ar nessas condições são menores. Portanto, esse tipo de situação é comum quando motores não especificados para trabalharem em grandes altitudes são colocados nessas condições.

O uso de uma fina camada de isolamento, sem o devido incremento no espaçamento das bobinas na cabeça do enrolamento, instalação inadequada dos enrolamentos nas ranhuras, espaçadores insuficientes na cabeça de bobina e um controle químico pobre no epóxi são todos fatores associados a esse tipo de avaria. (2)

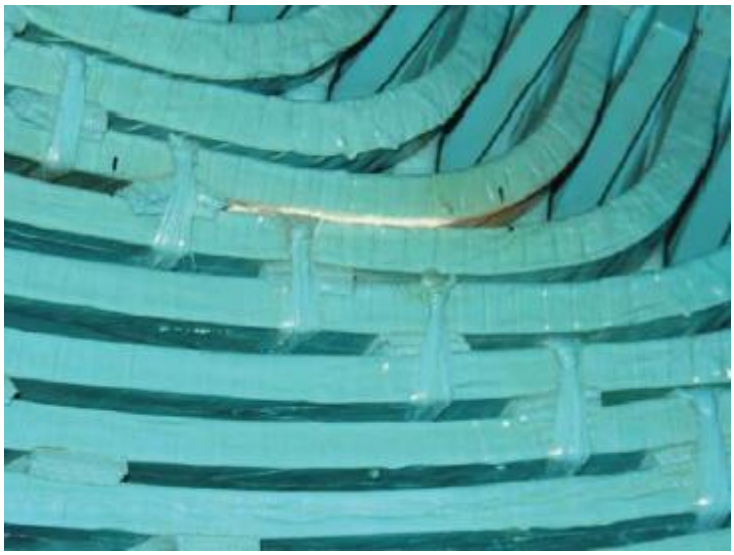
Figura 14 – Cabeça de bobina com espaçamento desuniforme e inadequado

Fonte: Root Cause Failure Analysis, 2016

Sintomas

Esse mecanismo de falha pode ser facilmente identificado por inspeção visual na cabeça de bobina. Pó branco intenso aparecera na cabeça de bobina entre as bobinas conectadas, ou próximo, aos terminais de fase. O pó branco pode assumir cores cinzas ou amarronzadas na presença de óleo ou poeira.

Figura 15 – Pó branco gerado por descargas parciais entre bobinas próximas com espaçamento inadequado



Fonte: C. STONE, GREG, CULBERT, IANA. BOULTER, EDWARD, 2014

Testes on-line de descargas parciais são também uma maneira eficaz de detectar o problema.

Medidas a serem tomadas

Caso o problema seja detectado em estágio inicial, existem métodos indubitavelmente eficiente em sua resolução:

- Injetar material isolante compatível na are afetada. Silicone ou almofadas de feltro ricas em resina são os materiais comumente utilizados;
- Se as bobinas forem flexíveis, inserir blocos para incrementar o espaçamento das bobinas adjacentes;
- Reverter as conexões de fase e neutro.

5.3.12 Vibração na cabeça de bobina

Correntes fluindo nas bobinas e barras do estator criarão grandes forças magnéticas oscilando com o dobro de sua frequência no enrolamento. Se o suporte na cabeça de bobina não estiver adequado, a mesma irá vibrar em direção radial e circunferencial. Essa vibração fara com que o bobinado torça na saída da ranhura, portanto assim, o bobinado pode eventualmente rachar.

Caso os blocos que separam as bobinas estejam frouxos, as bobinas podem também vibrar relativamente umas às outras, logo criando atrito entre as próprias bobinas, os blocos de suporte,

os anéis de suporte, cones de suporte, e qualquer outra parte designada para suporte da cabeça de bobina. Esse roçamento, se não corrigido, levará a uma falta fase-terra na máquina.

Vibração na cabeça de bobina está associada às seguintes causas:

Projeto inadequado, processo de manufatura deficiente, excesso de corrente de partida, sincronização fora de fase, operações em altas temperaturas por longos períodos e presença excessiva de óleo no bobinado. (2)

Sintomas

Problemas de roçamento na cabeça de bobina se tornam aparentes com a presença de poeira branca ou untura. Na presença de óleo a mistura de óleo com pó criará uma pasta preta e espeça que acumula nas juntas do enrolamento.

Testes feitos utilizando um impacto de marreta e acelerômetros podem identificar vibrações próximas as de duas vezes a frequência da rede na cabeça de bobina. Em aplicações mais críticas, pode-se utilizar sensores para monitoramento da vibração durante a operação.

Em maquinas de enrolamento aleatório, inspeção visual é a única forma confiável na análise desse tipo de falha.

Medidas a serem tomadas

Enrolamentos pré-moldados:

- Substituir completamente o sistema de suporte da cabeça de bobina por um sistema com fixação superior;
- Remoção e reinstalação dos blocos e sistemas de amarra;
- Incrementar o sistema de suporte com blocos e amarrações adicionais. Deve-se atentar quanto temperatura adicional devido a redução do fluxo de ar.

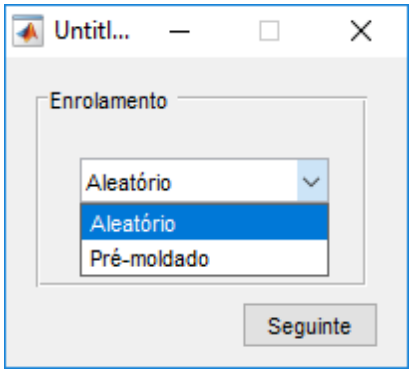
. Enrolamentos aleatórios:

- Devem ser limpos e impregnados para solidificar o final dos enrolamentos;

6 DESENVOLVIMENTO

Ficou claro, a partir das informações reunidas na sessão anterior, que os processos de falha, sintomas e soluções para cada tipo de enrolamento, seja ele pré-moldado ou aleatório utilizando fio magnético. Assim a lógica para cada um desses enrolamentos foi desenvolvida separadamente, e cabe ao usuário explicitar o tipo de enrolamento na primeira sessão do software.

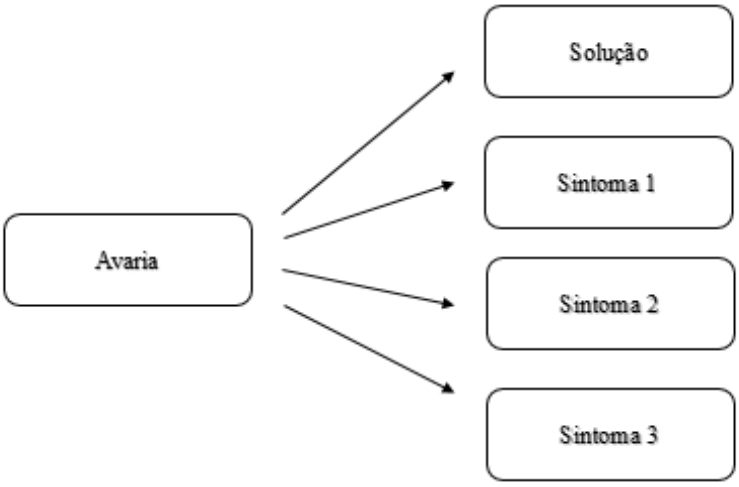
Figura 16 – Menu de seleção do tipo de isolamento



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir daí foram montadas as logicas para cada uma das avarias descritas na sessão 4, para cada tipo de enrolamento. A ordem: avaria, sintomas, soluções, foi invertida, para que a partir dos sintomas se chegasse em uma avaria e assim propor uma solução, da seguinte forma:

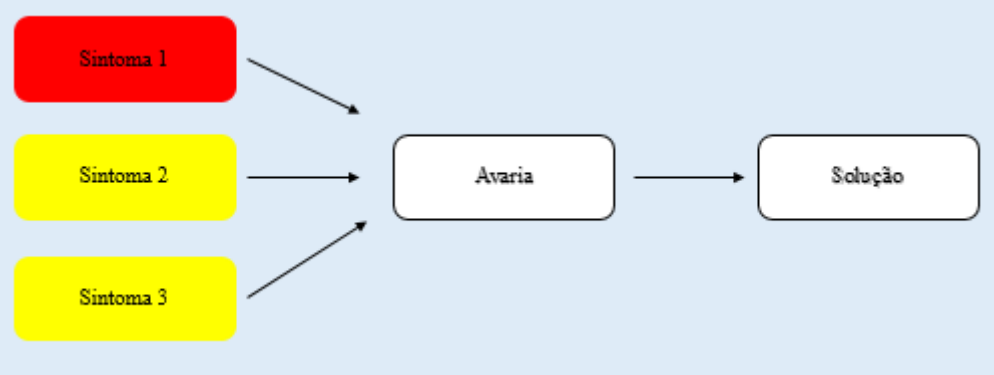
Figura 17 – Fluxograma de avarias da sessão 5



Fonte: elaborado pelo autor.

Assim após a reorganização chegasse na seguinte forma:

Figura 18 – Nova abordagem proposta para a montagem da lógica do software



Fonte: elaborado pelo autor.

Sendo os sintomas em amarelo os sintomas que alarmam para um determinado problema, e os sintomas em vermelho os sintomas que confirmam com exatidão a existência daquele problema. Como muito dos sintomas em vermelho são acessíveis somente com a desmontagem da máquina, o algoritmo alarmará o usuário a partir dos sintomas amarelos preenchidos, quais sintomas vermelhos procurar com a desmontagem do motor.

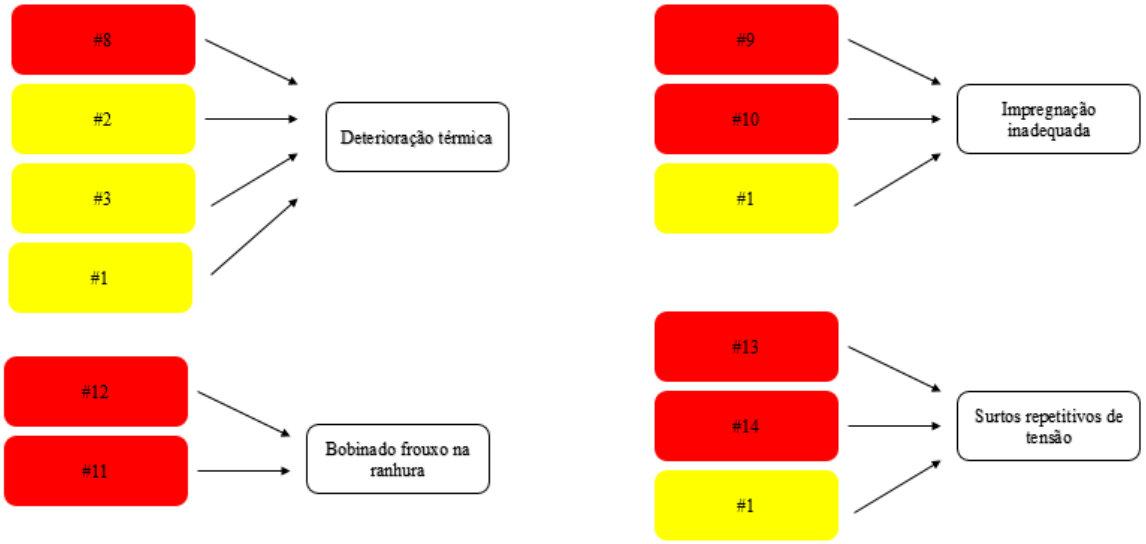
Os sintomas apresentam caráter inclusivo, ou seja, caso um sintoma seja marcado, as avarias que não apresentam aquele sintoma não são descartadas, já que mais de uma avaria pode ocorrer

ao mesmo tempo. Se um sintoma não for marcado, não significa um descarte da avaria relacionada (o sintoma pode simplesmente não ter sido avaliado).

Assim, organizando todos as avarias, chegou-se aos seguintes esquemáticos (O '#' indica a posição do sintoma no menu):

Para enrolamentos aleatórios de fio magnético:

Figura 19 – Fluxograma resultante para avarias do motor de enrolamento aleatório



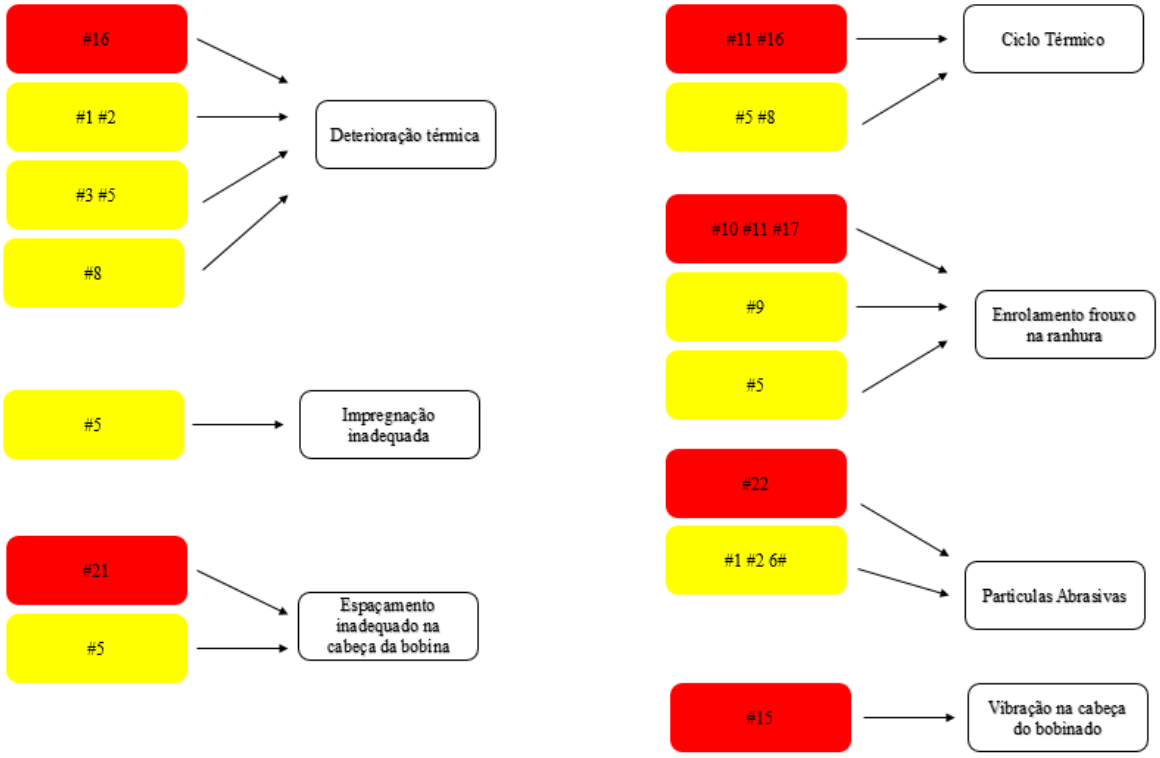
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 20 – Fluxograma resultante para avarias do motor de enrolamento aleatório

Fonte: elaborado pelo autor.

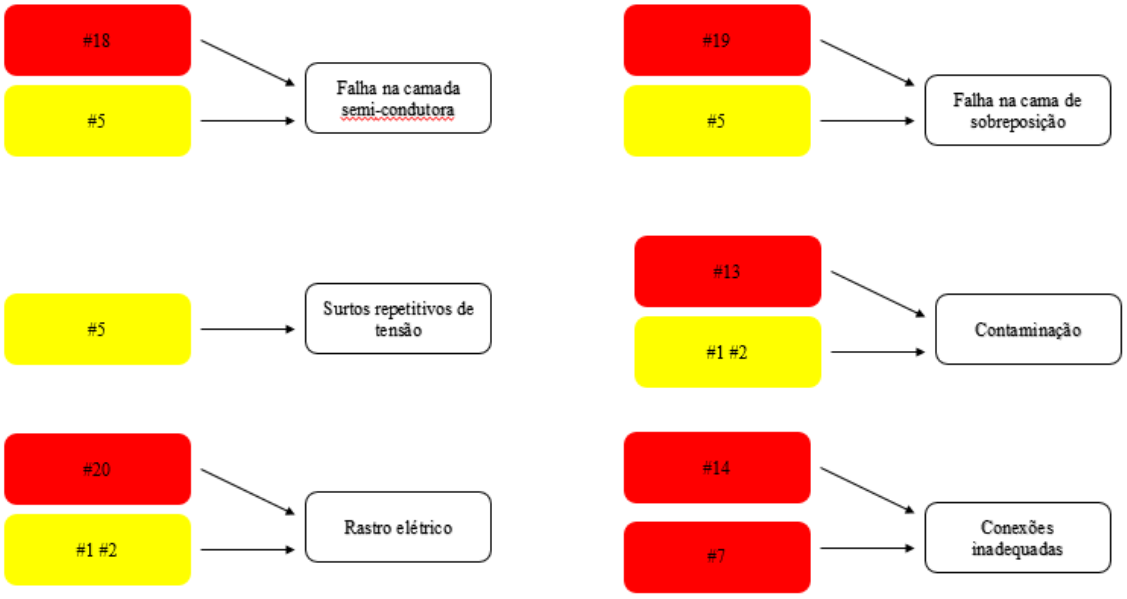
Em enrolamentos pré-moldados:

Figura 21 – Fluxograma resultante para avarias do motor de enrolamento pré-moldado



Fonte: elaborado pelo autor.

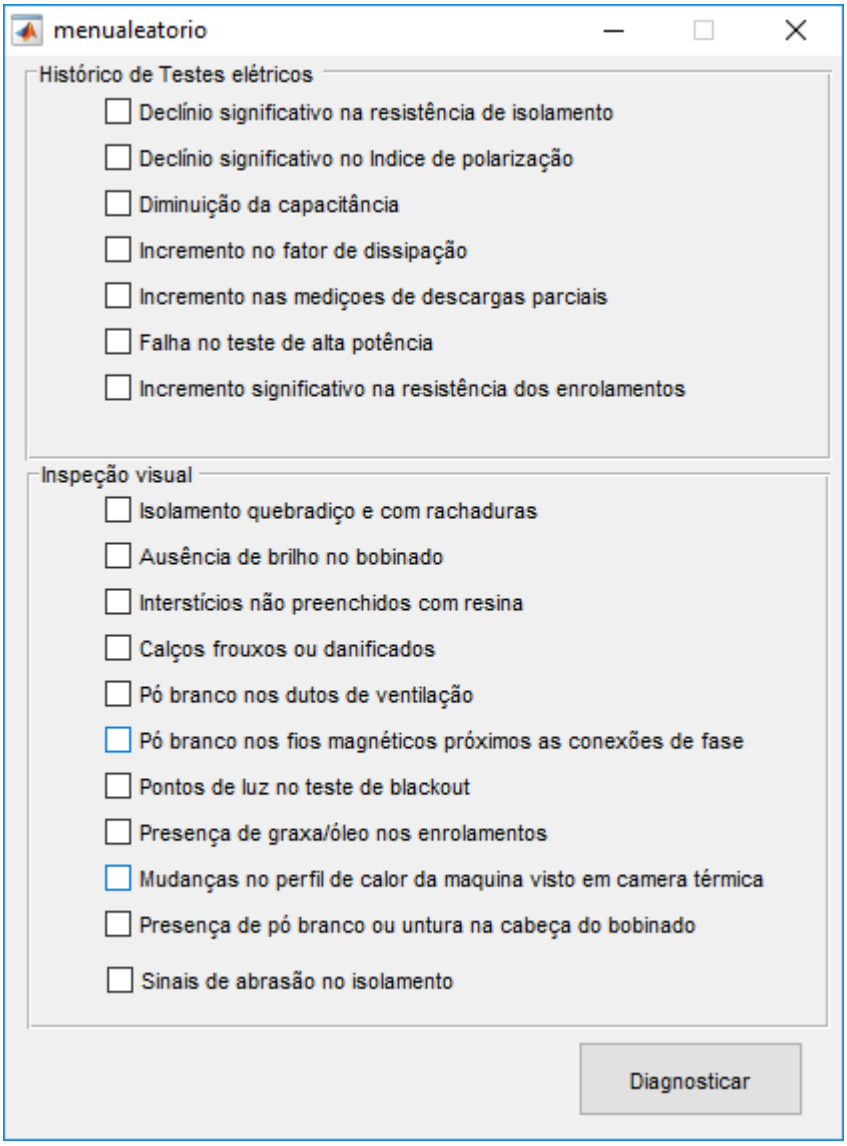
Figura 22– Fluxograma resultante para avarias do motor de enrolamento pré-moldado



Fonte: elaborado pelo autor.

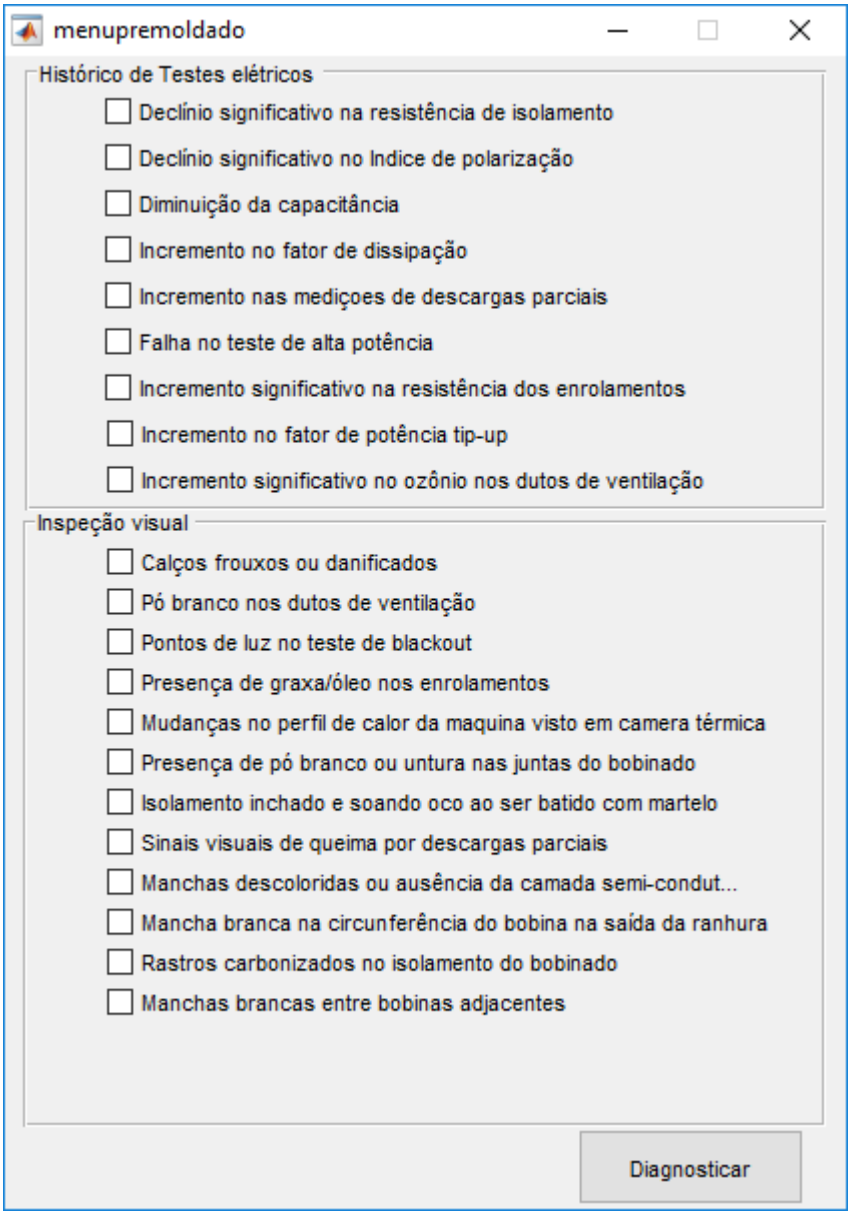
Então, em seguida, as telas de preenchimento dos sintomas foram desenvolvidas:

Figura 23 – Tela de preenchimento de sintomas em enrolamentos aleatórios



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 24 – Tela de preenchimento de sintomas em enrolamentos pré-moldados



Fonte: elaborado pelo autor.

Para cada um dos problemas das figuras 19,20,21,22 foi implementado uma tela de alarme e uma tela de diagnostico. As logicas foram implementadas para que essas telas apareçam conforme as informações preenchidas pelo usuário.

7 ESTUDO DA APLICAÇÃO DO SOFTWARE

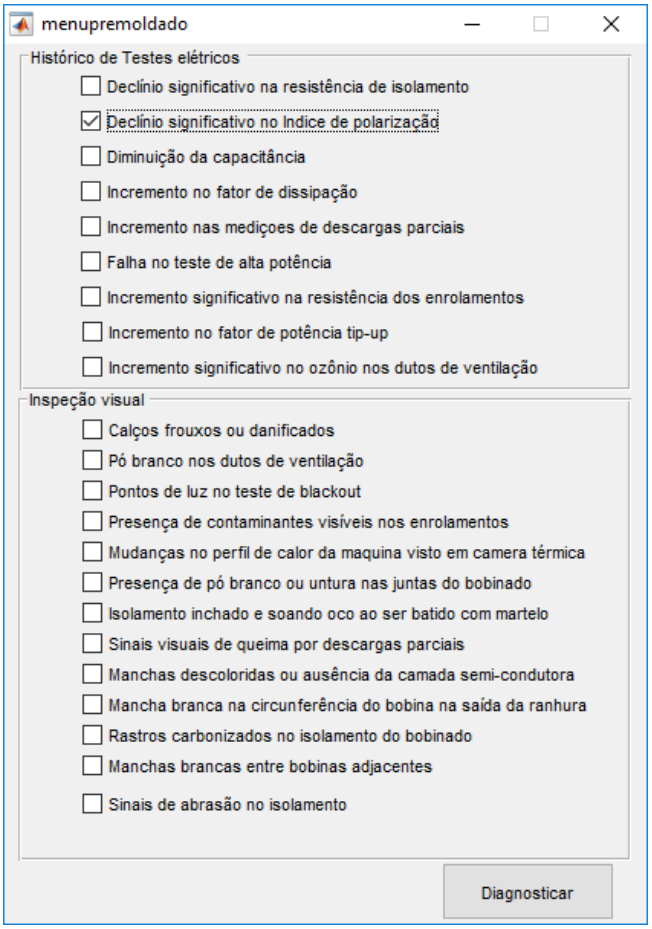
EXEMPLO 1

Em um determinado setor de uma indústria de cimento hipotética, haviam quatro motores semelhantes de corrente alternada, com rotor gaiola, estatores de enrolamento pré-moldados, operando em tensão nominal de 4160V. A operação com confiabilidade desses é de extrema importância para a produção e funcionamento da linha de produção dessa indústria.

Em uma parada de usina, após feita uma série de testes nos motores, notou-se que um desses motores apresentava uma queda alarmante no índice de polarização, com valores que antes flutuavam a cima de 4 para um valor inferior a 2. Naturalmente, o engenheiro responsável pela manutenção, por possuir grande experiência no assunto, suspeitou imediatamente que o isolamento do motor estava contaminado.

Para auxiliar no diagnostico, o software foi utilizado como guia, e preenchido primeiramente da seguinte forma:

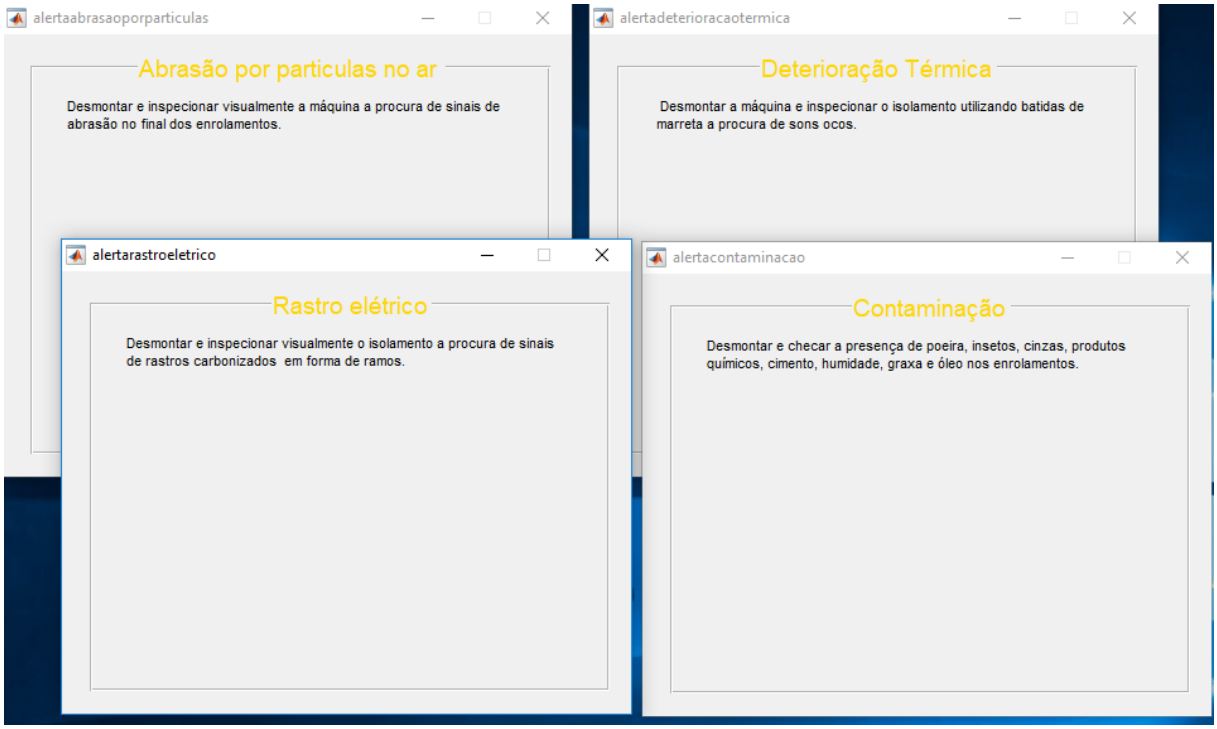
Figura 25 – Preenchimento testes exemplo 1



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir desse dado preenchido, o algoritmo gerou quatro telas de alarme, orientando assim em uma inspeção com desmontagem:

Figura 26 – Telas de alerta resultante do exemplo 1



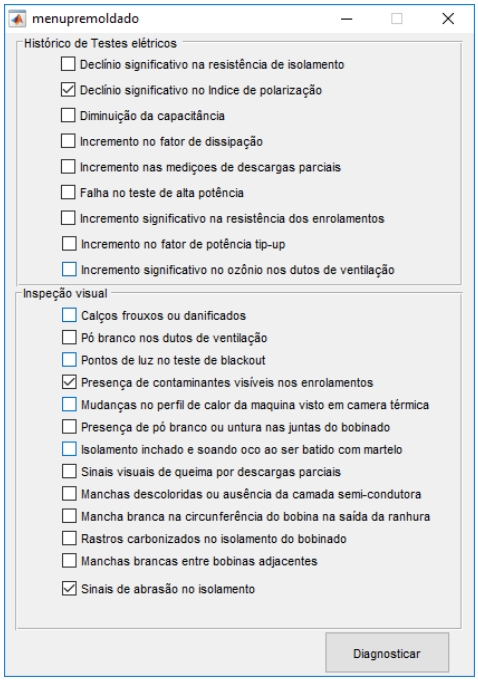
Fonte: elaborado pelo autor.

Com isso os responsáveis pela manutenção já esperavam, não só uma, mas quatro possibilidades para aquele motor: Contaminação severa, Degradação térmica, Isolamento desgastado por partículas abrasivas e Rastro elétrico. Portanto a inspeção visual pôde ser feita de maneira direta e concisa.

Ao desmontarem o motor e inspecionarem a cabeça de bobina, era notável que o enrolamento apresentava certo grau de contaminação, mas também foi facilmente identificado que os enrolamentos estavam sofrendo abrasão por partículas no ar, por não ser um motor apropriado para aquele ambiente, a ponto de expor o cobre do enrolamento e influenciar diretamente no Índice de polarização.

Em seguida os sintomas foram inseridos no software da seguinte forma:

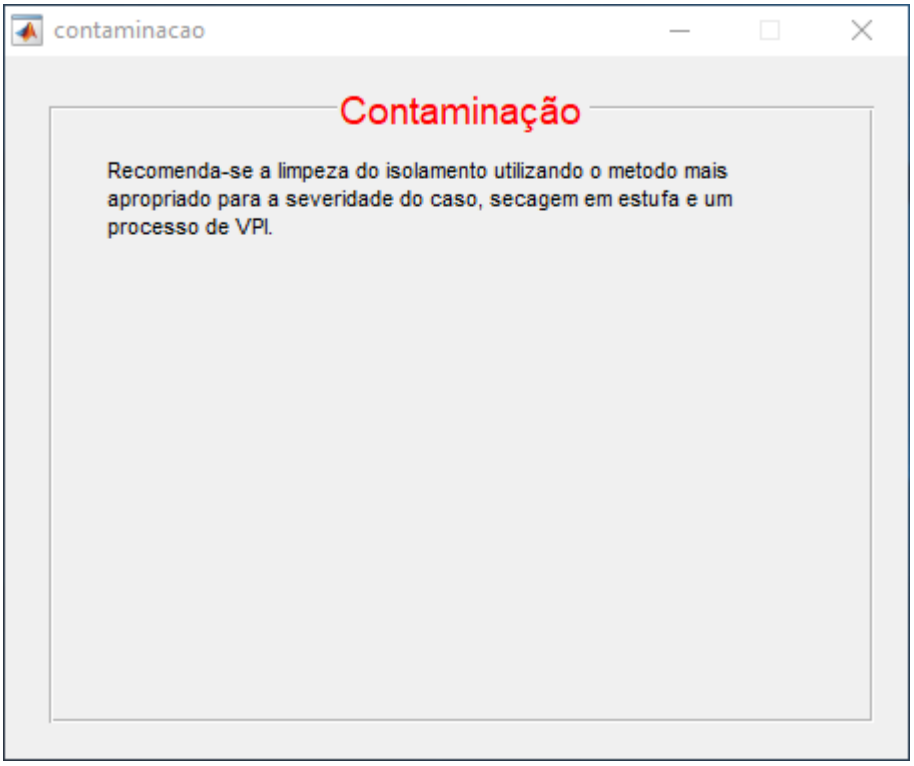
Figura 27 – Preenchimento sintomas após desmontagem no exemplo 1



Fonte: elaborado pelo autor.

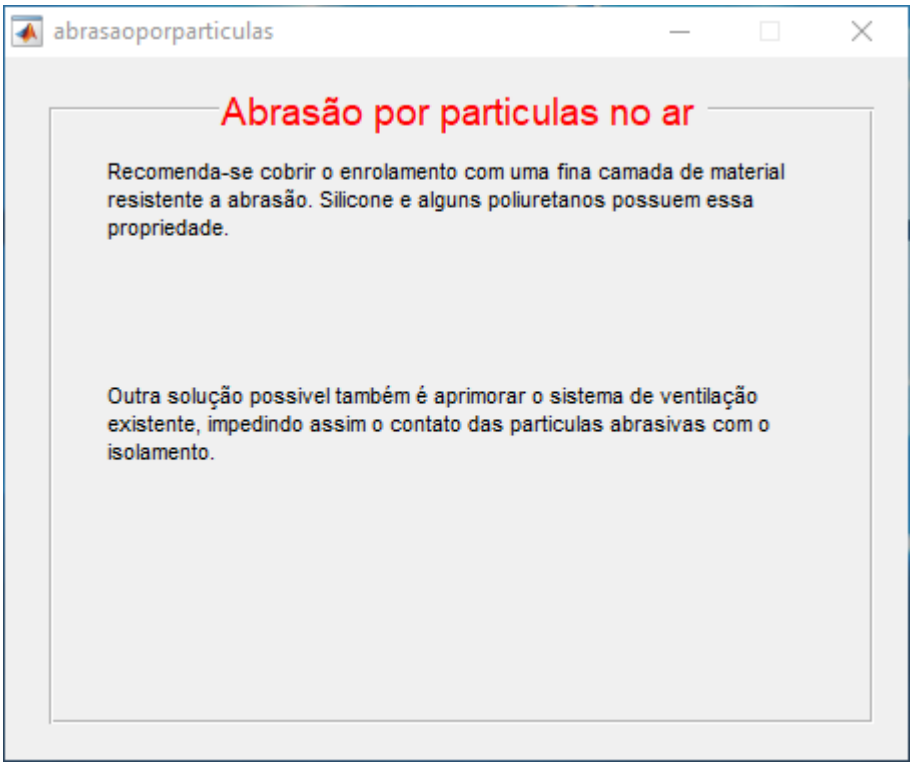
Que resultou nos diagnósticos:

Figura 28 – Resultado diagnostico exemplo 1



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 29 – Resultado diagnostico exemplo 1 part 2



Fonte: elaborado pelo autor.

Com esse resultado, o engenheiro de manutenção teve o suporte para a tomada da seguinte decisão: Uma limpeza do estator, tratamento por VPI, e aplicação de uma fina camada de silicone no isolamento para que os efeitos da abrasão fossem retardados ao longo do tempo. A mesma ação foi tomada para os outros motores, que ainda não estavam com o mesmo grau de severidade do problema, mas já apresentavam sintomas visuais da mesma avaria, evitando assim uma parada inesperada que acarretaria em uma perda econômica tremenda.

EXEMPLO 2

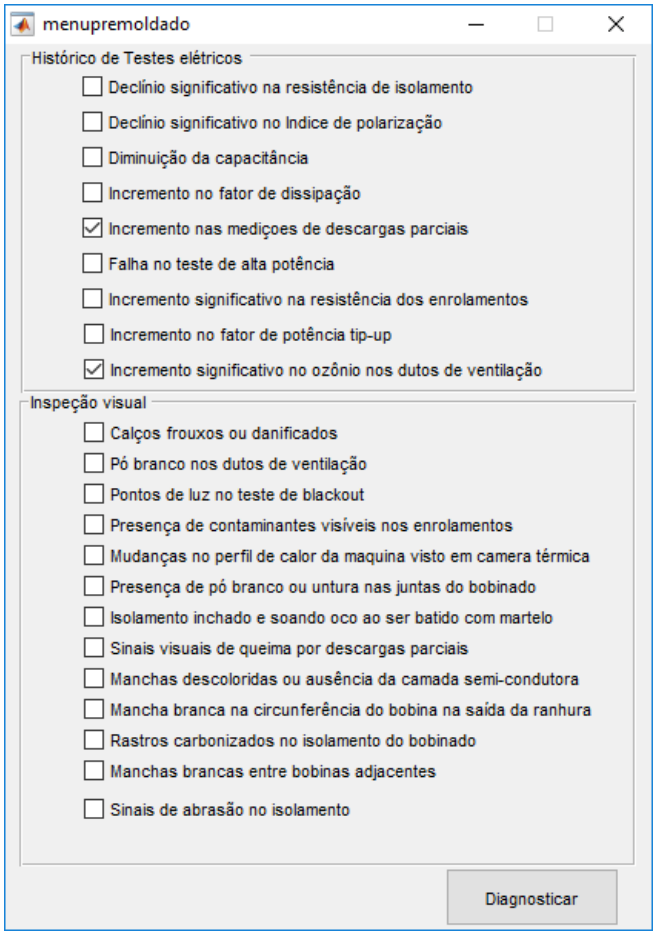
Em uma hidroelétrica, haviam diversos hidro geradores, com estatores de enrolamento pré-moldados operando em tensão nominal de 13800V. Estatores que operam em tensões tão elevadas requerem uma cautela maior, já que descargas parciais podem ocorrer com tensões tão menores quanto 3kV/mm.

Em um check-up rotineiro, notou-se que um desses geradores, que estava apenas com 7 anos em operação, apresentou valores medidos de descargas parciais com o dobro dos valores

medidos em um período de menos de 6 meses e apresentava níveis de ozônio em seus dutos de ventilação em 1ppm.

Para auxiliar no diagnostico, o software foi utilizado como guia, e preenchido primeiramente da seguinte forma:

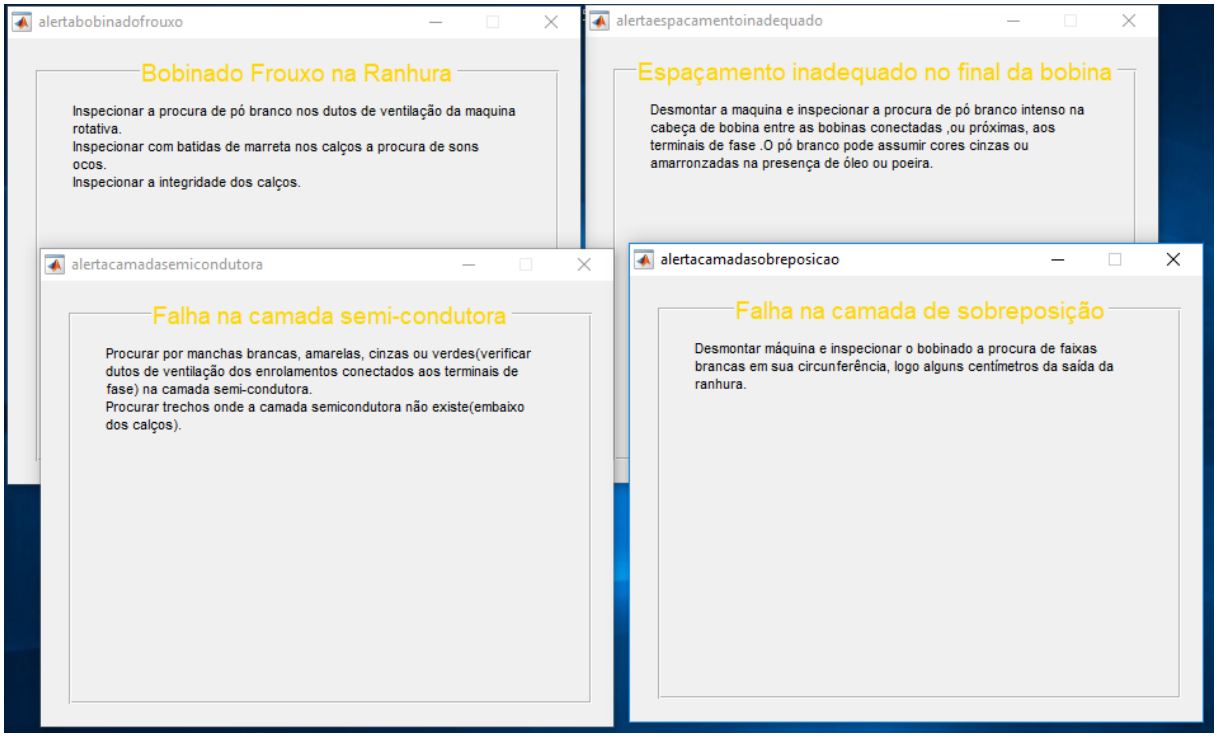
Figura 30 – Preenchimento testes exemplo 2



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir desses dados preenchidos, o algoritmo gerou três telas de alarme, orientando assim em uma inspeção com desmontagem:

Figura 31– Telas de alerta resultante do exemplo 2



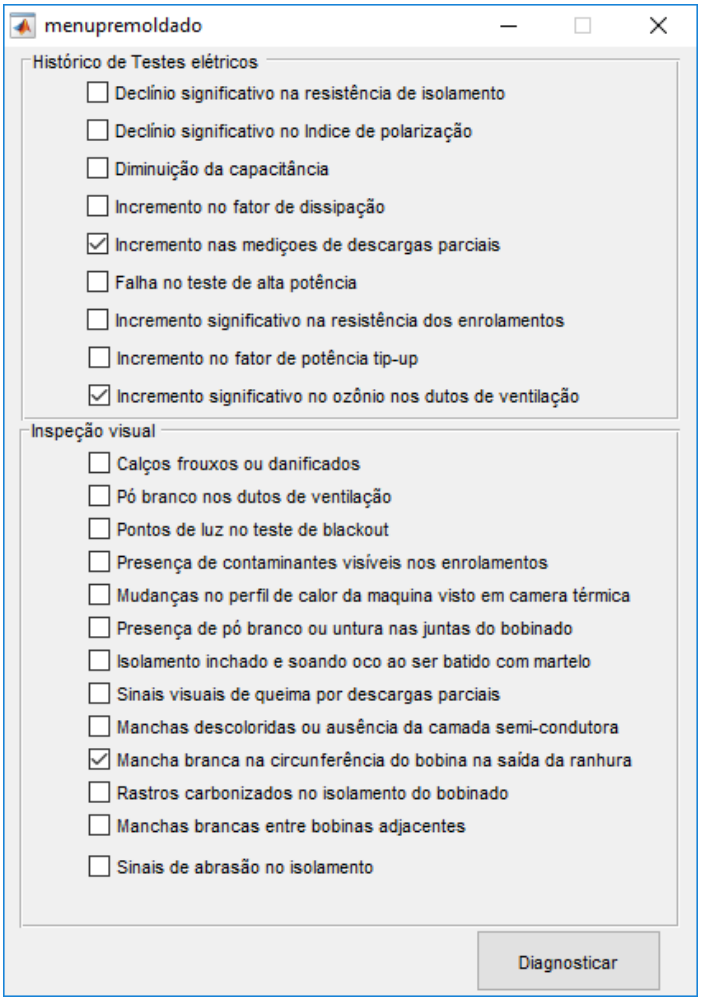
Fonte: elaborado pelo autor.

Com isso os responsáveis pela manutenção esperavam cinco possibilidades para aquele motor: falha na camada semicondutora, falha na camada de sobreposição, espaçamento inadequado na cabeça de bobina, bobinado frouxo na ranhura. Portanto a inspeção visual pôde ser feita de maneira direta e concisa.

Ao desmontarem o gerador e inspecionarem a cabeça de bobina, notou-se a presença de faixas brancas em algumas bobinas, próximas as saídas das ranhuras.

Após a inspeção visual, software pôde ser preenchido da seguinte forma:

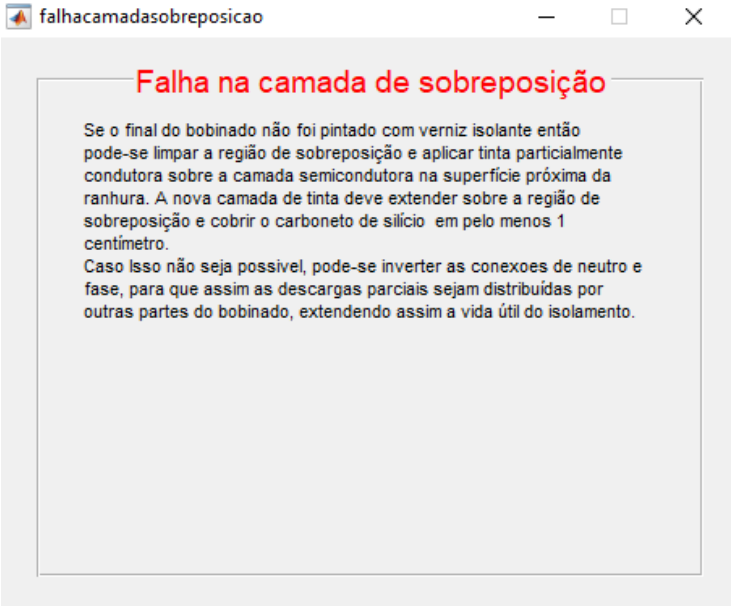
Figura 32 – Preenchimento sintomas após desmontagem no exemplo 1



Fonte: elaborado pelo autor.

Que resultou no diagnóstico:

Figura 33 – Resultado diagnostico exemplo 1 part 2



Fonte: elaborado pelo autor.

Como a cabeça de bobina estava coberta com verniz isolante, não foi possível limpar e aplicar tinta parcialmente condutora sobre camada de sobreposição para que o problema fosse completamente resolvido. Assim, como medida mitigativa, as ligações de neutro e de fase foram invertidas, para que assim os efeitos das descargas parciais fossem distribuídos entre as bobinas que antes não estavam sendo estressadas, estendendo com isso a vida útil do gerador.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

No capítulo 1 e 2 do trabalho, foi apresentada a proposta de projeto. Os objetivos esperados no capítulo 3 foram concretizados nos capítulos posteriores. O estudo das possíveis avarias do isolamento do estator da máquina rotativa foi realizado no capitulo 5, onde foi descrito o mecanismo de falha, os sintomas e as sugestões para correção do problema.

Os modelos dos fluxogramas utilizados no desenvolvimento do algoritmo foram desenvolvidos no capítulo 6, e posteriormente essas logicas foram implementadas em código. Neste se fez a separação entre os sintomas e soluções de motores de enrolamento pré-moldado e aleatório, com logicas desenvolvidas separadamente para os dois casos.

Foi feito no capitulo 7 dois estudos de aplicabilidade do software, em exemplos onde o uso seu poderia ser de extrema ajuda para a equipe de manutenção. O objetivo geral foi alcançado conforme se observa no final do capítulo.

Apesar do software apresentar soluções que as vezes podem não ser conhecidas do responsável pela manutenção, o funcionamento do mesmo ainda é muito dependente do conhecimento do engenheiro de manutenção em saber o que o que é uma mudança drástica no histórico de manutenção, dificultando assim todo o processo de diagnostico. No exemplo 1, foi de responsabilidade do engenheiro de manutenção saber que uma mudança de IP de 4 para 2 foi algo significativo. Isso torna o software um pouco subjetivo.

Uma das dificuldades encontradas no desenvolvimento do software foi na utilização do MATLAB, que se mostrou não ser a ferramenta mais apropriada para esse tipo de aplicação. O software não apresenta expressões matemáticas complexas, então uma linguagem de programação mais eficiente, rápida, poderia ter sido utilizada, beneficiando tanto o desenvolvimento quanto a experiência do usuário.

Para continuação do trabalho, pode-se integrar as logicas utilizadas com um sistema de gestão de dados, para uma análise mais precisa, mais quantitativa, menos qualitativa, fazendo com os alertas para inspeção visual sejam gerados sem uma dependência de avaliação da tendência feita pelo próprio usuário.

Ainda para trabalhos futuros, pode-se implementar a analise probabilística. O software em seu funcionamento não coloca os alertas de inspeção em ordem de prioridade, e como a lógica

possui uma característica inclusiva (considera que quanto mais informações, maiores serão as possibilidades de avarias diferentes), pode tornar o número de telas de alerta para o usuário excessiva. É muito mais comum uma máquina rotativa apresentar problemas com contaminação do que problemas de bobinado frouxo na ranhura, por exemplo. Uma ordenação desses alertas conforme a probabilidade de falha, levando em consideração o resultado dos testes para a geração das probabilidades, resolveria esse problema. Cabe aqui também a implementação de machine learning.

Existem outras partes constituintes de um motor nas quais se verificam ocorrência de falhas que não foram implementadas, como os rolamentos, que embora não sejam estão caros quanto os enrolamentos das bobinas, apresentam alta frequência de ocorrência de defeitos. Uma atualização do software deve contemplar variáveis de entrada de testes de todos os componentes de uma máquina elétrica rotativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-21, n. 4, p. 853-864, 1985.

C. STONE, GREG, CULBERT, IANA. BOULTER, EDWARD et al. **ELECTRICAL INSULATION FOR ROTATING MACHINES**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2014.

BRANCATO, E.L. Estimation of lifetime expectancies of motors. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 8, n. 3, p. 5-13, 1992.

BRYAN, JIM. **Service Factor: What is it and what does it do?.** EASA, p. 1-2, 2015.

BULGARELLI, ROBERVAL. **Proteção Térmica de Motores de Indução Trifásicos Industriais**. Doutor, Universidade de São Paulo, 2006.

DE SOUZA LEMOS, LEANDRO. **Desenvolvimento de Algoritmo Para Estimar a Vida Útil de Motores Trifásicos de Indução**. Graduado, Instituto Federal de Minas Gerais, 2016.

IEEE **Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery**. 2014.

IEEE **Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage**. 2002.

IEEE **Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.** 2001.

A Guide To Diagnostic Insulation Testing Above 1 kV. [s.l.]: **MEGGER**, [s.d.].

NBR 5383-1 Máquinas elétricas girantes Parte 1: Motores de indução trifásicos - Ensaios. ABNT, 2002.

IEEE **Standard Test Code for Resistance Measurement**. 1978.

BYSHOP, TOM. **Root Cause Failure Analysis**. [s.l.]: EASA, 2002.

VAZQUEZ MORAN, ANGEL. **Manutenção Elétrica Industrial**. 2. ed. Salvador: [s.n., s.d.].

IEEE **Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery**. 2014.

NBR 17094-1 Máquinas elétricas girantes — Motores de indução Parte 1: Trifásicos. ABNT, 20013.

VENKATARAMAN, B., GODSEY, B.PREMERLANI, W. et al. **Fundamentals of a motor thermal model and its applications in motor protection**. Conference Record of 2005 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2005., 2005.

ZHAO, KUN, CHENG, LINZHANG, CHAOHAI et al. **Induction motors lifetime expectancy analysis subject to regular voltage fluctuations**. 2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2017.

BONNET A. H, "**Motor Performance and Life in Accordance with Nema Mg-1 Standards**" IEEE U.S.Electrical Motors, Division of Emerson Electric, St. Louis, Missouri 1999.

PEESAPATI, V., GARDNER, RLOWNDES, R et al. **Impact of thermal cycling on high voltage coils used in marine generators using FEA methods**. 2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2015.

IEEE **Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines**. 2003.

BYSHOP, TOM. **Understanding Motor Temperature Rise Limits**. EASA, 2003.

CULBERT, I. M. **A Review of Cleaning Methods for Motor Windings**. 2008 IEEE Cement Industry Technical Conference Record, 2008.