



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

Mestrado Integrado em Engenharia
Electrotécnica e de Computadores



Engenharia Eléctrica

ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE ISOLAÇÃO EM MOTORES MT

ANA LISA MARTINS RODRIGUES



JARAGUÁ DO SUL, 2010



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP

Mestrado Integrado em Engenharia
Electrotécnica e de Computadores



Engenharia Eléctrica

ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE ISOLAÇÃO EM MOTORES MT

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para aprovação à disciplina de
Estágio Supervisionado e Trabalho de
Conclusão de Curso, FURB-FEUP.

Prof. Dr. Sérgio H. L. Cabral – Orientador

Prof. Dr. Carlos Sá – Có-Orientador

Engenheiro Fernando R. Spezia – Co-
Supervisor

JARAGUÁ DO SUL, 2010

ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE ISOLAÇÃO EM MOTORES MT

Dissertação de Mestrado

Por:

Ana Lisa Martins Rodrigues

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores.

Sérgio Henrique Lopes Cabral
Orientador

Ana Lisa Martins Rodrigues
Académica

AGRADECIMENTOS

Aos Professores, Dr. Carlos Sá e Dr. Sérgio Cabral por terem proporcionado esta oportunidade de estágio. Pelo apoio e orientação, pela amizade, pelo incentivo e pelas oportunidades oferecidas para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Regional de Blumenau. À Carolina e Marciana por toda a simpatia, empenho e disponibilidade. Sem elas não teria sido tudo tão fácil.

À WEG, nomeadamente ao Fernando Spézia por toda a orientação e paciência. Às pessoas Hans E. S. Neto e Friedrich Weege por me terem acolhido e pelos desafios transmitidos. À minha “ilha”, Fernando Raizer, Airton A. de Melo e Thiago Vegini. Um agradecimento a toda a seção de Processos por me ter acolhido, em especial aos amigos Wagner Jantsch e Nilvo Henrichsen, por todo o carinho. Sem esquecer a Silvana Tecila por todo o apoio.

Aos amigos do Brasil, pelos bons momentos proporcionados, em especial à Bárbara e à Juliana.

Ao meu eterno amigo José Barbosa, pela amizade, carinho e amor demonstrado ao longo destes cinco anos.

Aos meus amigos de Portugal, em especial ao Paulo, ao Fernando e ao Emanuel pelos momentos bons e menos bons, vividos no Porto. Jamais esquecerei.

Aos meus pais e irmã, sem eles nada teria sido possível.

RESUMO

O isolamento de máquinas eléctricas é uma das problemáticas com maior peso quando analisadas as causas de falhas do equipamento. Dentro das falhas de origem eléctrica, as falhas no isolamento representam uma porção demasiado significativa para estas serem levadas com leviandade.

Existe uma envoltória relacionada com a isolação de máquinas eléctricas, como sistema isolante, material isolante e classe térmica.

Atendendo ao mercado actual, onde os clientes são cada vez mais exigentes, não admitindo por vezes qualquer tipo de falha, é necessário realizar uma serie de testes durante todo o processo de fabrico do estator.

Por sua vez, um sistema de isolação, necessita de ser avaliado mas também validado, através de normas IEC e IEEE, largamente respeitadas e estudadas.

ABSTRACT

The insulation of electrical equipment is one of the biggest problems with weight when analyzing the causes of equipment failures. Inside the failures of electrical origin, the flaws in the insulation represent a significant portion too for those being taken lightly.

There is an envelope associated with the insulation of electrical equipment such as insulation system, insulation and thermal class. Given the current market, where customers are increasingly demanding, sometimes not admitting any fault, you must perform a series of tests throughout the manufacturing process of the stator.

In turn, an insulation system, needs to be evaluated but also validated by IEC and IEEE, widely respected and studied.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Motores Eléctricos	2
Figura 2. Origem das principais falhas em máquinas eléctricas.....	15
Figura 3. Exemplo de uma descarga parcial.....	16
Figura 4. Estrutura da isolação de um enrolamento.....	17
Figura 5. Exemplo de aplicação de fita de mica numa bobina.....	20
Figura 6 - Processo de fabrico de bobinas.....	22
Figura 7. Localização das fitas condutiva e semicondutiva na bobina.....	23
Figura 8. Exemplo da forma final de uma bobina [11]	24
Figura 9. Conjunto de bobinas em forma de trapézio antes de serem inseridas no estator	24
Figura 10. Bobina em Forma de trapézio antes de ser inserida no estator	25
Figura 11. Processo de bobinagem de estatores	25
Figura 12. Exemplo de inserção de bobinas no estator de uma máquina eléctrica	26
Figura 13. Bobinas inseridas na ranhura de um estator.....	26
Figura 14. Exemplo de um estator bobinado.....	28
Figura 15. Exemplificação dos PT-100 inseridos no estator	28
Figura 16. Aspecto externo de um termistor	29
Figura 17. Exemplo de um PT-100 antes de ser inserido no estator	29
Figura 18. Aspecto externo de termoresistores	30
Figura 19. Estrutura das bobinas estatóricas e respectivo sistema de isolamento.....	31
Fígura 20. Realização da ligação conforme o esquema de bobinagem.....	31
Figura 21. Aplicação de vácuo	32
Figura 22. Transferência de resina	33
Figura 23. Fase de Pressão	33
Figura 24. Transferênracia da resina de volta ao tanque de armazenamento	Erro!
Marcador não definido.	
Figura 25. Exemplo de uma planta VPI	35
Figura 26. Exemplo de um estator a ser colocado numa estufa Erro! Marcador não definido.	36
Figura 27. Estrutura da isolação VPI: material de referência.....	38
Figura 28. Estrutura da isolação VPI: fabrico industrial com aplicação do material isolante com máquina	38
Figura 29. Estrutura da isolação VPI: Fabrico industrial com aplicação do maerial isolante de forma manual.....	39
Figura 30. Visão geral de resinas utilizadas no mundo e respectivo preço.....	41
Fígura 31Curva esperada para a evolução de tan (δ) versus U/Un.....	45
Fígura 32. Níveis de tensão para o ensaio	48
Figura 33. Forma de onda padrão	48
Figura 34. Curto entre espiras.....	49
Figura 35. Curto entre bobinas da mesma fase.....	49
Figura 36.Curto parcial entre fases.....	49
Figura 37. Curto total entre fases	49

Figura 38. Ligação imprópria da bobina	50
Figura 39. Ligação invertida da bobina	50
Figura 40. Ligação da bobina aberta	50
Figura 41. Curto parcial de massa	51
Figura 42. Curto total para a massa	51
Fígura 43. Circuito de teste <i>Lay-Out</i>	53
Fígura 44. Detector de descargas parciais	53
Figura 45. Normas de Referência IEC.....	61
Figura 46. Normas de Referência IEEE	61
Fígura 47. Bobina moldada	70
Fígura 48. Disposição do Eletrodo de Medição e Anéis de Guarda.....	72
Fígura 49. Curva esperada para evolução de $\tan(\delta)$ versus U/U_n	73
Fígura 50. Bobina moldada com ambos os lados curto-circuitados	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
EPRI	Electric Power Research Institute
IEC	International Electrical Commission
AT	Alta Tensão
MT	Media tensão
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
V	Unidade de Tensão – Volt
A	Unidade de Corrente – Ampère
C	Unidade de Carga - Coulomb
s	Unidade de tempo – Segundos
Hz	Unidade de Frequência - Hertz
U_n	Tensão Nominal
Tan δ	Factor de Perdas Dielétricas ou Factor de Dissipação
EE	Especificação Electromecânica

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
SUMÁRIO.....	xi
1. APRESENTAÇÃO.....	1
2. INTRODUÇÃO.....	2
3. OBJECTIVOS	5
4. Enquadramento, conceitos e definições	15
4.1 Falhas em máquinas eléctricas de alta tensão	15
4.2 Sistema de Isolação.....	16
4.3 Material Isolante	17
4.4 Classe térmica	18
4.5 Sistema de Isolamento WEG	19
5. Processo de Fabrico de Estatores de Máquinas Eléctricas	21
5.1 Fabricação de Bobinas	21
5.2 Bobinagem de Estatores.....	25
5.3 Sistema de testes em estatores bobinados	41
5.3.1 Ensaio de Resistência Eléctrica do Enrolamento a Frio	42
5.3.2 Ensaio de Resistência de Isolação	43
5.3.3 Ensaio de Determinação das Perdas Dieléctricas (Tangente Delta).....	44
5.3.4 Ensaio de Tensão Aplicada AC	45
5.3.5 Ensaio de tensão aplicada DC	46
5.3.6 Ensaio de Teste de Surto (Surge Test comparativo).....	47
5.3.7 Teste de Verificação Dimensional e Visual	51
5.3.8 Ensaio de Descargas Parciais	52
5.3.9 Teste do protector térmico	55
5.3.10 Teste do sentido de rotação	55
6. Méritos do sistema de Isolação classe H	59
7. Validação de um Sistema de Isolação	60
7.1. Avaliação térmica de sistemas de isolação para Máquinas Rotativas – Normas padrão IEC e IEEE	60
7.2. Norma IEEE – 1776.....	62

7.3. Norma IEEE - 1310	64
7.4. Normas IEEE -1043 e IEEE - 1553	67
7.4.1 Procedimento para Testes da Isolação em Bobinas Sobressalentes utilizadas no Teste de Voltage Endurance.....	70
7.4.2 Ensaio de Resistência de Isolamento (antes do ensaio de tensão aplicada) 70	
7.4.3 Determinação das Perdas Dielétricas (Tan Delta – Teste de Rotina.....	71
7.4.4 Ensaio de tensão aplicada.....	73
Conclusão	76
Referências Bibliográficas.....	77

1. APRESENTAÇÃO

A presente dissertação possui como fundamento o estágio realizado na empresa WEG Equipamentos Electricos S.A. – Energia, em Jaraguá do Sul, SC, Brasil, cujo principal objectivo consistiu no estudo de sistemas de isolamento em motores de média tensão, abrangendo nomeadamente fitas, resinas de impregnação e laminados entre outros.

Devido à oportunidade de estágio proporcionada, resultante do protocolo entre a FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto / Portugal) e a FURB (Fundação Universidade Regional de Blumenau / Santa Catarina – Brasil), no âmbito do programa de intercâmbio MOBILE, é agora possível apresentar uma visão industrial do sistema de isolamento utilizado neste tipo de máquinas, assim partilhando resultados que possam ser usados, como base de comparação, em futuros estudos académicos.

2. INTRODUÇÃO

No accionamento de cargas mecânicas utilizam-se motores eléctricos, que são máquinas capazes de promoverem uma transformação de energia eléctrica em energia mecânica com algumas perdas de energia. Como essas perdas de energia são pequenas, o motor eléctrico apresenta a vantagem de ser uma máquina com um rendimento energético elevado [1].

O motor eléctrico tornou-se um dos mais notórios inventos do Homem ao longo do seu desenvolvimento tecnológico. No entanto, é necessário conhecer o seu princípio de funcionamento, construção e selecção, bem como acompanhar a evolução tecnológica para que desempenhe o seu papel no mundo de hoje.

No accionamento de uma carga mecânica podem ser utilizados motores de corrente contínua ou de corrente alternada convencionais (síncronos ou assíncronos, mono ou trifásicos) ou motores eléctricos especiais.

Existem diversas possibilidades de aplicação de um motor eléctrico. Assim, a selecção do motor e a sua aplicação constituem um assunto complexo, que envolve a análise de diversos parâmetros: a rede eléctrica, a ligação do motor eléctrico à carga mecânica, as necessidades e características da carga mecânica accionada, o controlo do motor eléctrico e a exploração económica do sistema de accionamento, como se observa na figura 1.

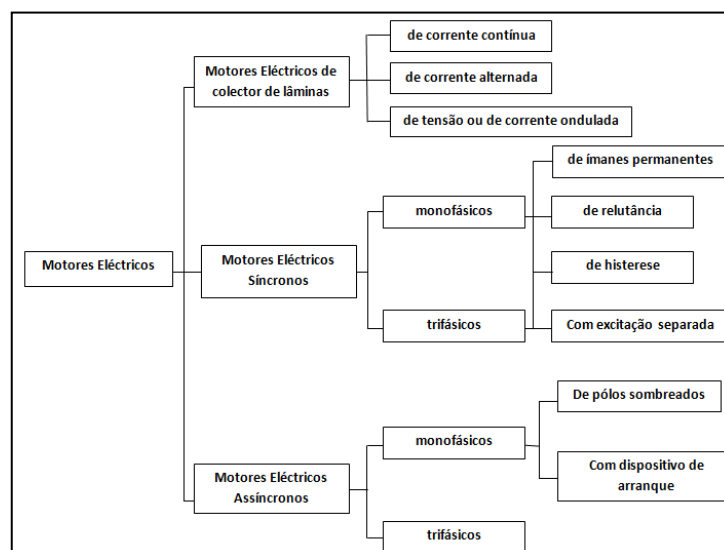


Figura 1. Motores Eléctricos [1]

Por seu lado, os motores de corrente contínua são motores de custo relativamente mais elevado que necessitam de uma fonte de corrente contínua ou de um dispositivo que rectifique a corrente alternada comum. Podem funcionar com velocidade ajustável entre amplos limites, com grande flexibilidade de controlo e boa precisão, sendo o seu actual uso restrito a casos especiais em que se verifique que o elevado custo da instalação assim o compense.

Uma vez que a distribuição de energia eléctrica é geralmente realizada em corrente alternada, os motores de corrente alternada são os mais utilizados na actualidade. Os seus principais tipos são os motores síncronos e assíncronos. Quando alimentado com frequência fixa, o motor síncrono funciona com velocidade constante; na sua versão convencional (campo magnético criado por enrolamento de excitação), é utilizado essencialmente para elevadas potências. Já o motor de indução (assíncrono) roda com velocidade ligeiramente variável consoante a carga mecânica aplicada ao seu veio e é de aplicação geral, desde a centena de watts até vários milhares de quilowatts. Na sua versão trifásica, o motor de indução é uma máquina com um princípio de funcionamento simples, com uma construção robusta requerendo pouca manutenção, e preço pouco elevado. Com o progresso tecnológico, que permitiu o desenvolvimento de métodos de controlo robustos e fiáveis desta máquina eléctrica, assim contribuindo para uma utilização mais racional da energia eléctrica, o domínio de aplicação do motor de indução trifásico tem vindo a alargar-se.

Actualmente os elevados níveis de tensão utilizados em grandes máquinas eléctricas industriais exigem cuidados especiais no seu isolamento, já que este constitui uma das principais causas de falha eléctrica durante o seu funcionamento.

A potência útil fornecida por uma máquina eléctrica é sempre menor do que a potência por ela absorvida, isto é, o rendimento percentual de qualquer máquina é sempre inferior a 100%. A diferença entre estas duas potências constitui a chamada potência de perdas da máquina, que no essencial é transformada em calor, que aquecerá a máquina como um todo, nomeadamente, o (s) enrolamento (s) da máquina e que, por isso, deverá ser dissipado para o exterior da mesma, para evitar uma elevação de temperatura excessiva, principalmente ao nível dos materiais isolantes constituintes. É que, para além do natural desgaste mecânico resultante do uso da máquina, tal como o verificado nas suas escovas

(máquinas de corrente contínua e de corrente alternada síncronas convencionais) e nos seus rolamentos, a vida útil da máquina eléctrica é, no fundamental, determinada pelo estado dos materiais isolantes nela existentes.

Os materiais isolantes empregues nos circuitos eléctricos dos sistemas electromecânicos de conversão de energia – motores e geradores eléctricos - são predominantemente materiais sintéticos que, no caso de máquinas de grande potência (média e alta tensão) envolvem geralmente um mineral – a mica. A composição dos materiais utilizados no sistema de isolamento de máquinas eléctricas varia muito com a utilização específica prevista para a máquina e com o fabricante da mesma. Procura-se, assim, que os materiais isolantes empregues tenham propriedades físicas e químicas estáveis ao longo do tempo, consoante as condições de funcionamento do sistema.

Sendo certo que qualquer material isolante é afectado por muitos factores externos - como humidade, vibrações mecânicas, ambientes quimicamente corrosivos e temperatura de trabalho (em especial, dos materiais isolantes impregnados).

Ao longo desta dissertação reporta-se um estudo de sistemas de isolamento, em motores de média tensão (MT), vigentes na WEG Máquinas (Brasil) tendo sempre presente a integração de tais materiais isolantes no processo de fabrico das máquinas eléctricas rotativas.

3. OBJECTIVOS

Os objectivos previamente fixados para a dissertação foram os seguintes:

1. Apresentar detalhadamente o processo de fabrico de estatores de máquinas eléctricas de alta tensão;
2. Avaliação de Sistemas de Isolamento;

No presente ponto é importante salientar que a avaliação de um sistema de isolamento é um assunto relativamente complexo, que exige tempo e dedicação para a sua realização e análise. Quer isto dizer que, na avaliação de sistemas de isolamento, apenas serão apresentados normas e métodos para a sua realização, e uma breve descrição de testes realizados, já que todos os testes necessários, compreendem longos meses e, por vezes um ou dois anos e testes e ensaios laboratoriais.

Relativamente à comparação dos sistemas de isolamento vigentes na WEU (assunto inicial da presente dissertação) salienta-se o facto de muitos pormenores importantes serem naturalmente considerados de segredo industrial. Pelo que na presente dissertação se reportam algumas diferenças essenciais. Já as composições detalhadas dos materiais isolantes, bem como os respectivos preços, apenas serão apresentados num outro relatório complementar, de circulação restrita no interior da empresa WEGeuro.

4. Enquadramento, conceitos e definições

4.1 Falhas em máquinas eléctricas de alta tensão

As principais falhas que ocorrem numa máquina eléctrica como se pode observar na figura 2 são, na sua maior parte, de origem mecânica e eléctrica, embora existam alguns problemas de origem química, como por exemplo motivados por corrosão de materiais [1].

Os problemas mecânicos das máquinas eléctricas afectam o seu suporte, fixação e estabilidade térmica do conjunto; condicionam o desenho da carcaça da máquina segundo os padrões de marca e local de instalação, os mancais para suporte do rotor e o sistema de refrigeração. Este último é de extrema importância numa máquina eléctrica, já que maior parte das perdas de origem mecânica e/ou eléctrica são transformadas em calor, que necessita de ser retirado para o exterior para que a máquina preserve as suas características funcionais [1].

Como problemas de índole eléctrica, destacam-se os problemas com o sistema de isolamento sobrecargas, protecções, perdas magnéticas, perdas por efeito de Joule, entre outras. Estas falhas podem ter origem em processos químicos, como a corrosão dos materiais isolantes, devido essencialmente às características do local de funcionamento da máquina eléctrica [1].

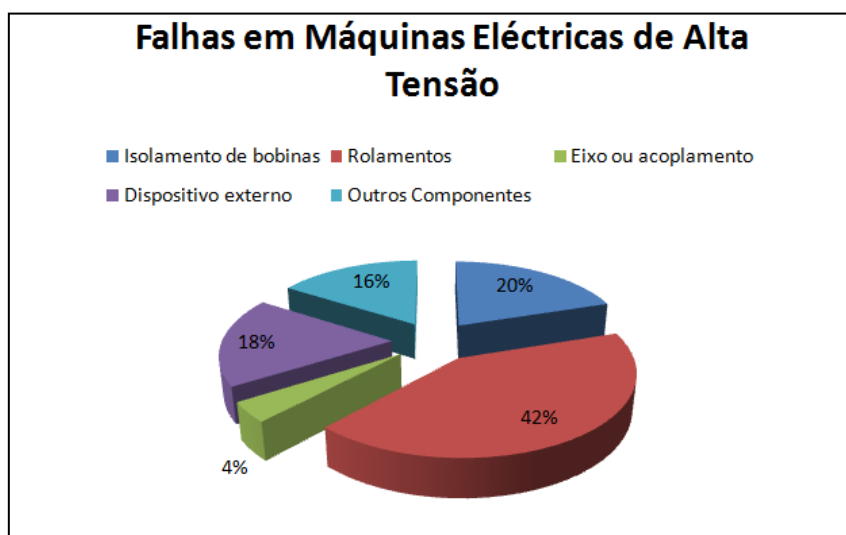


Figura 2. Origem das principais falhas em máquinas eléctricas [3]

4.2 Sistema de Isolação

A combinação de dois ou mais materiais isolantes num equipamento eléctrico denomina-se por Sistema de isolação.

Para se definir um sistema de isolação é necessário conhecer a temperatura de trabalho quando a máquina se encontra em regime, a tensão nominal da máquina, a resina utilizada na impregnação, o ambiente em que a máquina irá operar bem como a aplicação da máquina.

A isolação da parede principal de máquinas eléctricas rotativas de alta tensão consiste numa barreira resistente a descargas parciais, num material de apoio que confere resistência mecânica e de uma resina aglutinante que preenche todos os vazios entre a mica e o material de apoio como se pode observar na figura 4 [4]. Descargas parciais são sucessões de descargas eléctricas incompletas, rápidas e intermitentes na ordem de nano – segundos, figura 3, que ocorrem pela proximidade entre duas partes condutoras de electricidade e um meio isolante, pelo efeito de ionização em cavidades gasosas no interior dos materiais isolantes sólidos e líquidos. Tais descargas também podem ocorrer na zona de contacto de isolantes sólidos (dieléctricos) e superfícies metálicas submetidas a tensão eléctrica [15].

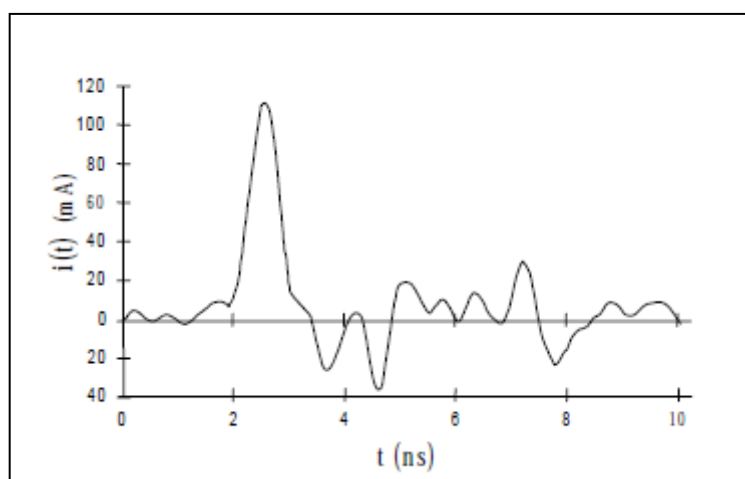


Figura 3. Exemplo de uma descarga parcial

As descargas parciais podem ocorrer em vazios ou cavidades em isolantes sólidos (papel, poliéster, micas, resinas), em bolhas de ar em isolantes líquidos ou em torno de um eléctrodo num gás. Assim, descargas parciais podem ser classificadas em três categorias, de acordo com o local de isolação onde ocorrem [8] e ainda incluir uma

quarta categoria como consequência directa das categorias anteriores [7]:

i. Descargas internas, que ocorrem em vazios ou cavidades no interior de dieléctricos sólidos ou líquidos.

ii. Descargas superficiais, que ocorrem na superfície fronteira entre materiais isolantes ou na superfície de um dieléctrico partindo de um eléctrodo;

iii. Descarga de coroa (Efeito Coroa), que ocorrem em gases dieléctricos na presença de campos eléctricos não homogéneos junto a um condutor.

iv. Descargas de arborescência eléctrica (treeing) que têm a sua origem no impacto contínuo de descargas num dieléctrico, levando à formação de caminhos condutores.

No ponto 5.3.2 é apresentado o procedimento de ensaio realizado bem como um exemplo de resultados obtidos para uma máquina.

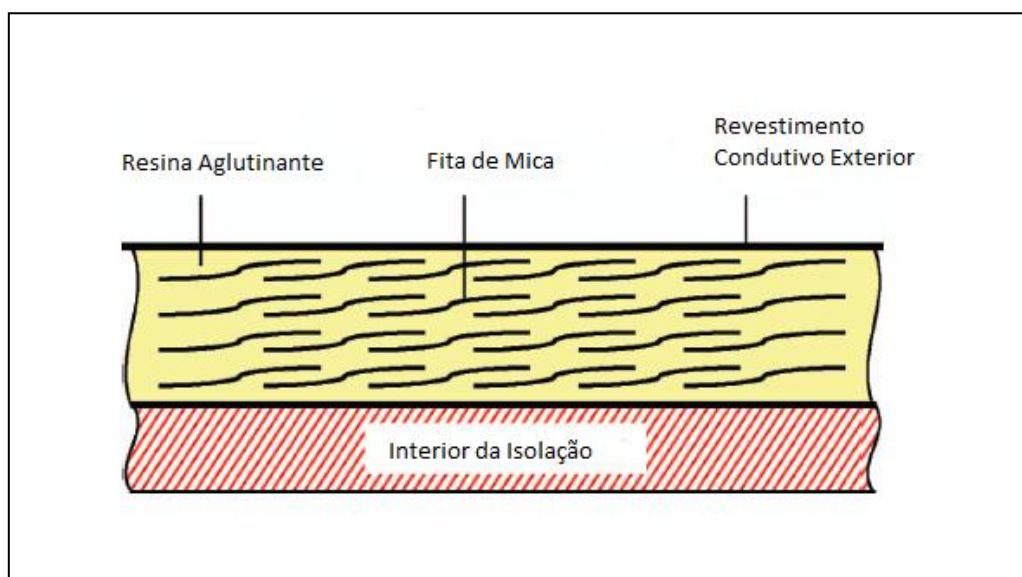


Figura 4. Estrutura da isolação de um enrolamento [4].

4.3 Material Isolante

A vida útil de uma máquina eléctrica depende, quase exclusivamente, do

isolamento eléctrico dos seus enrolamentos. Factores como a humidade, as vibrações, ambientes corrosivos, a temperatura de trabalho dos materiais isolantes impregnados, entre outros menos relevantes, são decisivos no desempenho do seu sistema de isolação.

Pela lei de Arrhenius [1] sabe-se que, um aumento de 8 a 10 graus Celsius acima do limite da classe térmica na temperatura de isolamento de um isolante pode reduzir a metade a vida útil do isolamento da bobina [2]. Em máquinas médias e grandes, para monitorizar e prevenir este problema, são vulgarmente utilizados sensores térmicos devidamente posicionados nas fases de projecto e de fabrico das mesmas [2].

A vida útil do isolamento refere-se ao envelhecimento gradual do isolante, que vai ressequindo e perdendo as suas características isolantes, ao ponto de não suportar mais a tensão aplicada e vir a originar um curto-circuito.

Por outro lado, se a sua temperatura de funcionamento for mantida abaixo do limite da respectiva classe térmica, o isolante possuirá vida útil elevada; caso contrário, a sua vida útil vai-se tornado cada vez mais curta à medida que a temperatura de trabalho aumenta. E, será bom lembrar que, para que um enrolamento fique totalmente inutilizado, basta haver um “ponto fraco” no interior de uma das suas bobinas constituintes [1].

Pelo que nunca será de mais ter presente que um material isolante impede, limita e direcciona correntes eléctricas, impedindo o fluxo de corrente de um condutor para a terra ou para um potencial mais baixo, servindo também como suporte mecânico e como meio de protecção do condutor perante as agressões do meio ambiente. E tem de permitir a transferência para o exterior do calor gerado no próprio condutor [1].

Para um isolante é necessário avaliar a máxima temperatura de trabalho, resistência à tracção, resistência à flexão, o seu custo, a rigidez dieléctrica, absorção de humidade e índice de temperatura.

4.4 Classe térmica

Como já foi mencionado, a temperatura é geralmente o factor predominante no envelhecimento dos materiais isolantes e do correspondente sistema de isolação. O que diferencia a classe de isolamento são os materiais isolantes utilizados. Estes são classificados de acordo com a sua capacidade de suportar as diferentes temperaturas a

que vão ser sujeitos durante um longo período de tempo. A classe térmica de um equipamento electromecânico indica a temperatura de máxima que o equipamento pode atingir no seu ponto mais quente quando funcionar à plena carga [2].

É importante referir que o limite máximo de temperatura de um sistema de isolamento não se encontra directamente relacionado com a capacidade térmica dos materiais isolantes utilizados nesse sistema, podendo subir ou baixar consoante a forma de conjugação dos mesmos.

Assim e de acordo com a Edição 4 (2007) da norma IEC 60085, as classes de temperatura actualmente em uso são as apresentadas na tabela seguinte.

Temperatura máxima (°C)	Classes de temperatura
	IEC 60085
90	90° (Y)
105	105° (A)
120	120° (E)
130	130° (B)
155	155° (F)
180	180° (H)
200	200° (N)
220	220° (R)
240	[Não existe]
250	250°(250)

Tabela 1 - Classes de Temperatura

4.5 Sistema de Isolamento WEG

O sistema de isolamento WEG para máquinas eléctricas girantes é baseado no processo “Vacuum Pressure Impregnation” (VPI). O sistema de isolamento divide-se em cinco subsistemas de isolamento, nomeadamente: isolamento do condutor; isolamento entre espiras; isolamento principal; protecção contra efeito corona; e isolamento das conexões.

É importante salientar aqui que todo o processo de fabrico de estatores para

máquinas eléctricas girantes será detalhado no capítulo 5. O objectivo do presente ponto será, então, o de apresentar apenas todos os conceitos que se prendem com o sistema de isolamento utilizado neste tipo de máquinas.

O isolamento do condutor é determinado de acordo com o nível de tensão entre espiras e com as dimensões do condutor, e consiste num verniz poliesterimida para altas temperaturas, podendo ser recoberto com uma ou duas camadas de filamentos de fibra-de-vidro ou de fita à base de mica, tendo ainda o fio de cobre nu recoberto com fita à base de mica.

O isolamento principal, aplicado às bobinas pré-formadas, consiste em papel de mica altamente absorvente como se pode observar na figura 5, resina epóxi especial como aglutinante e tecido de vidro como base, a fim de garantir a resistência mecânica necessária para aplicação manual ou mecanizada. Relativamente ao número de camadas de isolante a serem aplicadas, estas dependem da tensão especificada nominal da máquina a ser fabricada. É importante referir que a mica apresenta excelentes características, nomeadamente a de resistir a descargas parciais, apresentar elevada estabilidade térmica, suavizar os picos de intensidade do campo eléctrico; da sua parte, o papel de mica apresenta alta rigidez dieléctrica e baixa resistência mecânica.

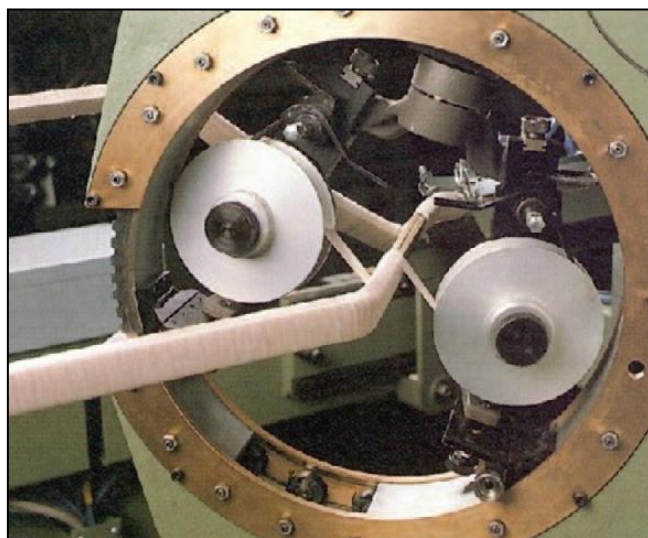


Figura 5. Exemplo de aplicação de fita de mica numa bobina [11]

A protecção contra efeito corona é recomendada para máquinas de tensão nominal superior a 5 kV [2]. Nestes casos é aplicada uma fita condutora, que consiste num falso tecido de poliéster ou tecido de vidro, dependendo da classe térmica,

impregnado com verniz especial, composto por partículas condutoras à base de carbono, garantindo a resistividade superficial necessária para evitar as descargas provocadas pelo efeito corona.

Relativamente às conexões, todas são isoladas com a mesma fita e número de camadas para ser garantida capacidade de isolamento em todos os pontos do estator bobinado.

Após todo o processo de bobinagem do estator, este é impregnado a em vácuo e sob pressão positiva, utilizando-se para o efeito uma resina epóxi classe H, conforme comprovado na norma IEC 60216 e isenta de solventes, o que garante ao sistema de isolamento excelentes propriedades eléctricas e mecânicas.

Como se trata de uma resina 100% sólida, garante uma excelente homogeneidade e evitam a presença de bolhas de ar no isolamento após a polimerização e cura final. O processo VPI pode ser decomposto em dois tipos: o VPI de barras simples e o Global VPI [9].

O VPI de barras simples é preferencialmente utilizado para máquinas de grande porte e apresenta como vantagem o facto das barras impregnadas poderem ser testadas antes da inserção na ranhura; no entanto, apresenta um elevado custo quando comparado com o global VPI. Comparativamente, o Global VPI apresenta como vantagem a selagem hermética do estator completo e menor custo. As desvantagens prendem-se com questões de limitação do tamanho do tanque VPI e de fornos de cura, a que se junta a dificuldade de remoção de bobinas com defeito [9].

É necessário obedecer rigorosamente a todo o processo que engloba o VPI, já que se da impregnação resultarem espaços vazios e bolhas de resina, são susceptíveis de formar rachaduras com a redução da resina durante a cura. [10].

5. Processo de Fabrico de Estatores de Máquinas Eléctricas

5.1 Fabricação de Bobinas

O processo de fabrico de máquinas eléctricas MT respeita um conjunto de normas internas e externas vigentes na WEG. O processo de fabrico de bobinas pode ser observado na figura 6.

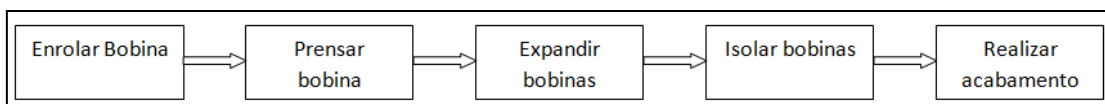


Figura 6 - Processo de fabrico de bobinas

As bobinas para máquinas rotativas de alta tensão são confeccionadas com fios de cobre rectangulares, com quatro tipos de isolamento dependendo da aplicação, nomeadamente: fios de cobre esmaltados; fios de cobre esmaltados recobertos com uma ou duas camadas de filamento de vidro, fios de cobre nus recobertos com fita à base de mica, fios de cobre esmaltados recobertos com fita à base de mica.

As dimensões dos fios, bem como o seu número, são definidos na especificação electromecânica (EE) da máquina a ser fabricada. O número de carretéis de fio a utilizar depende no número de fios paralelos necessários. Após os procedimentos anteriores é preparada a bobinadeira que enrolará a bobina sob a forma de um trapézio, tendo em conta as dimensões especificadas na EE. Após enrolar a bobina é necessário conferir o número de espiras, bem como realizar todos os procedimentos de isolamento definidos pela empresa. Um aspecto importante a ser observado é o número de bobinas invertidas necessárias, já que estas são sempre usadas para áreas classificadas ou para uma tensão superior a 11kV como primeiras ou últimas bobinas de um grupo, dependendo da sequência de bobinagem.

A bobina, na forma de trapézio, figuras 8,9 e 10, é prensada numa prensa quente e numa fria (à temperatura ambiente), para redução da espessura da isolação dos fios e para consolidação da parte recta. O tempo de prensagem varia com a altura da bobina. Após o processo anterior, as bobinas são expandidas de acordo com os dados encontrados na especificação EE. No caso de fabrico de bobina sobressalente, são realizados ensaios para apuramento do factor de perdas dieléctricas ($\text{tg } \delta$). A(s) bobina(s) sobressalentes são fabricadas quando o cliente quer se sejam realizados testes destrutivos nas bobinas. Assim, estas bobinas são idênticas às bobinas empregues na máquina, nas quais são simuladas os testes necessários. O ensaio de perdas dieléctricas, também conhecido por factor de dissipação ou $\text{tg } \delta$, pode demonstrar a existência de descargas parciais, já que a energia libertada por estas irá aumentar o factor de dissipação. No entanto, só poderá ser tomado como factor meramente indicativo, já que, mesmo com uma quantidade elevada de carga medida nas descargas parciais, como

perdas adicionais geradas em pequenas secções localizadas podem ser demasiado pequenas quando comparadas com o processo de polarização dos dieléctricos do isolante [7].

Seguidamente, passam pelo processo de isolamento, no qual são isoladas com fita porosa à base de mica, em que o número de camadas depende da tensão nominal da máquina, de forma a garantir rigidez dieléctrica necessária.

A protecção contra o efeito corona é garantida pela utilização de duas fitas: a condutora, que evita as descargas provocadas na ranhura do estator, semicondutora, que é responsável pela equalização do gradiente de potencial eléctrico no término do pacote do estator. Um exemplo de aplicação destas fitas pode ser observado na figura 7 [11].

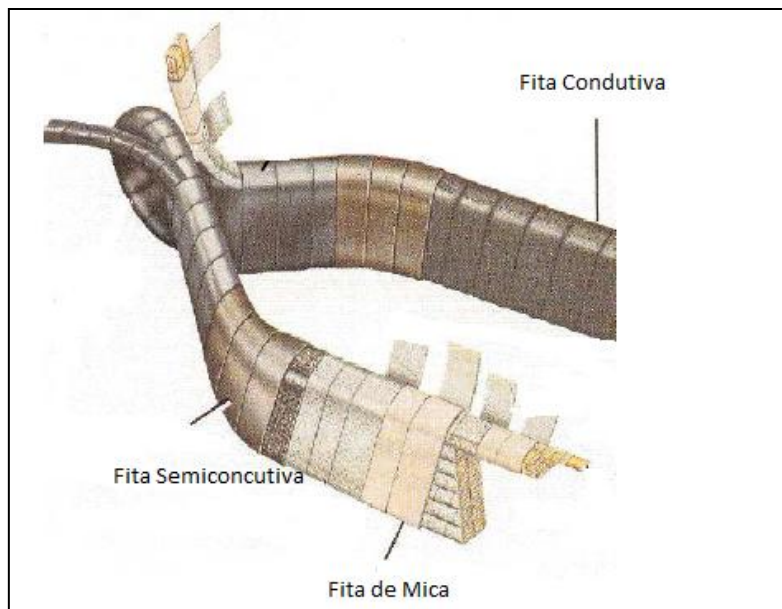


Figura 7. Localização das fitas condutiva e semicondutora na bobina [11]

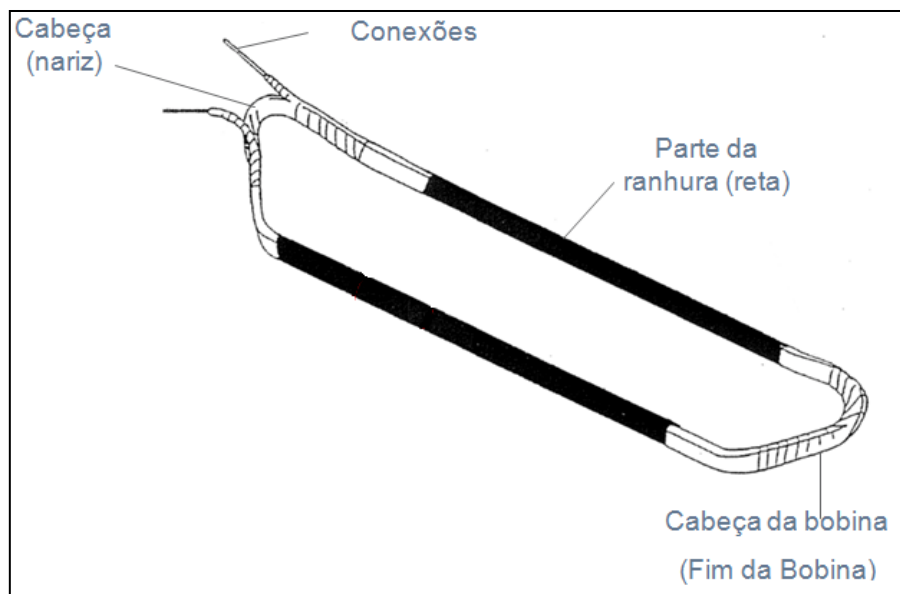


Figura 8. Exemplo da forma final de uma bobina [11]



Figura 9. Conjunto de bobinas em forma de trapézio antes de serem inseridas no estator



Figura 10. Bobina em Forma de trapézio antes de ser inserida no estator

5.2 Bobinagem de Estatores

Após o isolamento das bobinas estas são inseridas no pacote do estator, figuras 12 e 13 tendo em conta o passo definido e as ranhuras são fechadas com cunhas magnéticas ou não magnéticas, dependendo da aplicação da máquina a ser fabricada.

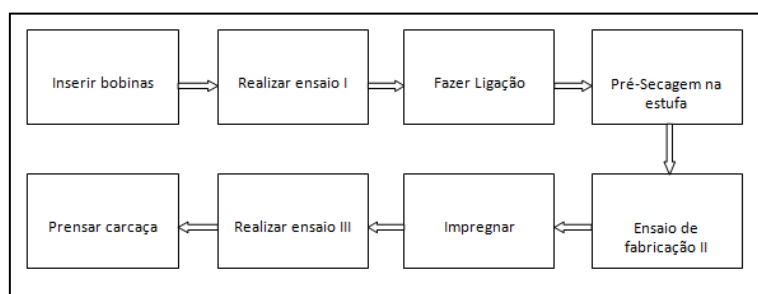


Figura 11. Processo de bobinagem de estatores

A fixação das cunhas é assegurada pelo canal em rabo de andorinha na ranhura e pela utilização de laminado expansível à base de manta de vidro.

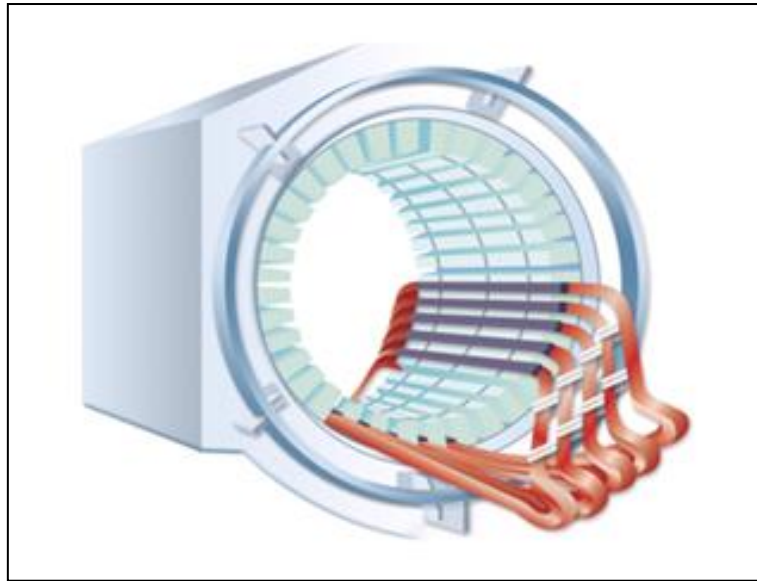


Figura 12. Exemplo de inserção de bobinas no estator de uma máquina eléctrica



Figura 13. Bobinas inseridas na ranhura de um estator.

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

- ✓ Entre a bobina e a ranhura, para isolar o pacote de chapas de aço à massa da bobina de fios esmaltados;

- ✓ Entre fases, para isolar electricamente uma fase da bobina das outras fases;
- ✓ Fecho da ranhura do estator, para isolar electricamente a bobina, localizada na parte superior da ranhura, da ranhura do estator e para actuar mecanicamente de modo a manter os fios dentro da ranhura do estator;

Aquando da bobinagem de estatores, figura 14, é necessário ter em conta a protecção térmica utilizada, já que os motores em regime contínuo devem ser protegidos contra sobrecargas indesejadas. Os tipos de detectores utilizados são determinados em função da classe de temperatura do isolamento impregnado, de cada tipo de máquina e da exigência do cliente. Os tipos de protectores utilizados pela WEG para máquinas eléctricas de alta tensão são: os Termorresistores (PT – 100), figuras 15, 16 e 17 e os Termistores (PTC e NTC), figura 18. Os denominados PT – 100 aplicam-se geralmente em instalações que exijam elevada responsabilidade, como por exemplo um regime intermitente muito irregular, onde um mesmo detector pode servir para alarme e para desligamento. Os elementos sensores e os circuitos de controlo apresentam um alto custo. Relativamente aos termistores, estes possuem tamanho reduzido, não sofrem desgastes mecânicos e possuem uma resposta mais rápida, quando comparados com outros detectores, embora não permitam um acompanhamento contínuo do aquecimento do motor. Este tipo de detector, juntamente com os seus circuitos electrónicos de controlo, oferece protecção completa contra o sobreaquecimento produzido por: falta de fase; sobrecarga; sub- ou sobretensões; manobras de inversão. Possui ainda um baixo custo, quando comparado com os PT – 100; no entanto, necessita de um relé, para comando da actuação do alarme ou operação.

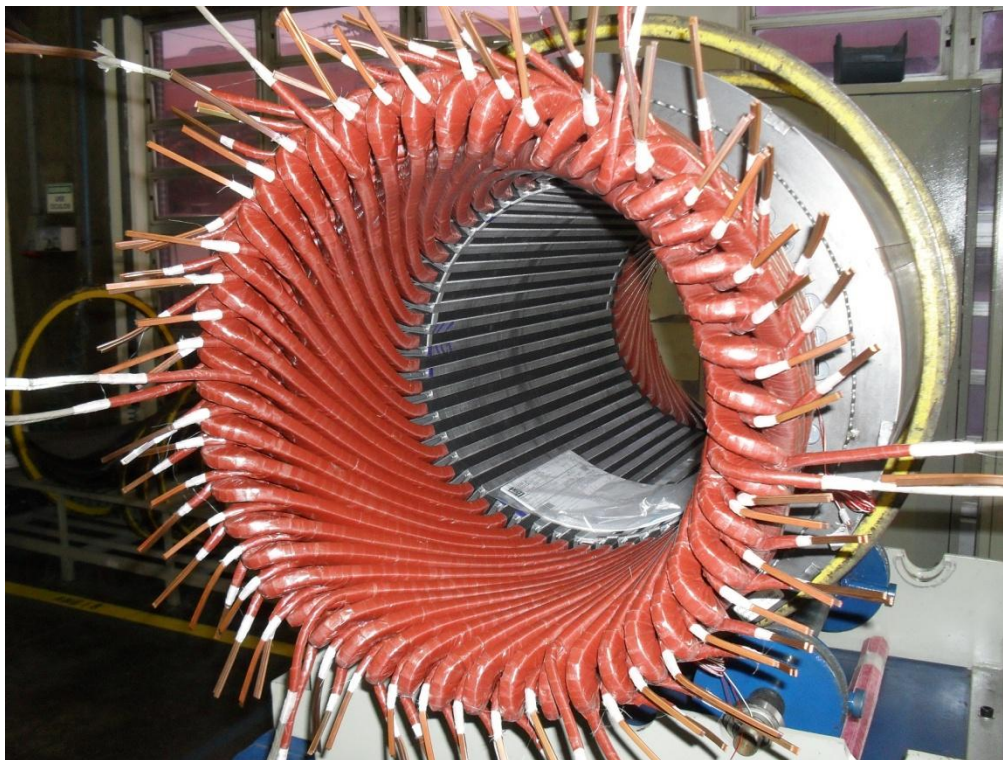


Figura 14. Exemplo de um estator bobinado



Figura 15. Exemplificação dos PT-100 inseridos no estator

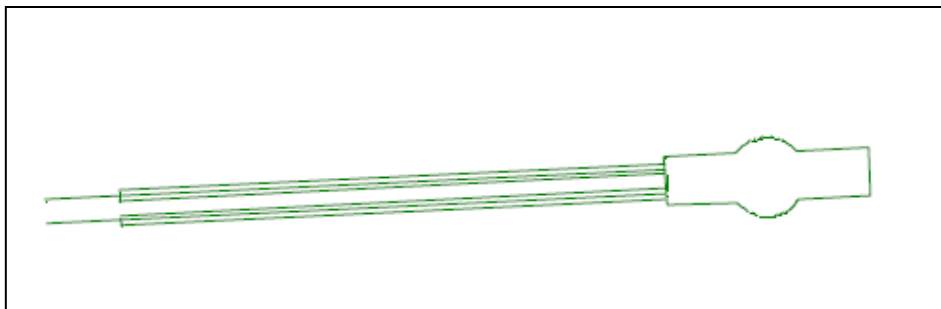


Figura 16. Aspecto externo de um termistor [13]

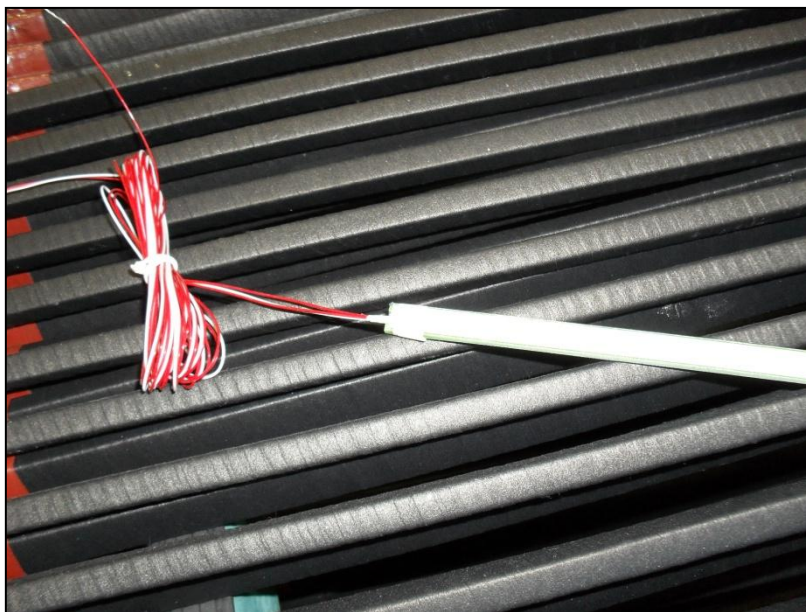


Figura 17. Exemplo de um PT-100 antes de ser inserido no estator

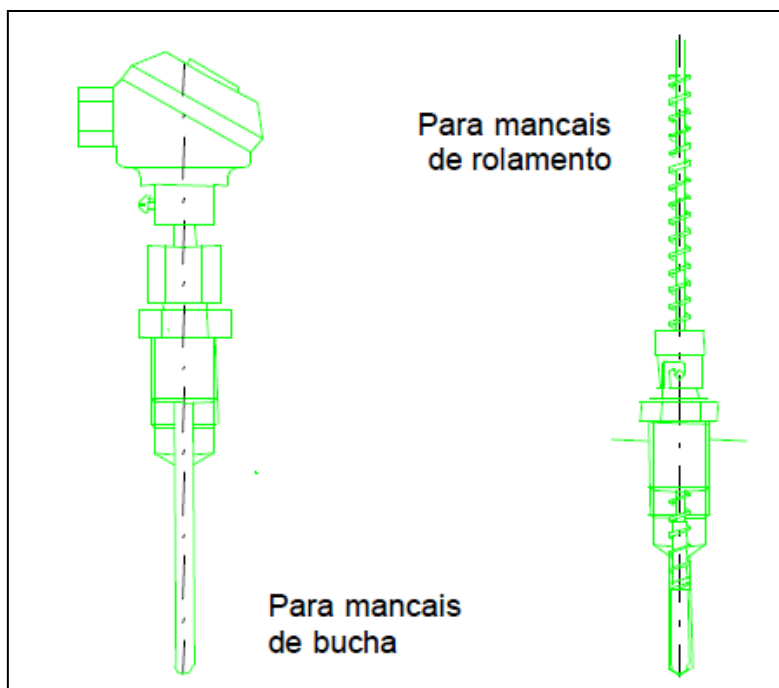


Figura 18. Aspecto externo de termoresistores [13]

Após os cuidados anteriores procede-se, à amarração das cabeças das bobinas, que é realizada utilizando materiais altamente absorventes, assim garantindo a rigidez mecânica necessária às cabeças das bobinas para suportar as mais severas condições de funcionamento, figura 19.



Figura 19. Amarração das cabeças de bobinas

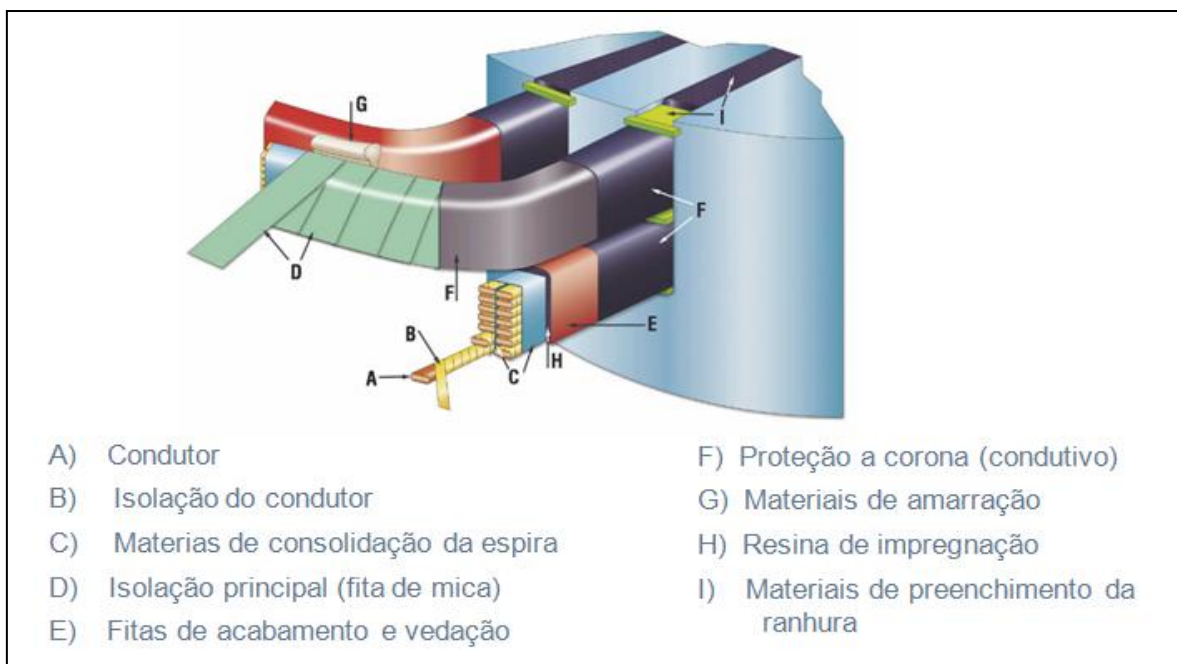


Figura 20. Sistema de isolamento para máquinas MT e AT [11]

Antes de proceder à ligação das bobinas, são realizados os testes de tensão a fim de verificar se existe algum eventual curto-circuito entre espiras. Seguidamente as pontas das bobinas são preparadas para soldadura das conexões e, aí, é realizada a ligação conforme o esquema de bobinagem da máquina a ser fabricada. Toda a região soldada é isolada com fita à base de mica e um cordão de cadarço termocontrátil, figura 21.



Figura 21. Realização da ligação conforme o esquema de bobinagem

O processo seguinte consiste na impregnação do estator, que obedece aos seguintes passos:

- a) O estator é colocado na estufa, para pré-aquecimento e secagem num ambiente de 90°C durante 10h, figura 22.

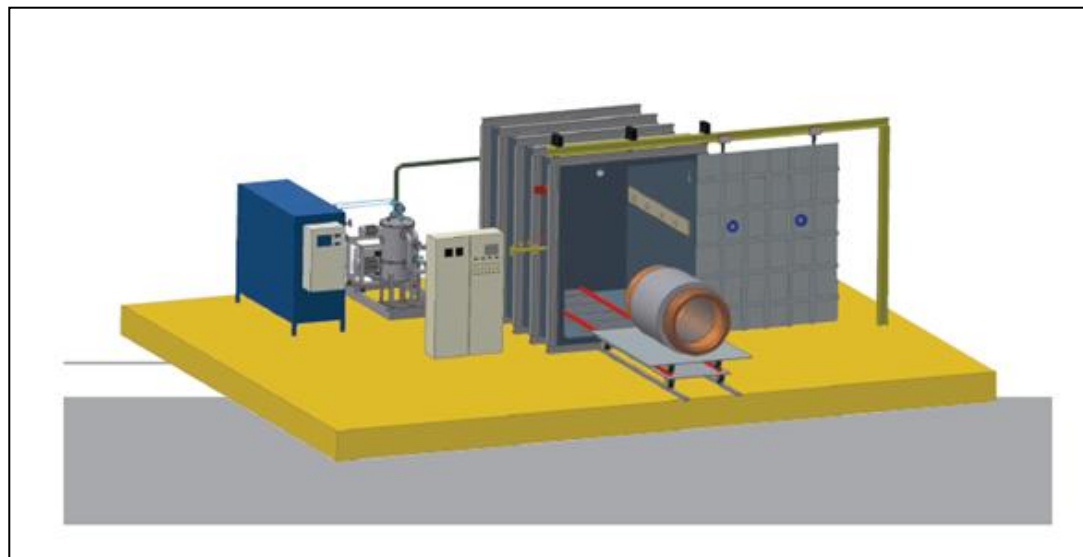


Figura 22. Exemplo de um estator a ser colocado numa estufa [14]

- b) A máquina é transferida para o tanque em que se estabelece o vácuo. Para máquinas de Tensão nominal inferior a 6000V são aplicados 0,5 mbar durante 1800s, para máquinas de tensão nominal superiores os 6000V são aplicados 0,2 mbar durante 3600s, figura 23.

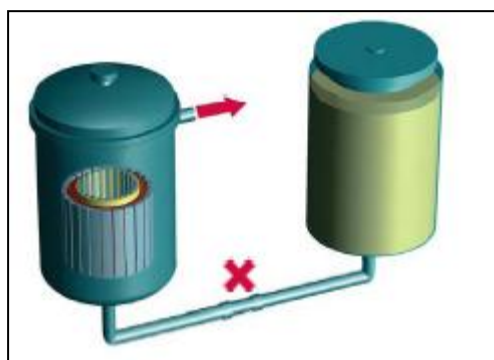


Figura 23. Aplicação de vácuo [11]

- c) O tanque é inundado com resina de impregnação. A resina deve se encontrara a 55°C e com uma viscosidade máxima de 200mPas.

Relativamente ao volume de resina deve ser o suficiente para cobrir a peça a ser impregnada, figura 24.

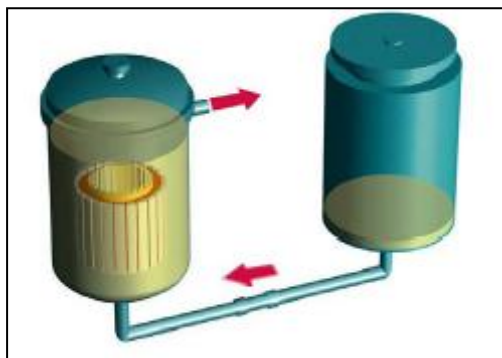


Figura 24. Transferência de resina [11]

- d) Fase de pressão: o isolamento é impregnado com a resina a 4,9 bar de pressão. Para máquinas de tensão nominal inferior a 6000V o tempo de pressão imerso em resina é de 1h. Para máquinas de tensão nominal superior a 6000V o tempo de pressão imerso em resina é de 2h, figura 25.

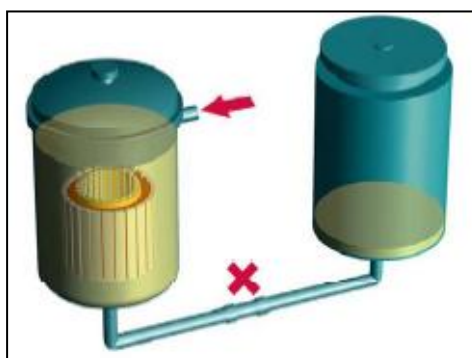


Figura 25. Fase de Pressão [11]

- e) A resina é transferida de volta ao respectivo tanque de armazenamento e a máquina eléctrica segue para a estufa de cura a 170°C, no mínimo durante 12h, figura 26.

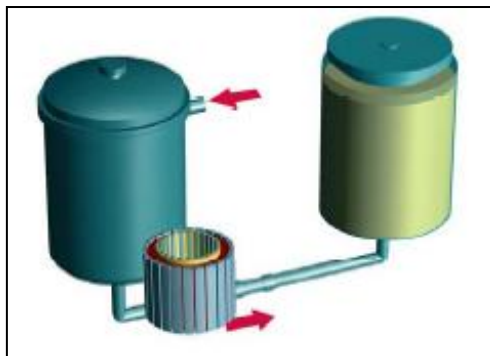


Figura 26. Transferência da resina de volta ao tanque de armazenamento [11]

As resinas VPI conferem às máquinas impregnadas as seguintes características:

- ✓ Preenchimento de espaços vazios;
- ✓ Boa aderência aos condutores;
- ✓ Aumento da resistência mecânica;
- ✓ Boa capacidade de transferência de calor;
- ✓ Protecção do isolamento dos produtos químicos, sujidade e humidade;

A figura 27 diz respeito a um exemplo de uma planta de um sistema VPI, onde é possível observar os elementos constituintes deste tipo de sistema.

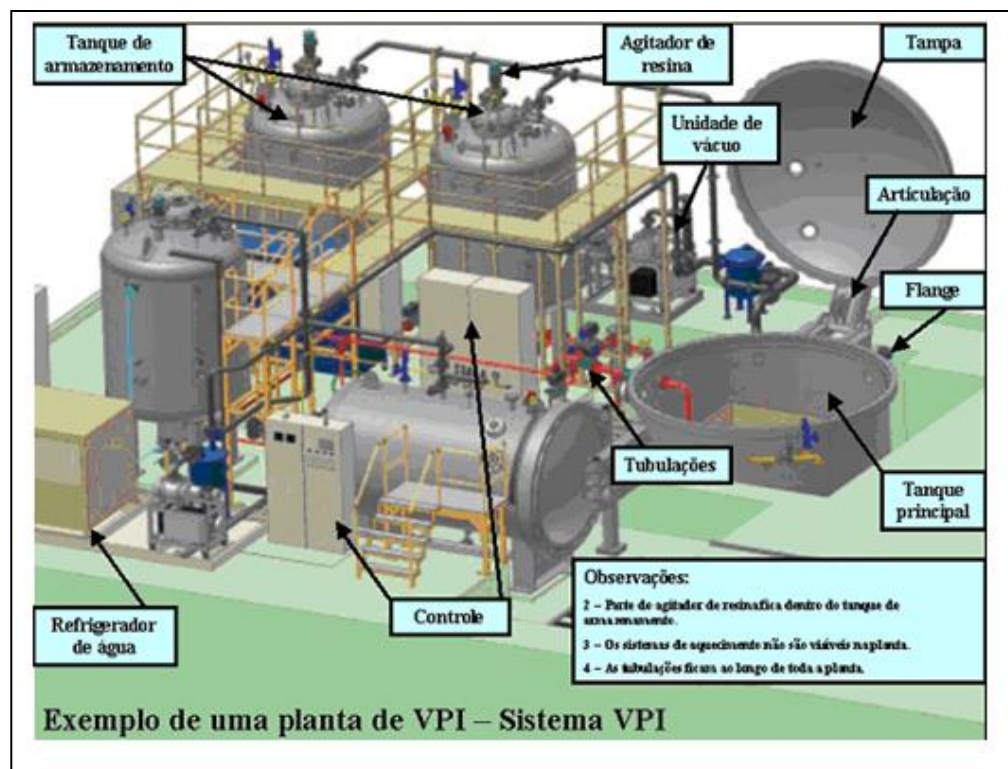


Figura 27. Exemplo de uma planta de um sistema VPI [14]

O processo industrial de aplicação do material isolante apresenta uma elevada influência no resultado final da isolação.

O objectivo não é valorizar a aplicação industrial da isolação, quando comparado com a aplicação manual, no entanto, serve o presente ponto, para demonstrar a importância de uma correcta aplicação do material isolante [9].

O processo de impregnação tem um efeito muito significativo no tempo de avaria da isolação da máquina [9].

Os factores que determinam a qualidade da isolação eléctrica no processo VPI são descritos de seguida:

✓ **Tipos e propriedades dos materiais isolantes;**

Existe uma grande variedade de fitas de mica com especificações e seleccionar a mais correcta para uma determinada aplicação necessita de uma análise cuidadosa. A espessura da fita, é outro aspecto chave, já que utilizando-se fitas mais espessas, um enrolamento necessita de menos camadas para ser isolado e a impregnação é mais fácil, isto é, a resina atravessa a isolação

facilmente; no entanto a flexibilidade da fita é reduzida quando comparada com uma fita menos espessa. Este tipo de fita é adequado para grandes máquinas com elevadas dimensões das barras constituintes. As fitas são em grande parte do tipo muscovita não calcinado, apresentado elevada porosidade que por sua vez facilita a impregnação [9].

A resina VPI é um factor essencial na selecção de materiais, o seu conteúdo na isolação final é cerca de 20 a 30 %. A qualidade da resina determina a classe térmica final da isolação. Na tabela 2 é possível visualizar tipos de resinas actualmente mais utilizadas e respectivas propriedades [9].

Tipo de Resina	Poliéster	Poliéster Imida	Epóxi híbrida	Epóxi Anidrido	Epóxi Calisado
Classe Térmica	F	H	F	F	F
Vida Útil	Média	Elevada	Média	Média - Elevada	Média - Elevada
Sensibilidade à Humidade	Não	Não	Sim	Sim	Não
Problemas de toxicidade	Estireno	Estireno	Estireno	Anidrido	-----
Temperatura de Impregnação	RT	RT	RT	40-70C	RT-60°C
Tempo de gel (120°C), min.	15-30	2-3	4-6	4-6	>100
Ciclo de Cura	Pequeno	Pequeno	Médio	Médio	Médio - Elevado

Adesão da Resina Curada	Moderada	Moderada	Boa	Boa	Boa
Propriedades Eléctricas	Moderada	Boa	Boa	Boa	Moderada - Boa

Tabela 2. Exemplos de resinas existentes e respectivas propriedades [9].

A reacção de cura do polímero é usualmente acelerada por catalisadores e/ou endurecedores. A tecnologia VPI oferece a possibilidade de escolha entre sistemas que contêm catalisadores na fita ou na resina VPI. O facto do catalisador se encontrar na fita apresenta algumas vantagens, nomeadamente, vida útil mais longa da resina VPI, menos resina a “gotejar” após a impregnação, contudo, é importante que a reactividade da fita com a resina e os parâmetros do ciclo VPI sejam bem ajustados. Caso contrário, o aumento prematuro da viscosidade da resina na isolação das peças impregnadas pode ocorrer antes do processo de impregnação esteja concluído e como consequência bloquear a penetração da resina [9].

✓ **Aplicação da isolação**

A correcta aplicação dos materiais de isolação bem como o respeito pelos seus parâmetros, como tensão da fita, número de camadas necessárias, têm influência na qualidade da isolação [9].

Para um mesmo tipo material de isolação, se atendermos ao processo de fabrico, ao colaborador envolvido, ao facto da isolação ser realizada de forma manual ou através de máquinas, pode originar resultados diferentes como se observa nas figuras 28, 29 e 30 [9].

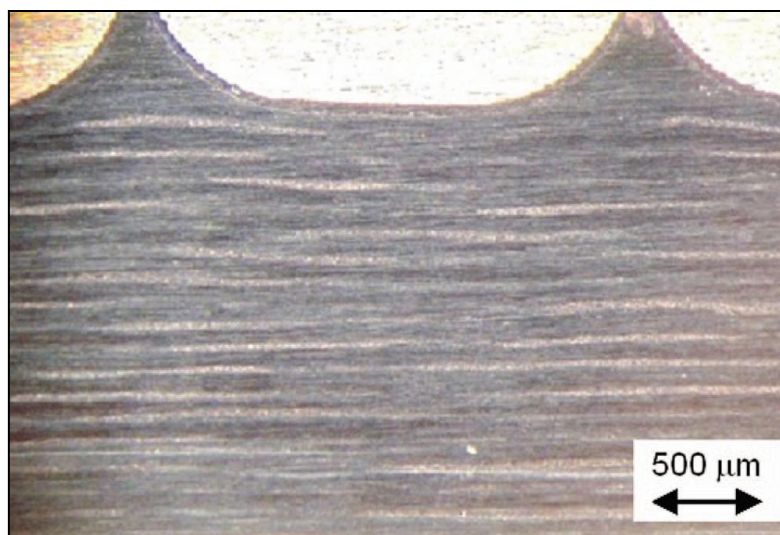


Figura 28. Estrutura da isolação VPI: material de referência [10]

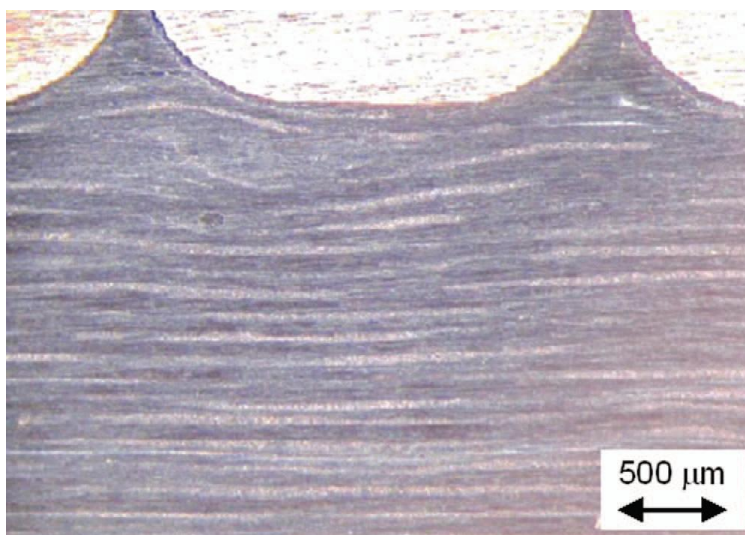


Figura 29. Estrutura da isolação VPI: fabrico industrial com aplicação do material isolante com máquina [10]

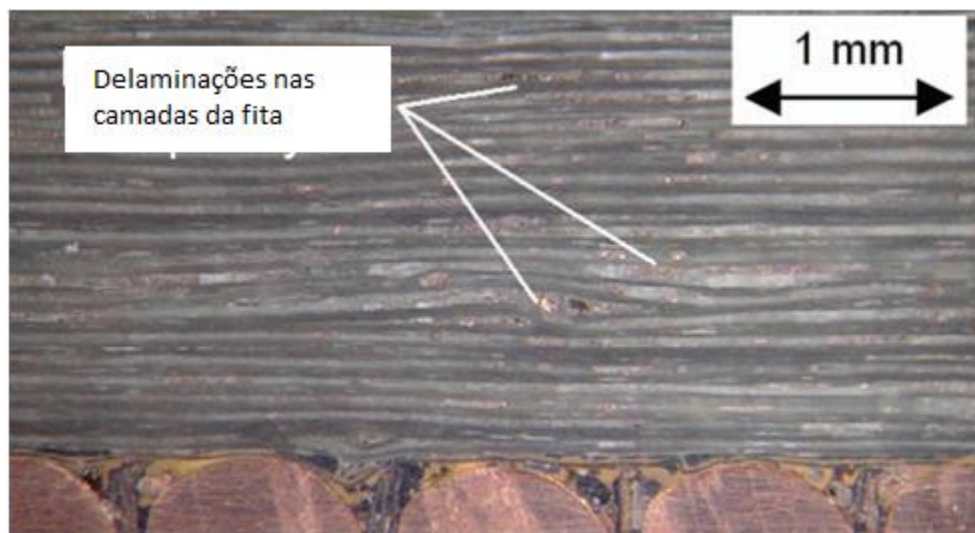


Figura 30. Estrutura da isolação VPI: Fabrico industrial com aplicação do material isolante de forma manual [10]

✓ Parâmetros do ciclo VPI;

Os parâmetros do ciclo VPI necessitam de ser bem ajustados ao tipo de máquina e sistema de isolação a fim de garantir a completa impregnação e utilização óptima de toda a instalação VPI [9].

Conforme já referido, o ciclo VPI, contém em geral 5 passos, nomeadamente, pré-aquecimento (secagem) numa estufa, vácuo a seco, vácuo com resina, fase de pressão e cura [9].

A resina VPI necessita de constante manutenção, caso contrário, os limites de viscosidade e reactividade podem alcançar valores incorrectos para este tipo de sistema [9].

As condições de cura são dadas pela reactividade química da resina VPI e garantidas pela estabilidade mecânica das bobinas ou barras. A taxa de aquecimento na estufa apresenta uma significativa influência na qualidade final da isolação, já que, uma elevada taxa de aquecimento reduz o risco da resina “escorrer” no final da impregnação, mas por outro lado, no caso de resinas com diluentes reactivos, como é o caso do estireno, podem ocorrer vazios na isolação quando o diluente se evaporar. Para este tipo de resinas, a cura é realizada com a máquina em rotação, para garantir uma uniformização da resina. A temperatura da estufa encontra-se geralmente situada entre 140 e 180°C [9].

✓ Factores de custo

Os factores de custo da isolação de máquinas eléctricas de alta tensão dependem primariamente da potência e da tensão da máquina. O gráfico 1 fornece um exemplo de cálculo para 100MW para um gerador de turbinas a gás, para as três técnicas de isolação, global VPI, individual VPI e sistema *Resin Rich* [9].

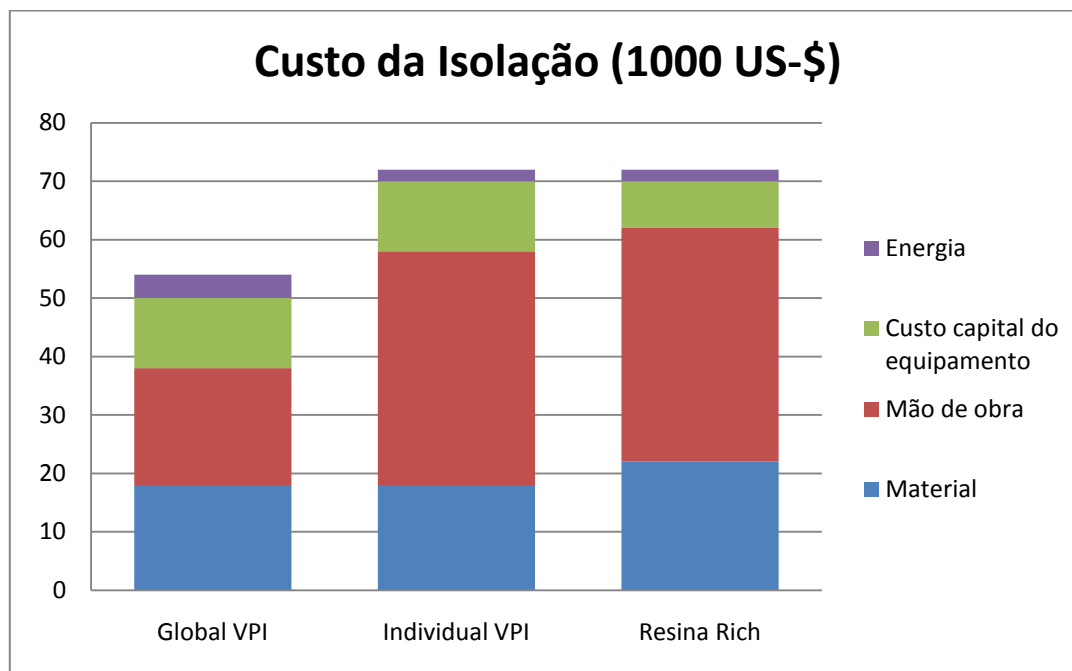


Gráfico 1. Comparação do custo da isolação nos três técnicas de isolação

Analisando o gráfico 1 e a figura 31, verifica-se que, o resultado depende fortemente das condições de fabrico individuais, bem como do tipo de material isolante utilizado.

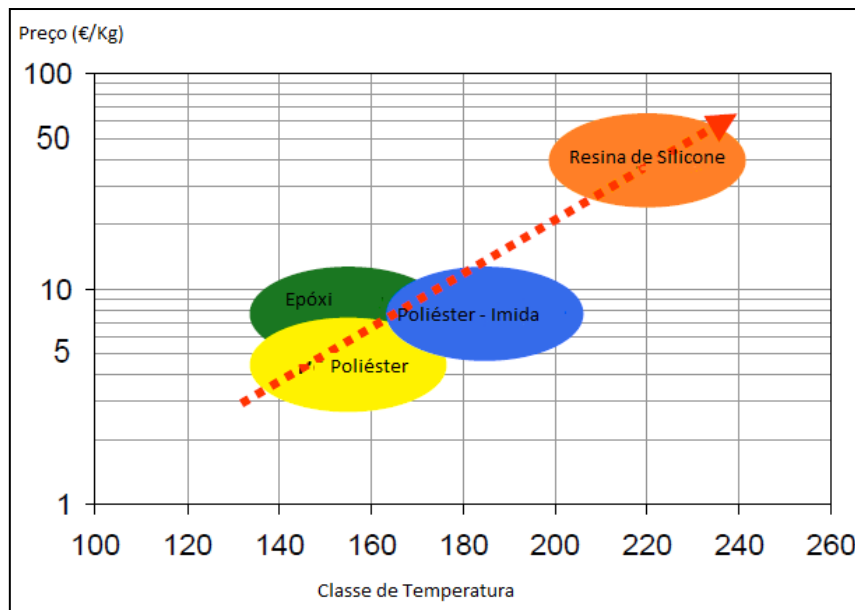


Figura 31. Visão geral de resinas utilizadas no mundo e respectivo preço [11].

A redução de custos é actualmente uma necessidade urgente no fabrico de geradores e motores, isto sem comprometer a qualidade da isolação da máquina. A base das medidas a serem tomadas é uma análise de custo do processo de fabrico e do conhecimento do potencial da redução de custos [9].

5.3 Sistema de testes em estatores bobinados

Após o processo de bobinagem é necessário realizar uma sequência de testes fundamentais para garantir a qualidade do estator bobinado. A implementação de novos testes, aumento de eficiência dos mesmos nas linhas de fabrico é necessário e inevitável a fim de se atingirem os índices de qualidade desejados.

Os defeitos que devem ser identificados após o processo de bobinagem são:

- ✓ Mau isolamento entre a bobina e a chapa do estator;
- ✓ Variação de resistência;
- ✓ Solda mal realizada;
- ✓ Ligações invertidas;
- ✓ Sentido de rotação invertido;
- ✓ Curto entre espiras;
- ✓ Fio fora da ranhura;

- ✓ Curto entre fases;
- ✓ Isolamento dobrado ou danificado;
- ✓ Protector térmico danificado;
- ✓ Fuga do protector para o enrolamento;

Seguidamente é apresentada a descrição de ensaios realizados em estatores bobinados, nomeadamente dos ensaios de resistência eléctrica do enrolamento do fio, de resistência de isolamento, de determinação de perdas dieléctricas (tangente de delta), de tensão aplicada, de teste de surto (*Surge Test comparativo*) e de verificação dimensional e visual. De salientar que todos os testes são conduzidos de acordo com suas respectivas normas aplicáveis.

5.3.1 Ensaio de Resistência Eléctrica do Enrolamento a Frio

A norma de referência é a norma IEEE std 118-1978 – *IEE Standard Test Code for Resistance Measurement*.

Para a realização do teste o estator bobinado a ser ensaiado deve permanecer sob a temperatura ambiente do local de ensaio por um período mínimo de 10 horas para equalização da temperatura. Durante o teste todos os acessórios devem estar devidamente aterrados. A temperatura ambiente e humidade relativa do ar devem ser medidas e registadas. As medições da resistência a frio devem ser feitas em cada fase do estator bobinado. São utilizados para a realização das medições Ponte Kelvin ou Medidor de Resistência por queda de tensão (método da tensão e corrente). Após a aquisição das grandezas eléctricas, são convertidas à temperatura de referência 20°C conforme a seguinte expressão:

Calcular o valor correspondente a 20°C, pela fórmula abaixo:

$$R(20^{\circ}\text{C}) = \left(\frac{K + 20}{K + T_a} \right) \times R(T_a)$$

Onde:

$R(T_a)$ = Resistência Eléctrica Medida a Temperatura Ambiente, em Ω ;

$K = 234,5$ (para o Cobre Electrolítico), adimensional;

T_a = Temperatura Ambiente, em $^{\circ}\text{C}$;

$R(20^{\circ}\text{C})$ = Resistência Eléctrica Correspondente a 20°C , em Ω .

Critérios de aprovação:

1º Critério: Esta etapa estabelece o limite de variação da resistência eléctrica de enrolamentos de estatores bobinados ensaiados.

O limite de variação em relação ao especificado no projecto deve estar na faixa de $\pm 10\%$ calculado conforme formula abaixo:

$$\Delta R\% = \left(\frac{R_{medido}}{R_{especificado}} \right) - 1 \times 100$$

2º Critério: O limite de variação entre fases deve estar na faixa de $\pm 3\%$ calculado conforme a seguinte expressão:

$$\Delta R\% = \left(\frac{R_{medido\ maior}}{R_{medido\ menor}} \right) - 1 \times 100$$

5.3.2 Ensaio de Resistência de Isolação

A norma de referência para o presente ensaio é a norma IEEE std 43/2000 – *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*.

A medição da resistência da isolação será feita durante a aplicação de uma determinada tensão DC no estator bobinado em teste com o equipamento Megôhmetro. A primeira leitura da isolação será feita a 60 segundos após ter iniciado a medição. Durante o teste todos os acessórios devem estar devidamente aterrados. A temperatura ambiente e humidade relativa do ar devem ser medidas e registadas. A tensão do instrumento será seleccionada de acordo com a tensão nominal da máquina conforme tabela 3.

Tensão Nominal	Tensão de Teste D.C.
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500

5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

Tabela 3. Níveis de tensão aplicados

Após aquisição das grandezas eléctricas, estas devem ser convertidas à temperatura de referência 40°C conforme a seguinte expressão:

$$R_{t40^{\circ}\text{C}} = R_t \times K_{t40^{\circ}\text{C}} \quad K_T = (0,5)^{(40 - T)/10}$$

Onde:

$R_{t40^{\circ}\text{C}}$ = Resistência do Isolamento a 40°C, em MΩ;

R_t = Resistência do Isolamento na temperatura t, em MΩ;

$K_{t40^{\circ}\text{C}}$ = Coeficiente de Correção para a Temperatura do Enrolamento, em °C.

Critério de aprovação:

O enrolamento do estator bobinado deve apresentar uma resistência de isolamento de no mínimo 100 MΩ.

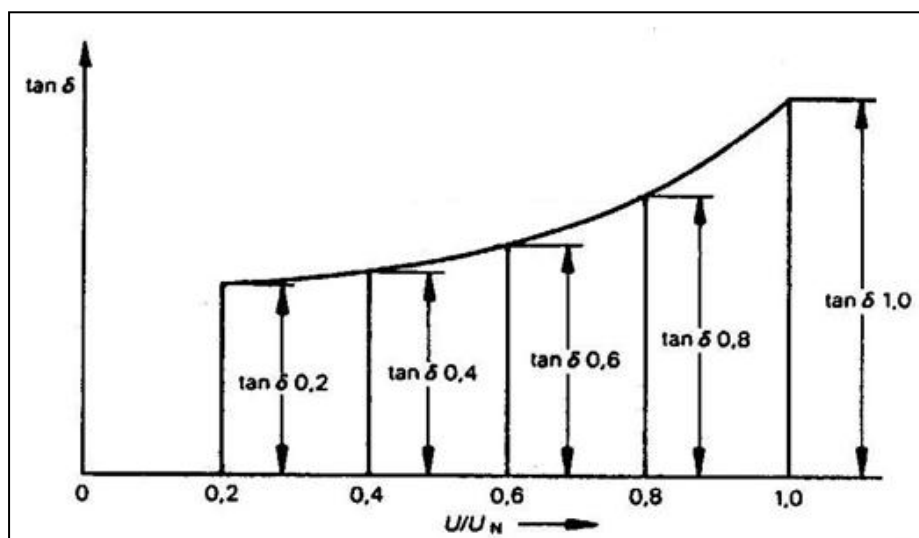
5.3.3 Ensaio de Determinação das Perdas Dieléctricas (Tangente Delta)

A norma de referência para o presente ensaio é a norma IEEE std 286/2000 – *IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*.

O Teste para a Determinação das Perdas Dieléctricas (Tan Delta) só poderá ser realizado no enrolamento do estator bobinado que estiver totalmente limpo, amarrações terminadas, impregnadas e curadas. Para a realização do ensaio o enrolamento do estator bobinado deve ter uma resistência de isolamento de no mínimo 100 MΩ. O ensaio consiste em aplicar na isolação da bobina uma tensão C.A. de 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 % e 120% da tensão nominal do estator bobinado e medir os respectivos valores de “Tan Delta” e “capacitância” com o equipamento Ponte *Schering*. Durante o teste todos os acessórios devem estar devidamente aterrados. A temperatura ambiente e humidade relativa do ar devem ser medidas e registadas. Ao terminar o teste a tensão de ensaio não deve ser interrompida bruscamente, a mesma deve ser reduzida lentamente ao máximo de 1 kV por segundo.

Crêterios de aprova o:

A avalia o das Perdas Dielétricas em enrolamentos de estatores bobinados se da pela forma com que a curvatura da Tan Delta x Tensão Aplicada são projectadas, conforme curva abaixo, ou seja a curva da máquina deve ser similar   apresentada na figura 32.



Fígura 32. Curva esperada para a evolu o de $\tan(\delta)$ versus U/U_N .

5.3.4 Ensaio de Tensão Aplicada AC

A norma de referência para o presente ensaio   a norma IEEE std 286/2000 – “IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation”.

Para a realiza o do ensaio o enrolamento do estator bobinado deve ter uma resistência de isolamento de no mínimo 100 M . O ensaio de Tensão Aplicada consiste em aplicar na isolamento do estator bobinado uma tensão C. A. com equipamento Fonte de Alta Tensão CA – Hi-pot, durante um determinado tempo. Está tensão deve ser suficientemente estável para praticamente não ser afectada por correntes variáveis de fuga e deve ser com frequência compreendida entre 40 e 62 Hz. A aplica o da tensão de teste no estator bobinado sob ensaio deve iniciar com um valor inicial suficientemente baixo, não superior a metade da tensão plena de ensaio, para evitar qualquer efeito de sobre tensão devido a transitórios de manobra. Aumentar a tensão progressivamente até o valor de ensaio, lentamente ao máximo de 1 kV por segundo,

mas não tão devagar que chegue a causar prolongamento desnecessário de solicitações no enrolamento sob ensaio. Ao atingir a tensão máxima de ensaio, manter a tensão de ensaio durante o tempo especificado. Ao terminar o teste a tensão de ensaio não deve ser interrompida bruscamente, a mesma deve ser reduzida lentamente ao máximo de 1 kV por segundo. Durante o teste todos os acessórios devem estar devidamente aterrados. A temperatura ambiente e humidade relativa do ar devem ser medidas e registadas.

Critérios de aprovação:

O valor mínimo de tensão aplicada no enrolamento deve obedecer ao seguinte critério: $U_{ap} = 2 \times U_n + 1000$ durante 01 minuto. Considera-se aprovada a máquina que suportar este nível de tensão.

U_{ap} = Tensão Aplicada, em kV;

U_n = Tensão Nominal do estator Bobinado, em kV.

5.3.5 Ensaio de tensão aplicada DC

Não sendo o isolamento perfeito, haverá fuga de corrente através do material isolante para a terra.

A resistência de isolamento é um factor importante na determinação da situação do isolamento do estator bobinado.

Através do teste de tensão aplicado DC é possível determinar a resistência de isolamento e verificar a resistência do dieléctrico.

A resistência de isolamento é determinada pela divisão do valor de tensão aplicada na bobina pela corrente de fuga medida.

Um estator com bom isolamento tem um valor de resistência de isolamento elevado. O valor de tensão a ser aplicado deve ser menor que o valor da resistência dieléctrica do material. Se o isolamento falhar durante o teste significa que o isolamento está deteriorado, fraco ou frágil.

O teste de tensão aplicada DC controlará a corrente de fuga e quando o valor superar o especificado o teste é finalizado para não danificar o produto.

5.3.6 Ensaio de Teste de Surto (Surge Test comparativo)

A norma de referência para o presente ensaio é a norma IEEE std 5282-2004 – *IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating – Current Electric Machines.*

Um típico estator bobinado é composto pelas fases, cada fase formada por grupos cada grupo formado por bobinas, e por sua vez, cada bobina formada por espiras. A falha no isolamento do estator bobinado começa com um curto-circuito entre espiras e conseqüentemente entre bobinas e entre fases. O teste de surto elétrico pode detectar os estágios iniciais de falhas no isolamento, nomeadamente entre espiras, entre bobinas, entre fases, ligações invertidas, ligações abertas e número de espiras errado.

Para a realização do ensaio o enrolamento do estator bobinado deve ter uma resistência de isolamento de no mínimo 100 M Ω . Utilizando o equipamento de Surge Test e aplicando uma tensão DC, a tensão utilizada no ensaio é gerada por um gerador de impulso, que são descarregados nos terminais do enrolamento do estator bobinado. Ao atingir a tensão máxima de ensaio, manter a tensão somente até o registo e análise da curva, após a tensão de ensaio não deve ser interrompida bruscamente, a mesma deve ser reduzida lentamente ao máximo de 1 kV por segundo. Este ensaio deve ser executado no enrolamento do estator bobinado que estiverem totalmente limpo, amarrações terminadas, impregnadas e curadas. O nível de tensão e o tempo de subida do impulso a ser aplicado são observados na figura 33.

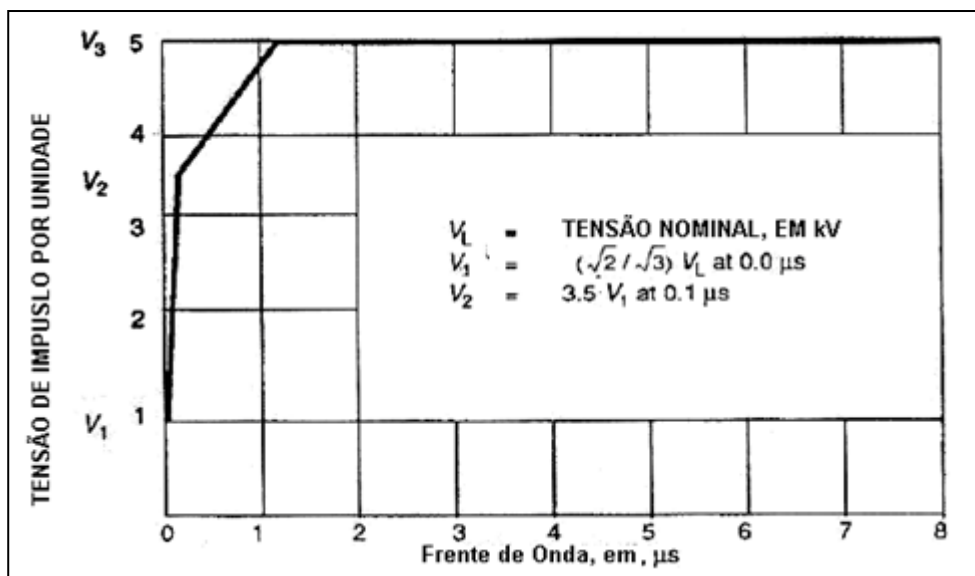


Figura 33. Níveis de tensão para o ensaio

V_L = Tensão Nominal de Linha, em kV;

Critérios de aprovação:

Aplicando-se o nível de tensão $V_2 = 3,5 \times V_1$, conforme figura 25, não havendo diferença nem distúrbios ou oscilações entre as formas de onda das fases sobrepostas, o resultado é considerado satisfatório. Havendo oscilações sobrepostas das fases próximas da crista ou na frente da onda de impulso as mesmas não devem exceder ao limite de 5% do valor de crista determinado. A figura 34 exemplifica a forma de onda padrão, enquanto da figura 35 à figura 43 são apresentados exemplos de formas de onda que apresentam defeitos.

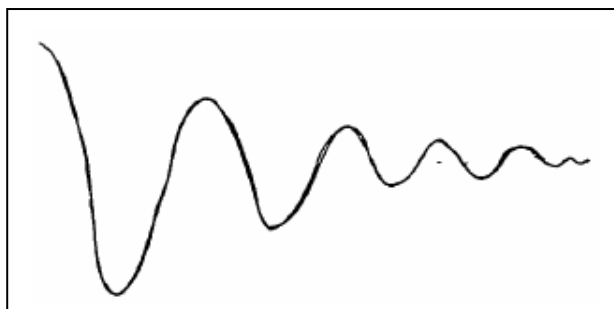


Figura 34. Forma de onda padrão

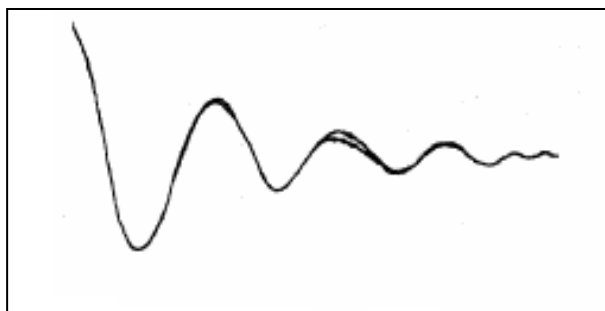


Figura 35. Curto entre espiras

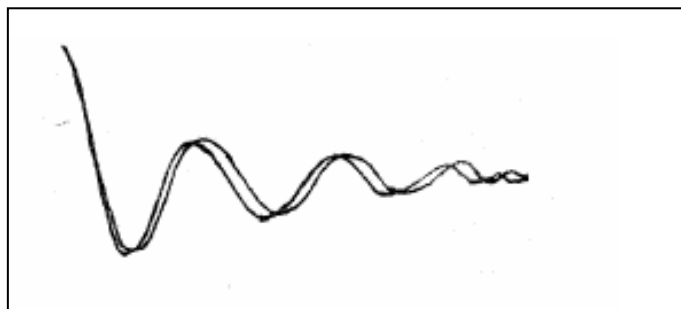


Figura 36. Curto entre bobinas da mesma fase

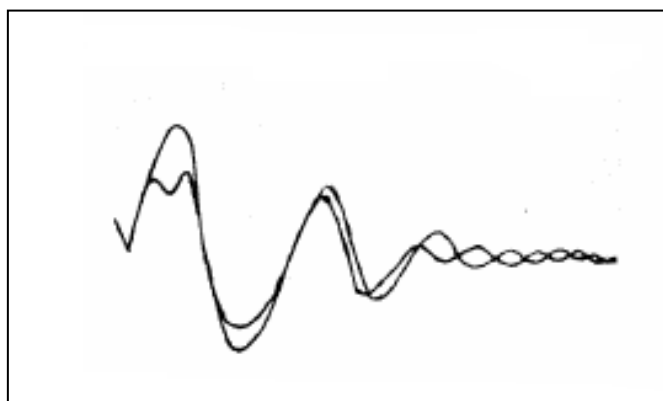


Figura 37. Curto parcial entre fases

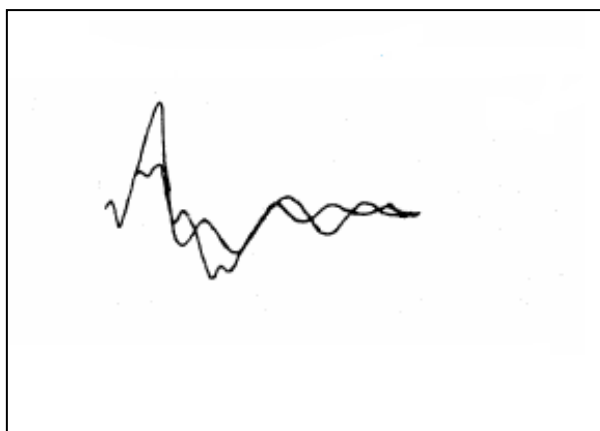


Figura 38. Curto total entre fases

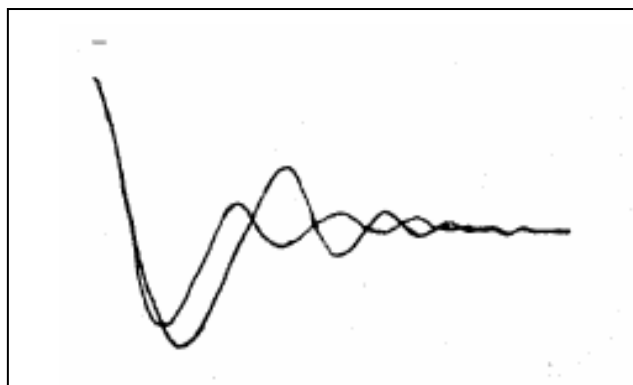


Figura 39. Ligação imprópria da bobina

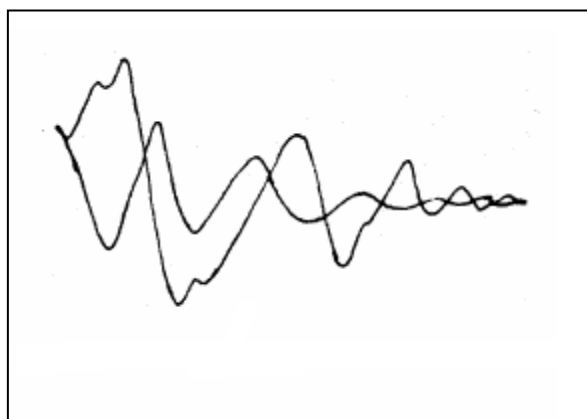


Figura 40. Ligação invertida da bobina

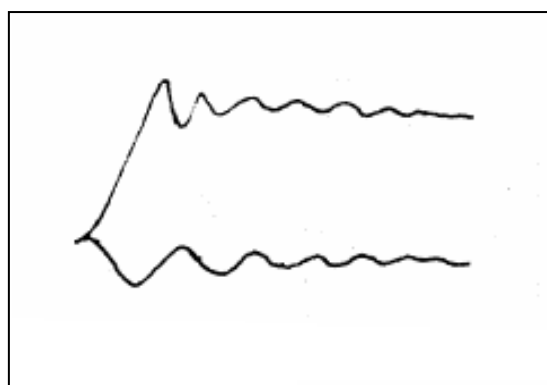


Figura 41. Ligação da bobina aberta

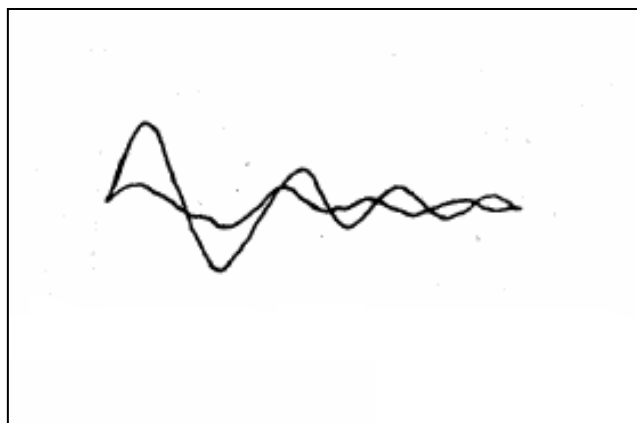


Figura 42. Curto parcial de massa

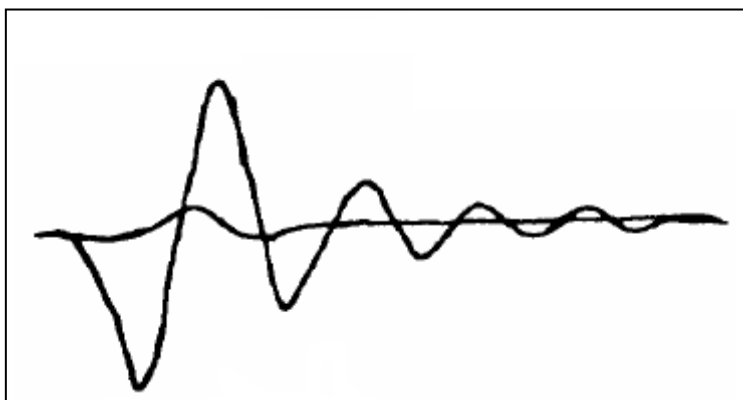


Figura 43. Curto total para a massa

5.3.7 Teste de Verificação Dimensional e Visual

Inspeccionando visualmente a máquina e verificando se a mesma está de acordo com o projecto e ou especificações do cliente e se as características construtivas estão conforme especificado na sua documentação. Os locais da máquina a inspeccionar bem como o respectivo procedimento são especificados na tabela 4.

Característica a inspeccionar	Procedimento
Pacote de Chapas	- Conferir e verificar a existência de respingos de solda, chapas salientes, cantos vivos das ranhuras, comprimento do pacote, qualidade das soldas dos anéis e tirantes.
Estecas – Cunhas - Fibras de Vidro	- Conferir se o material das estecas está correto.

Ligação	- Conferir se as ligações estão corretas, soltas, amarrações, defasagem das saídas dos cabos e forma construtiva.
Amarrações	- Conferir a quantidade de amarrações, distancia entre amarrações e altura das ligações.
Cabeça de Bobina	- Conferir a altura, o diâmetro das cabeças de bobina e a distancia entre bobinas.
Distancia Mínima entre Cabeças de Bobinas e partes Metálicas	- Conferir a distancia mínima entre as cabeças de bobinas e partes metálicas.
Cabos de Ligação	- Verificar qualidade do cabo, bitola, classe de isolamento, comprimento e aplicação.
RTD's	- Verificar a aplicação, continuidade, resistência, quantidade, comprimento, isolamento dos cabos e posicionamento nas fases.

Tabela 4. Verificação Dimensional e Visual

5.3.8 Ensaio de Descargas Parciais

O ensaio de descargas parciais descrito de seguida utiliza como referência o esquema exemplificado na figura 44.

- ✓ Separar as fases do estator, abrir o ponto de estrela (ponto neutro);
- ✓ Ligar o condensador de acoplamento e Hipot entre a fase a ser testada e o aterramento;
- ✓ Aterrar as outras fases da máquina;
- ✓ Aplicar tensão entre e o aterramento variando em passos de 20% até à tensão nominal;
- ✓ Registrar os valores obtidos, lendo os mesmo no visor do detector de descargas parciais, conforme a figura 45.
- ✓ Repetir o teste nas restantes fases;

De notar, que, na impossibilidade de separar as fases, quando o enrolamento é com neutro interno, o teste deve ser executado com as três fases curto-circuitadas.

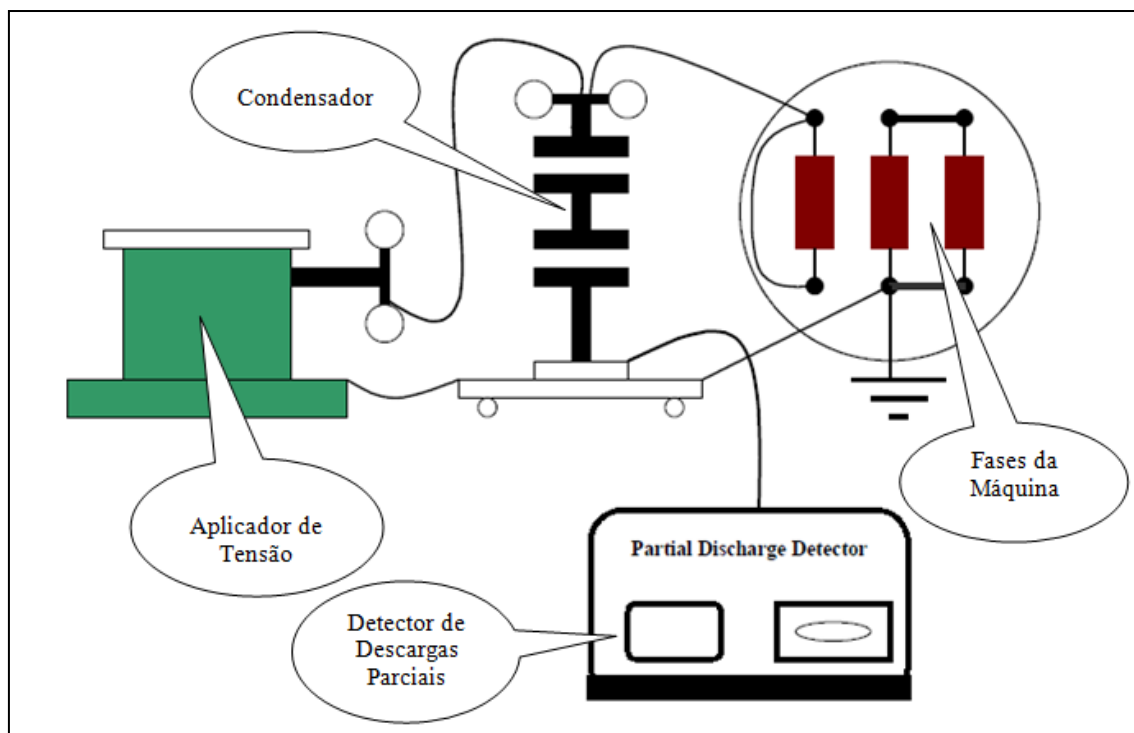


Figura 44. Circuito de teste *Lay-Out*



Figura 45. Detector de descargas parciais

Seguidamente, a título de exemplo, são fornecidos resultados de um ensaio de descargas

parciais, realizado para uma máquina com as seguintes características:

$$P = 8000 \text{ HP}, V = 426 \text{ rpm}, U = 11000\text{V}, f = 50 \text{ Hz}$$

Tensão (V)	Fase 1-4 (pC)	Fase 2-5 (pC)	Fase 3-6 (pC)
4000	2800	2350	3100
5000	3600	3900	4500
6000	4300	4600	4700
7000	6500	5140	5000
8000	7600	6160	6100
9000	10400	9500	8150
10000	11700	11200	10400
11000	14800	12000	11100
Tensão Inicial		3300	
Tensão na qual a descarga se extinguiu		3800	

Tabela 5. Valores obtidos para as três fases

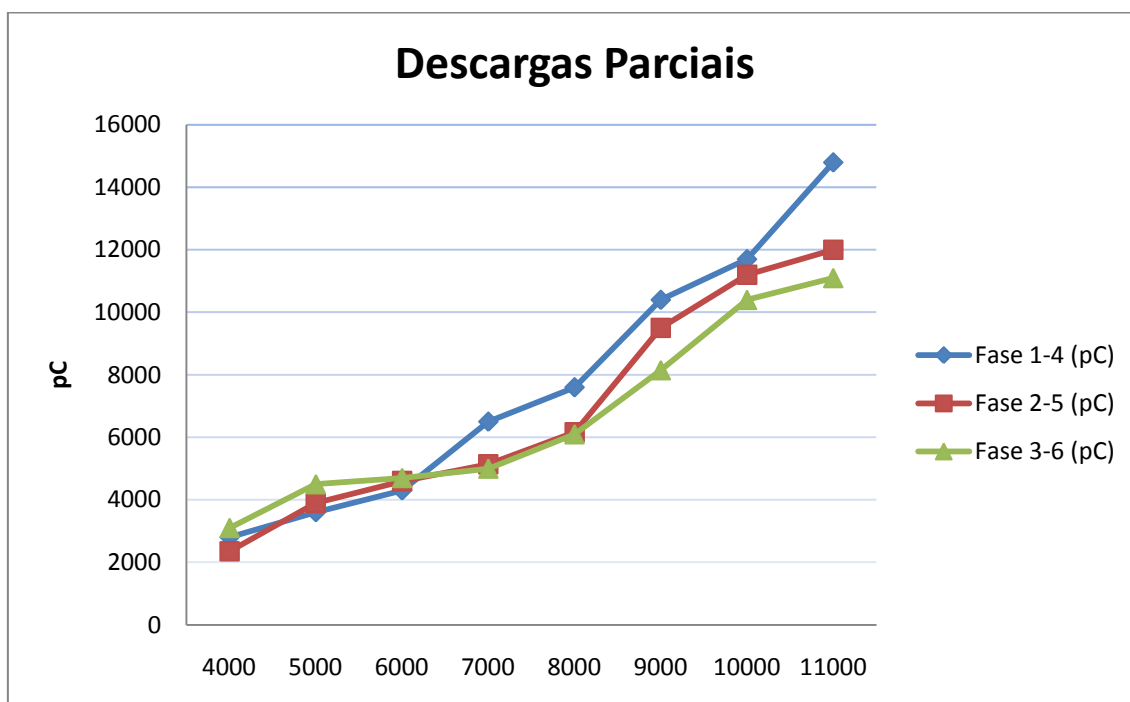


Gráfico 2. Gráfico construído com os valores da tabela 5

5.3.9 Teste do protector térmico

Os protectores térmicos podem ser testados através da medição de resistência, verificação de continuidade e verificação do isolamento em relação ao enrolamento.

5.3.10 Teste do sentido de rotação

Verificar o sentido de rotação é necessário para que se possam identificar erros de ligação antes do processo de impregnação.

Para identificar o sentido de rotação utiliza-se u rotor alternativo ou sensor de “efeito hall”, os quais se movem para dentro do estator durante o teste.

O equipamento realiza a ligação da máquina, alimenta a mesma com um valor de tensão reduzido e quando energizado definirá qual o sentido que o mesmo irá girar.

Em suma, a implementação de todos os testes descritos é necessária e fundamental para garantir a qualidade do produto. No entanto, são necessárias avaliações na implementação dos mesmos sobre os seguintes pontos: definições de tolerâncias e limites admissíveis para o produto, funcionalidade dos mesmos na linha de fabrico, segurança do operador, análise da aplicação com intuito de evitar possíveis danos no produto.

5.4 Isolamento entre espiras de bobinas estatóricas

O isolamento de bobinas de múltiplas espiras é um sistema que contém diferentes elementos constituintes, cada um com uma função bem definida, nomeadamente:

- ✓ Isolamento principal: Isola os condutores de cobre do núcleo aterrado. Normalmente específica 2,5 kV/mm para o cálculo da espessura de isolamento. O teste de tensão aplicado é indicado para testar o isolamento, ao nível $(2U_n + 1)kV$ [16];
- ✓ Isolamento do fio: Isola electricamente um condutor do condutor vizinho. Evita o das perdas RI^2 devido ao aumento da resistência ohmica em corrente alternada evitando o efeito skin nos condutores. Normalmente é especificado o ensaio de 250 V entre fios para testar o seu isolamento [16];

- ✓ Isolamento entre espiras: Isola electricamente uma espira de outra espira adjacente. O ensaio para o isolamento entre espiras deverá ser realizado em função das sobretensões a que o enrolamento fica sujeito [16].

A função do isolamento entre espiras de bobinas é prevenir a ocorrência de curto-circuitos. Se ocorrer uma falha na bobina, a espira em curto comporta-se como o enrolamento secundário de um autotransformador [16]

Para uma melhor percepção deste tipo de problemas considere-mos oitenta espiras ligadas em serie para formar o enrolamento de uma fase. Admitindo que uma das espiras entra em curto-circuito num determinado momento, a corrente que fluirá por esta espira será oitenta vezes a corrente que antes circulava na fase, conforme a relação abaixo:

$$n_f \times I_f = n_e \times I_e$$

- ✓ n_f – Número de espiras de um circuito da fase
- ✓ n_e – Número de espiras em curto – circuito
- ✓ I_f – Corrente de um circuito da fase
- ✓ I_e – Corrente na espira em curto – circuito

Esta corrente de curto-circuito provoca aquecimento excessivo de forma muito rápida e localizada, queimando o isolamento entre espiras e em seguida o isolamento principal, evoluindo para um curto-circuito fase-terra. Caso não hajam meios externos que limitem esta corrente para valores proximos a 10 A, a corrente de curto-circuito fará com que o cobre evapore e espalhe o metal por todo o gerador pelo efeito da ventilação [16].

O aterramento adequado do neutro limita a corrente pelo curto-circuito fase-terra, caso contrario, no ponto do curto-circuito o núcleo do estator também ficará sujeito a esta corrente e poderá levar as chapas constiuintes a entrarem em curto-circuito pela fusão do aço silicio. A distribuição de tensão de uma fase do gerador de 13800 V pelas 80 espiras do exemplo anterior ocorre proporcionalmente. A tensão fase-neutro, sendo de 7967,4 V, a partição da tensão será de 99,5 V entre uma espira e a espira adjacente. Esta consideração simplificada é feita, porque na realiadade, se pode considerar cada bobina como uma impedância de um divisor de tensão, dada por:

$$XL = 2 \times \pi \times f \times L$$

Onde:

$XL =$ Impedância da bobina

$f =$ Frequência da rede

$L =$ Indutância da bobina

A suportabilidade do isolamento de geradores é estabelecida nas normas IEEE 522 2 IEC 60034 parte 15, onde são expressos os valores de tensão utilizados nos ensaios de impulso de bobinas de múltiplas espiras. Ambas as normas estabelecem uma envoltória para as formas de onda de tensão que devem ser aplicadas no enrolamento através de um gerador de impulso de tensão. O ensaio de tensão aplicada convencional, utilizando a frequência industrial de 60 Hz, exige suportabilidade apenas do isolamento principal e não serve, portanto, para verificar a existência de curto-circuitos entre espiras.

A envoltória proposta pela norma IEEE 522 estabelece os parâmetros da tabela 6.

Tempo de frente da onda em microssegundos	Valor de crista da tensão de impulso onde U_n é a tensão fase-fase do gerador
$t_0 = 0$	$U_0 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_n$
$t_0 = 0,1$	$U_0 = 3,5 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_n$
$t_0 = 1,2$	$U_0 = 5 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_n$

Tabela 6. Envoltórias padronizadas da norma IEEE-522.

Alternativamente, caso haja acordo entre fabricantes e o cliente, poderá ser utilizada a envoltória da tabela 7.

Tempo de frente da onda em microssegundos	Valor de crista da tensão de impulso onde U_n é a tensão fase-fase do gerador
$t_0 = 0$	$U_0 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_n$

$t_0 = 0,1$	$U_0 = 2,0 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_n$
$t_0 = 5,0$	$U_0 = 1,25 \times \sqrt{2} \times (2 \times U_n + 1)$

Tabela 7. Envoltórias padronizadas da norma IEEE-522

Já a norma IEC 60034-15, propões os parametros como segue na tabela 8.

Tempo de frente da onda em microsegundos	Valor de crista da tensão de impulso onde U_n é a tensão fase-fase do gerador
$t_0 = 0,2$	$U_0 = 0,65 \times (4 \times U_n + 5)$
$t_0 = 1,2$	$U_0 = 4 \times U_n + 5$

Tabela 8. Envoltórias padronizadas da Norma IEC 60034 - parte 15

Considerando bobinas para um gerador de tensão nominal de 13,8 kV, é possível observar que as envoltórias propostas por ambas as normas citadas diferem um pouco. A norma IEC 60034-15 é mais exigente que a norma IEEE 522, embora as formas do impulso sejam muito semelhantes. O facto é que ambas as normas propõe valores reduzidos para aplicação do impulso com frente de onda em torno de 0,2 microsegundos, em função da repartição da tensão não ser uniforme para frentes de ondas rápidas.

Outro facto importante é a ligação à terra do neutro do gerador. Para prevenir o dano extenso no núcleo do estator caso ocorra falha, o estudo da ligação à terra do gerador deverá levar em consideração a capacidade térmica do núcleo, que na prática pode ser dada por:

$$t < 10 \times \left(\frac{20}{I_f}\right)^2$$

Onde:

t

= Tempo máximo que a proporção deve actuar para eliminar a falta, em segundos.

I_f = Corrente de falta em Ampéres.

Por exemplo, uma corrente de curto-circuito fase-terra, limitada no neutro por uma resistência ou transformador com resistência no secundário, em 10 Ampéres,

poderá circular pelo núcleo por 40 segundos sem provocar danos. Por outro lado, uma corrente de 100 Amperes, deverá ser eliminada em 0,4 segundos.

Em suma, é de extrema importância a implementação do ensaio de curto-circuito entre espiras no processo produtivo de bobinas de múltiplas espiras. Embora os dados da placa possam indicar que o gerador foi construído em concordância com a norma IEC, só poderá ser aceite se os ensaios estabelecidos por esta norma tenham sido realizados e o gerador aprovado. Este ensaio deve ser considerado de rotina, pois a sua execução visa medir a qualidade dos materiais e a eficácia do processo produtivo inclusive a montagem do enrolamento.

6. Méritos do sistema de Isolação classe H

A necessidade de classes térmicas de isolação elevadas é suportada pelo dramático aumento de geração/utilização de energia móvel, tendo estes sistemas que ser leves e compactos. Outro aspecto importante é o facto de cada vez mais se utilizarem variadores de velocidade e tecnologias de ímanes permanentes. De salientar que a capacidade de operação a elevadas temperaturas é essencial, mas sem comprometer a vida da máquina [12].

No passado, a transição da classe de isolação B para a classe F, foi bem aceite pela indústria, já que esta transição não implicou um aumento nos custos do produto final [12].

Actualmente, os materiais de isolação disponíveis, farão a transição para a operação a elevadas temperaturas a custo efectivo, com a mesma robustez da classe F [12].

Tem que haver um significativo progresso no desenvolvimento de novos materiais de isolação para suprir as necessidades de design das máquinas modernas.

Actualmente, não existem normas industriais definidas para certificar ou aprovar o novo sistema de isolação para AT. São realizados um serie de testes de envelhecimento, que necessitam de ser aprofundados para serem bem reconhecidos no mercado [12].

Há dados definidos sobre materiais isolantes e resinas que se qualificam para 180°C. De todos esses materiais, é geralmente aceite que a resina de isolamento e técnicas de supressão do efeito coroa, são os principais desafios a superar na fase de qualificação de

sistemas de Isolação classe B. As fitas de mica utilizadas em equipamentos AT têm que resistir à elevada temperatura e suprir o efeito coroa. De seguida, são definidos um conjunto de procedimentos que permitem avaliar um sistema de isolação.

7. Validação de um Sistema de Isolação

No presente ponto são apresentados normas internacionais que servirão de referência para elaboração de um método/procedimento de teste validação de sistemas de isolamento. É importante referir que a avaliação de um sistema de isolamento é um tema complexo e não linear, no entanto, estas normas são internacionalmente respeitadas e largamente utilizadas neste tipo de avaliação.

Nos pontos 7.1 e 7.2 são apresentadas normas padrão para avaliação térmica de sistemas de isolamento para máquinas rotativas.

7.1. Avaliação térmica de sistemas de isolação para Máquinas Rotativas – Normas padrão IEC e IEEE

Nas figuras 46 e 47 são apresentadas as normas IEC e IEEE que servem de base para avaliação térmica de sistemas de isolamento para máquinas eléctricas rotativas.

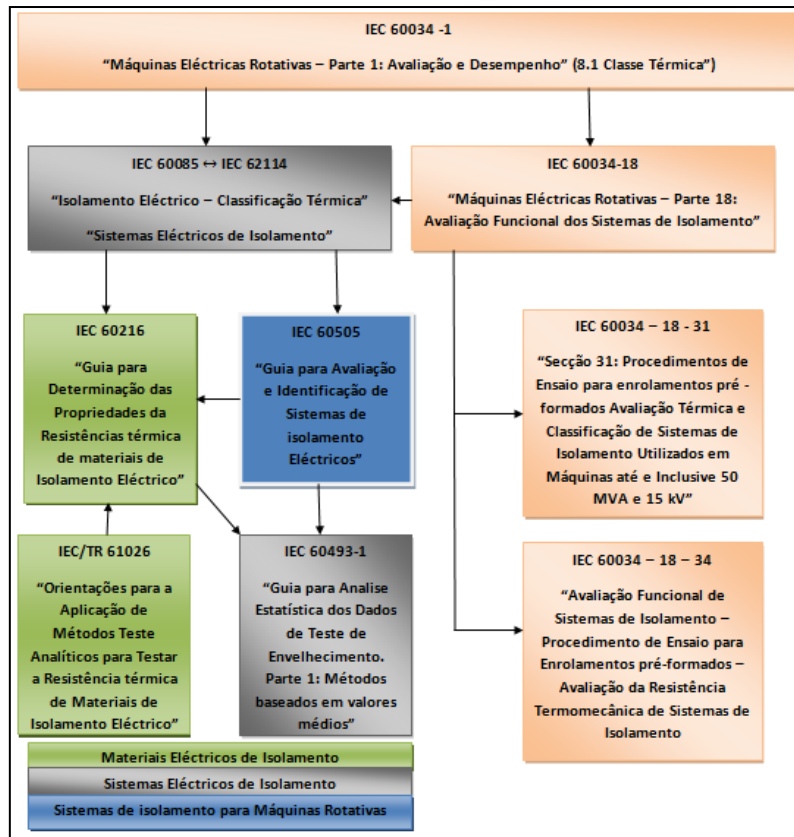


Figura 46. Normas de Referência IEC

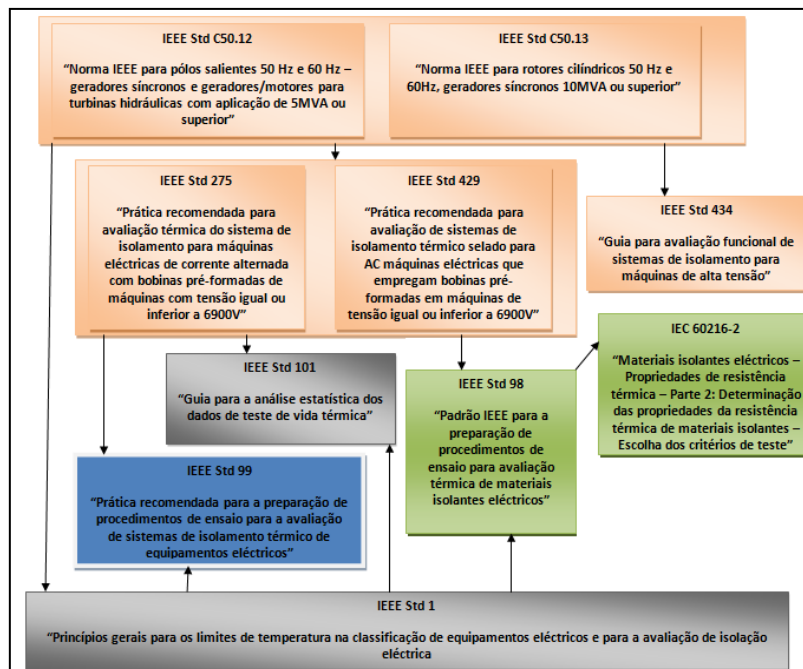


Figura 47. Normas de Referência IEEE

Seguidamente são apresentadas um conjunto de normas utilizadas para avaliação de sistemas de isolamento, que servirão de referência para elaboração de um procedimento de teste.

7.2. Norma IEEE – 1776

A norma IEEE – 1776, intitulada de “Prática recomendada para avaliação térmica de sistemas de isolamento, selados ou não para máquinas eléctricas de corrente alternada que usem bobinas pré-formadas e isoladas para tensão nominal de 15KV ou inferior”, define procedimentos de teste para comparar dois ou mais sistemas de isolamento, de acordo com a sua vida útil esperada à temperatura nominal, a operar em condições severas de humidade, no caso de sistemas selados e em condições normais para sistemas não selados. A finalidade é, assim, classificar sistemas de isolamento, de acordo com a sua capacidade térmica, por meio de testes. O teste realizado é descrito de seguida e consiste de sucessivas exposições à temperatura com o intuito de simular de forma acelerada, o efeito da operação por um longo período. A falha de qualquer um dos componentes de isolamento caracteriza a falha do sistema do sistema como um todo, definindo o final de vida da isolamento.

Resumo do Procedimento descrito pela norma IEEE – 1776

“Prática recomendada para avaliação térmica de sistemas de isolamento, selados ou não, para máquinas eléctricas de corrente alternada que usem bobinas de estator pré-formadas e isoladas para tensão nominal de 15kV ou inferior”.

Testes individuais dos materiais isolantes IEEE – 98

Teste de validação

Stress Mecânico
Humidificação
Tensão Aplicada
Aquecimento $\geq 300^{\circ}\text{C}$ por 48h

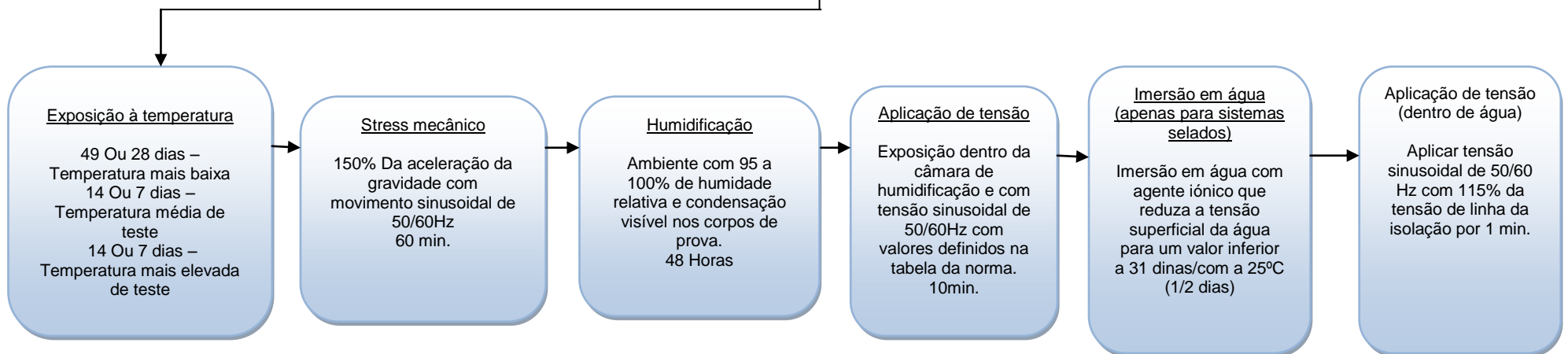
Pré-Testes (Testes de diagnóstico)

Stress Mecânico
Humidificação
Tensão Aplicada
(49h +Preparação ≈ 3 dias)

Realizados 10 ciclos a 3 temperaturas diferentes durante 543 ou 333, 193 ou 123 e 93 ou 73 dias respectivamente

Início da ciclagem

É considerado falha se, nos testes de tensão, a corrente ultrapassar 200mA fase-fase e/ou 30mA entre fios.



7.3. Norma IEEE - 1310

A norma IEEE – 1310, “Prática recomendada para teste de ciclagem térmica de barras e bobinas pré-formadas para grandes geradores”, apresenta como escopo, simular, de forma acelerada a condição de operação das barras ou bobinas sujeitas a rápidas transições de temperatura quando em operação, em máquinas de tensão nominal de 11kV ou superior e com frequência de 50 ou 60 Hz. Os corpos de prova não podem ser usados posteriormente no enrolamento das máquinas, pois se trata de um teste que produz envelhecimento na isolação.

A avaliação de resultados, consiste em avaliar os dados dos testes de diagnóstico realizados após a ciclagem e no decorrer desta, e/ou compara-los com resultados do mesmo sistema de isolação já previamente testado.

Os testes devem ser realizados nas barras/bobinas com estas contendo todas as fitas e materiais isolantes que teriam se fossem empregues numa máquina, no entanto, devem ser excluídos materiais condutivos, semi-condutivos bem como, materiais à base de borracha.

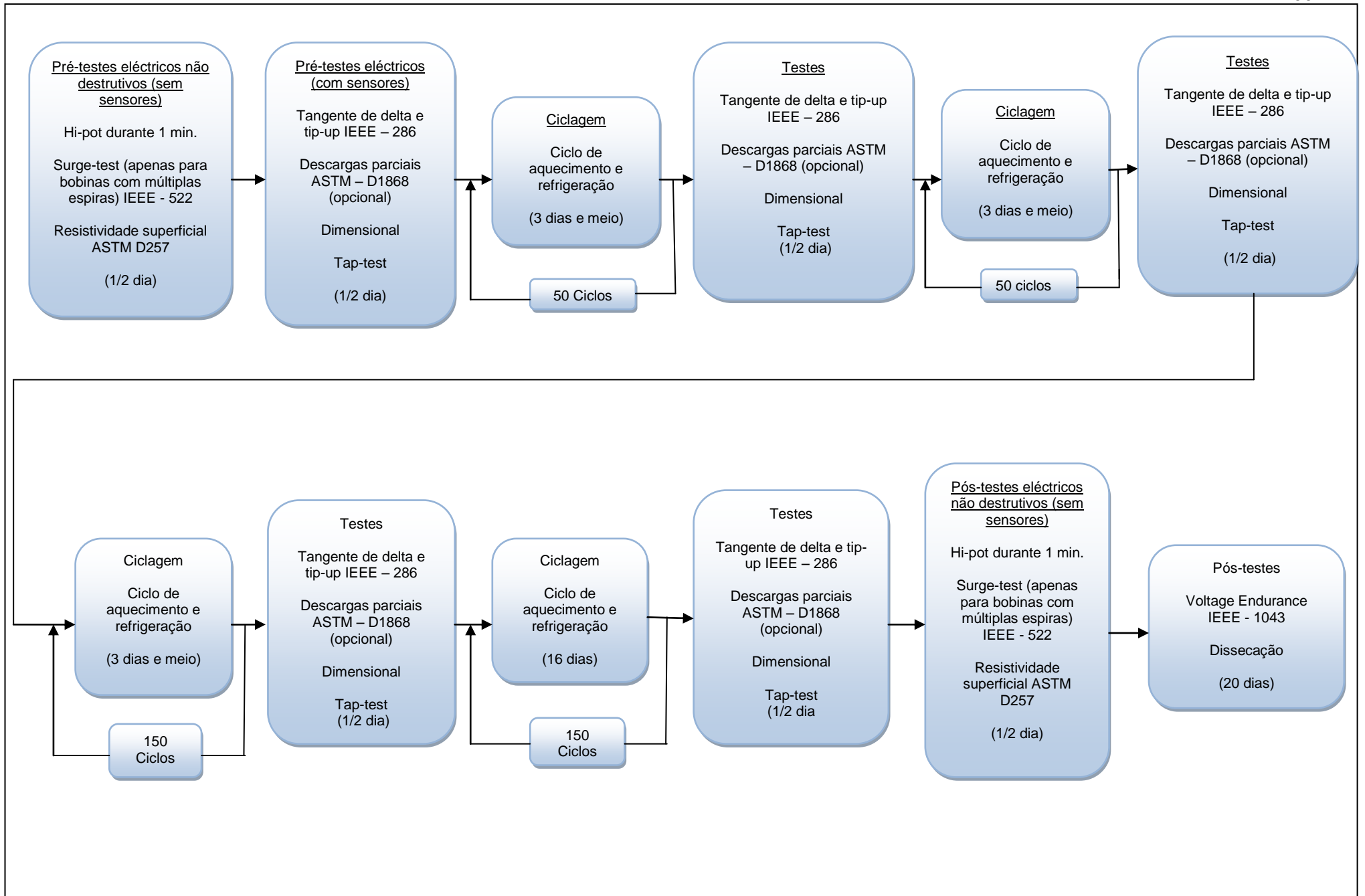
O aquecimento dos corpos de prova é realizado através da circulação de corrente alternada ou contínua com estes conectados em série. Quanto à refrigeração, dá-se pela passagem forçada de ar em sentido perpendicular à superfície da parte recta dos corpos de prova.

Os corpos de prova devem ser submetidos a 500 ciclos sendo o ponto extremo de aquecimento e de arrefecimento é um factor a controlar, devendo o ciclo prever a inversão imediata da temperatura quando este for atingido. O limite inferior de temperatura é de 40°C e o superior é definido em função da temperatura da classe de isolação do enrolamento, como se pode observar na tabela 9.

Classe do sistema de isolamento	Temperatura mínima °C	Temperatura máxima °C	Duração nominal min.	Duração máxima min.	Duração mínima min.
Classe F (155°C)	40	155	92	153	66
Classe H (180°C)	40	180	112	187	80

Tabela 9. Ciclo de temperatura da norma IEEE -1310

Os ciclos de teste são descritos de seguida.



7.4. Normas IEEE -1043 e IEEE - 1553

A norma IEEE – 1043, intitulada “Prática recomendada para teste de envelhecimento por tensão de bobinas e barras pré-formadas”, ou também muito conhecido por “*Voltage Endurance*”, tem como finalidade definir um teste de envelhecimento por tensão, aplicável a barras e bobinas para máquinas eléctricas de tensão nominal até 30kV. Os corpos de prova devem ser representativos das barras/bobinas usadas na máquina, devendo conter a isolação completa e o *grading* que a máquina terá.

No início do teste devem ser definidos a temperatura, a tensão, a frequência, tempo mínimo, manutenção das camadas condutiva e semicondutiva, pré e pós-testes de diagnóstico, numero, comprimento e disposição das amostras em que ocorreu falha, bem como o tratamento das falhas ocorridas na região do *grading*, que devem ser previamente definidos e discutidos entre o cliente e o laboratório de teste.

Quanto à análise de resultados, o tempo no qual ocorreu a falha é definido como resultado do teste. Convém realizar o teste com vários valores de tensão, para que assim se possa extrapolar os resultados para obter uma estimativa de vida da isolação.

As barras/bobinas devem ser testadas inteiras e com a parte imersa no núcleo até 2500mm. Caso possuam dimensões superiores devem ser testadas todas as partes constituintes, inclusive as partes que ficam de fora da ranhura.

De referir que o equipamento de teste deve ser calibrado para minimizar variações e os registos devem ser mantidos para equipamentos relevantes. Quando este teste é realizado, devem ser respeitados todos os parâmetros do equipamento de teste, nomeadamente, a fonte, a protecção, a medição e o controlo de temperatura. No entanto, apenas é de interessa para a presente dissertação apresentar os testes eléctricos e compreender os resultados obtidos.

A norma IEEE – 1553, “Norma de uso experimental para teste de envelhecimento por tensão de bobinas pré-formadas e barras para hidrogeradores”, é aplicável a ao teste de envelhecimento por tensão de bobinas pré-formadas e barras cuja isolação é baseada em mica com resinas à base de poliéster e epóxi, usadas em hidrogeradores e geradores para bombas de armazenamento que operam em ambiente exposto ao ar, com tensão nominal de 2 a 22kV e frequência de 50/60Hz.

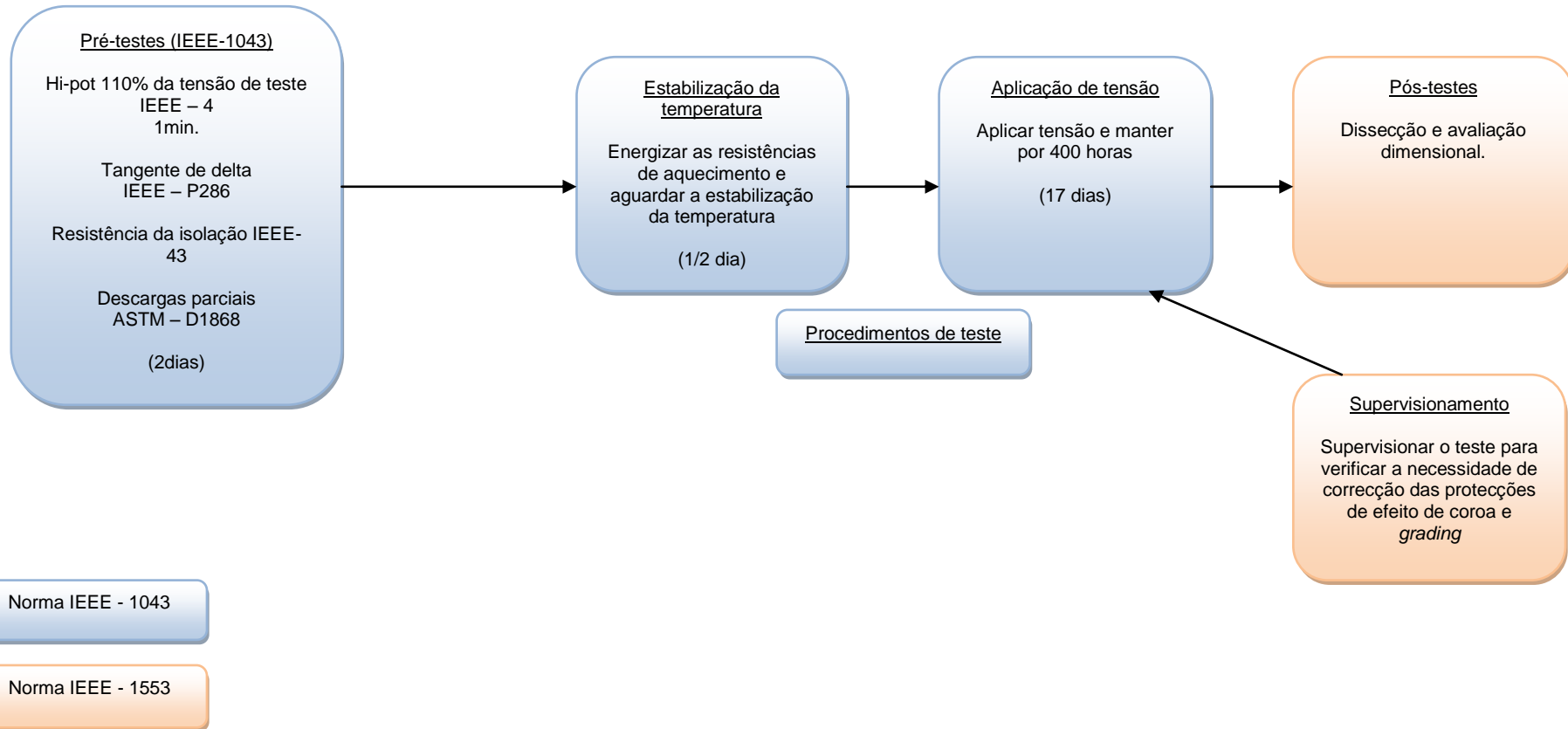
É realizado de seguida um resumo das duas normas anteriores no mesmo diagrama, porque o procedimento de teste vigente na norma IEEE – 1553 é realizado conforme descrito na norma IEEE – 1043, com a mesma interpretação de resultados quanto à degradação e possíveis falhas na região do *grading*.

A amostra mínima é de 4 barras (2 superiores e 2 inferiores) ou 2 bobinas, mas não mais que 1% do total de barras ou bobinas do estator. A temperatura de teste deve ser superior que a temperatura do enrolamento medida por um sensor instalado entre camadas superior e inferior do enrolamento.

Relativamente à análise de resultados a norma define os seguintes resultados:

- ✓ Se todas as amostras suportarem o tempo mínimo de teste, todo o lote é considerado aprovado;
- ✓ Se pelo menos 26% das amostras falharem entre 50% a 100% do tempo de teste, duas barras ou uma bobina adicional devem ser testadas;
- ✓ Se seis barras ou três bobinas, já forma inicialmente testadas, os testes adicionais não são necessários;
- ✓ Se alguma falha ocorrer durante o novo teste, todo o lote é rejeitado e as acções correctivas devem ser determinadas após a dissecação das amostras e discussão com o cliente e fabricante;
- ✓ Quando uma ou mais falhas ocorrem antes de 50% do tempo de teste, dissecação e avaliação microscópica da isolação devem ser realizadas. Acções correctivas devem ser determinadas.

De seguida é apresentado o resumo do procedimento de teste das normas IEEE – 1043 e IEEE – 1553.



7.4.1 Procedimento para Testes da Isolação em Bobinas Sobressalentes utilizadas no Teste de Voltage Endurance

De seguida é apresentada a sequência de testes realizados em bobinas sobressalentes utilizadas no teste de Voltage Endurance. De salientar que estes testes já foram apresentados no capítulo 6.5, no entanto, referentes a estatores bobinados. Na verdade, os procedimentos são idênticos, no entanto com os procedimentos de seguida apresentados é possível uma melhor percepção já que se apresentam exemplos esquemáticos da bobina sobressalente.

7.4.2 Ensaio de Resistência de Isolamento (antes do ensaio de tensão aplicada)

Normas de Referência: IEEE Std 43

A medição da resistência da isolação da bobina sobressalente será feita durante a aplicação de uma determinada tensão DC na bobina em teste com o equipamento Megôhmetro. A primeira leitura da isolação será feita a 60 segundos após ter iniciado a medição. Na bobina sobressalente são realizadas duas medições separadas da resistência da isolação, Lado 01 e Lado 02 conforme figura 24.

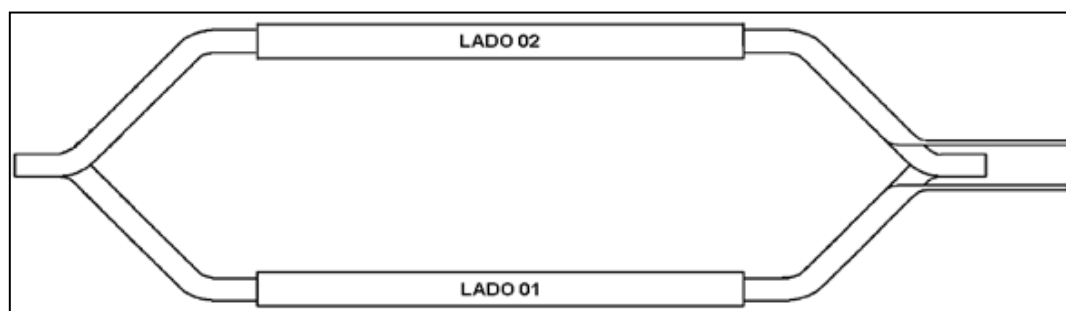


Figura 48. Bobina moldada

A temperatura ambiente e humidade relativa do ar devem ser medidas e registadas. A tensão do instrumento será seleccionada de acordo com a tensão nominal da máquina conforme tabela 10.

Tensão Nominal (V)	Tensão de teste DC
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000

>12000	5000-10000
--------	------------

Tabela 10. Tensão de teste aplicada

Após aquisição das grandezas eléctricas, estas devem ser convertidas à temperatura de referência 40°C conforme a seguinte expressão:

$$R_{t40^{\circ}\text{C}} = R_t \times K_{t40^{\circ}\text{C}} \quad K_T = (0,5)^{(40 - T)/10}$$

Onde:

$R_{t40^{\circ}\text{C}}$ = Resistência do Isolamento a 40°C, em MΩ;

R_t = Resistência do Isolamento na temperatura t, em MΩ;

$K_{t40^{\circ}\text{C}}$ = Coeficiente de Correção para a Temperatura do Enrolamento, em °C.

Critério para a Aprovação do Produto:

A bobina sobressalente deve ter uma Resistência de Isolamento de no Mínimo Especificado em (MΩ) = Tensão Nominal (kV) + 1.

7.4.3 Determinação das Perdas Dielétricas (Tan Delta – Teste de Rotina)

Este procedimento prescreve o método de ensaio para a Determinação do Factor de Perdas Dielétricas (Tan Delta) em bobinas sobressalentes de máquinas eléctricas. O ensaio consiste em aplicar na isolação da bobina uma tensão C.A. de 20 %, 40 %, 60 %, 80 % e 100 % da tensão nominal da bobina e medir os respectivos valores de “Tan Delta” e “capacitância” com o equipamento de Tangente Delta. Para a realização do ensaio a bobina sobressalente deve ter uma Resistência de Isolamento de no Mínimo Especificado em (MΩ) = Tensão Nominal (kV) + 1. Na bobina sobressalente são realizadas duas medições separadas para a Determinação do Factor de Perdas Dielétricas (Tan Delta), Lado 01 e Lado 02 conforme figura 24.

A temperatura ambiente e humidade relativa do ar devem ser medidas e registadas. Ao terminar o teste a tensão de ensaio não deve ser interrompida bruscamente, a mesma deve ser reduzida lentamente ao máximo de 1 kV por segundo.

A formação da amostra para o ensaio e os critérios para aceitação ou rejeição, são dados a seguir:

- ✓ Amostra inicial deve ser de 02 bobinas sobressalentes;
- ✓ Na bobina sobressalente, devem ser confeccionados dois anéis de guarda condutivos em ambos os lados (parte recta) da bobina sobressalente que devem ser aplicados de forma a proporcionar um íntimo contacto ao redor da superfície da bobina. Os anéis de guarda devem ser posicionados bem próximos do eléctrodo de medição (parte recta da bobina), porém não pode haver contacto eléctrico entre eles conforme figura 50.

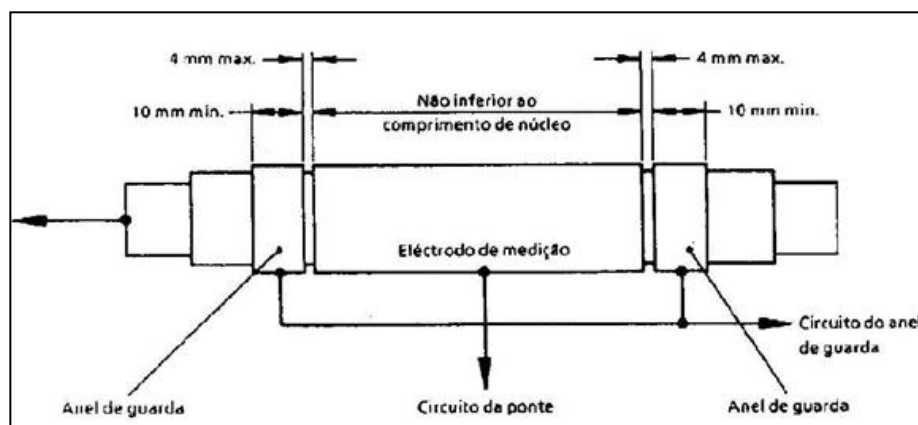


Figura 49. Disposição do Eletrodo de Medição e Anéis de Guarda

Critério para a Aprovação do Produto:

Parâmetros de Avaliação a 20°C	i) $\tan(\delta)_{0,2}$	ii) $\frac{1}{2} * [\tan(\delta)_{0,6} - \tan(\delta)_{0,2}]$	iii) máx. $[\Delta \tan(\delta)]$
Máximo Admissível:	3,00%	0,25% ^{+0,05%}	0,50% ^{+0,10%}

Tabela 11. Critérios para aprovação do produto

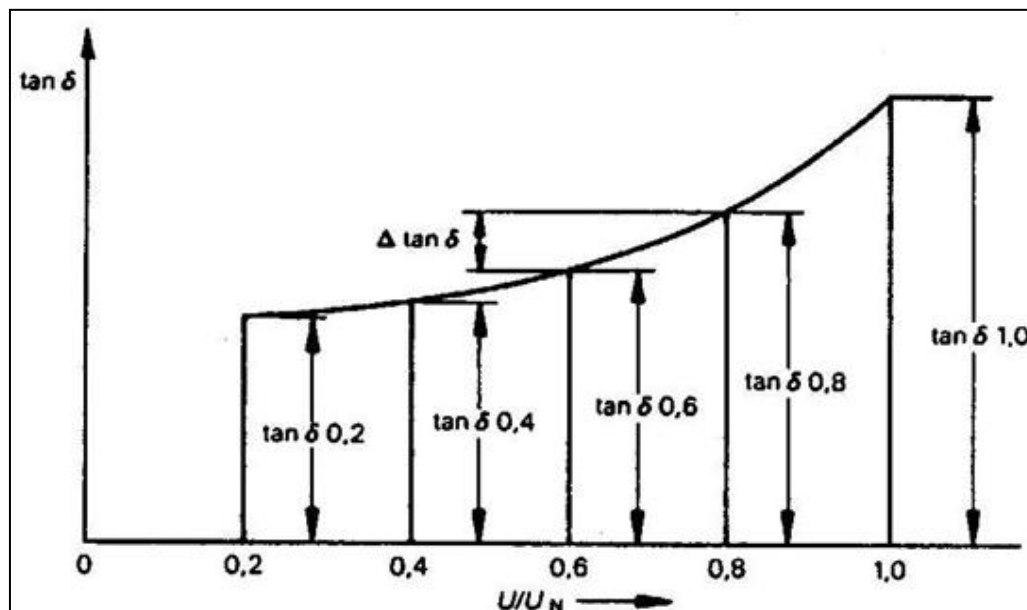


Figura 50. Curva esperada para evolução de $\tan(\delta)$ versus U/U_N

Considerações:

Para um sistema de isolamento conhecido, tomando como base os critérios de aceitação – $\tan(\delta) 0,2$ e $\Delta \tan(\delta)$ –, pode-se estabelecer as seguintes propriedades:

- ✓ Baixos valores para $\tan(\delta) 0,2$ – inferiores a 3% – indicam um elevado grau de polimerização da resina, ou seja, indicam que a resina está adequadamente curada. Já valores elevados para $\tan(\delta) 0,2$ – superiores a 3% – indicam que a resina foi insuficientemente curada.
- ✓ A amplitude da variação dos valores de tangente de delta por intervalo de $0,2 U_N$ – $\Delta \tan(\delta)$ – fornece indicações sobre a presença de espaços vazios, não preenchidos correctamente pela resina, no interior do isolamento.

7.4.4 Ensaio de tensão aplicada

O ensaio de Tensão Aplicada consiste em aplicar na isolação da bobina uma tensão C. A. com equipamento Fonte de Alta Tensão CA – Hi-pot, durante um determinado tempo. Esta tensão deve ser sinusoidal com ambos os semi-ciclos praticamente iguais e deve ter uma relação entre os valores de crista e eficaz igual à $\sqrt{2} \pm 5\%$. Esta tensão deve

ser suficientemente estável para praticamente não ser afectada por correntes variáveis de fuga e deve ser com frequência compreendida entre 40 e 62 Hz. A aplicação da tensão de teste na bobina sobressalente sob ensaio deve iniciar com um valor inicial suficientemente baixo, não superior a metade da tensão plena de ensaio, para evitar qualquer efeito de sobre tensão devido a transitórios de manobra. Aumentar a tensão progressivamente até o valor de ensaio, lentamente ao máximo de 1 kV por segundo, mas não tão devagar que chegue a causar prolongamento desnecessário de solicitações no enrolamento sob ensaio. Ao atingir a tensão máxima de ensaio, manter a tensão de ensaio durante o tempo especificado. Ao terminar o teste a tensão de ensaio não deve ser interrompida bruscamente a mesma deve ser reduzida lentamente ao máximo de 1 kV por segundo. Para a realização do ensaio a bobina sobressalente deve ter uma Resistência de Isolamento de no Mínimo Especificado em $(M\Omega) = \text{Tensão Nominal (kV)} + 1$. A temperatura ambiente e humidade relativa do ar devem ser medidas e registadas. Na bobina sobressalente são realizadas somente uma aplicação de tensão como os Lados 01 e 02 curto circuitados conforme figura 52.

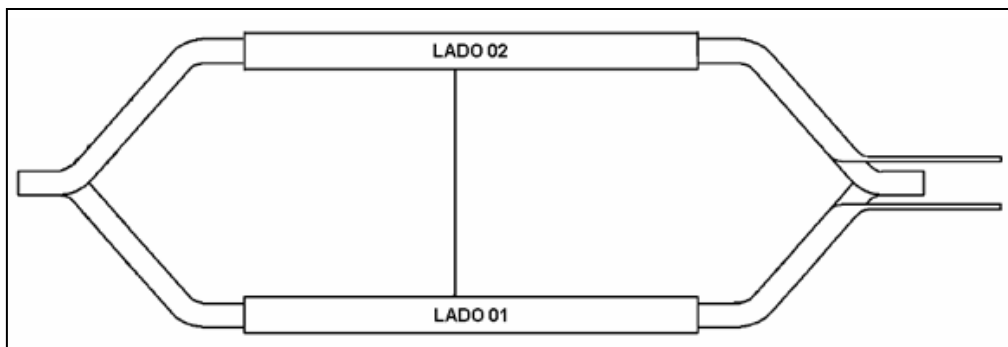


Figura 51. Bobina moldada com ambos os lados curto-circuitados

Critérios para aprovação do produto:

O valor mínimo de tensão aplicada no enrolamento deve obedecer ao seguinte critério:
 $U_{ap} = U_{ve} \times 110\%$, durante 01 minuto.

U_{ap} = Tensão Aplicada, em kV;

U_{ve} = Tensão do Voltage Endurance, em kV.

Conclusão

A crescente demanda por maior eficiência e potência de saída de máquinas eléctricas rotativas envolve o aumento das temperaturas durante a sua operação. Além dos complexos requisitos mecânicos e eléctricos que uma máquina eléctrica deve apresentar, eles também são projectados atendendo-se às condições térmicas, devido a um dos seus componentes mais importantes: O isolamento eléctrico dos enrolamentos.

Apesar do material ferromagnético e condutores eléctricos suportarem altíssimas temperaturas, o isolante eléctrico dos condutores eléctricos apresenta limites bem inferiores de temperatura máxima.

Ao longo da presente dissertação foi apresentado o sistema de isolação vigente nas máquinas eléctricas rotativas fabricadas na empresa WEG equipamentos eléctricos bem como o respectivo processo de fabrico. Verificou-se que o “assunto” isolação é um tema complexo, que exige estudo e dedicação para garantir a fiabilidade necessária das máquinas eléctricas onde é empregado. A implementação de todos os testes descritos no trabalho é necessário e fundamental para garantir a qualidade de produto. No entanto, faz-se necessárias avaliações criteriosas na implementação dos mesmos sobre os seguintes pontos: definições de tolerâncias e limites admissíveis para o produto, funcionalidade dos mesmos na linha de fabricação, segurança do operador, análise da aplicação com intuito de evitar possíveis danificação ao produto.

Referências Bibliográficas

- [1] Manuel V. Guedes; “*O motor de indução trifásico – Modelização*”. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1993.
- [2] WEG Equipamentos Eléctricos S.A. “*Motores – Motores Eléctricos*”, 2009.
- [3] Thorsen, O.V.; Dalva, M.; “*Failure Identification and analysis for high voltage induction motors in petrochemical industry*”, 1998.
- [4] T. Weiers; Y. Corrodi; R. Vogelsang; “*Partial Discharges in VPI winding insulations in dependence on the impregnation resin*”, 2006.
- [5] LIPO, T. A.,” *Introduction to AC Machine Design*”, vol. 1, University of Wisconsin – Madson, WisPERC, 1996.
- [6] IEC 60270 “High voltage test technique partial discharge measurements”, 2000.
- [7] E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel, Newmes “*High Voltage Engineering – Fundamentals*”, 2ª Edição, 2000.
- [8] V.S.Filho; “*Imagens de Defeitos por Descarga Parcial Estimulada por Raio X pulsado em Materiais Dieléctricos Poliméricos*”, 2000.
- [9] Brutsch, R.; Allison, J.; Thaler, T.; “*Factors determining cost and quality of the electrical insulation in VPI process*”, 1996.
- [10] Vogelsang, R.; Weiers, T.; Frohlick, K.; “*Electrical breakdown in high voltage winding insulation of different manufacturing qualities*, 2006.
- [11] Vonroll Insulation Training, 2006;
- [12] Brandes, H.; Hillmer, T; Frost N.; Mesrobian A.; “*Class H insulation system for rotating equipment*”, 2006.
- [13] WEG, “*Motores Eléctricos Assíncronos de Alta Tensão*”.
- [14] Vonroll, 2010;
- [15] Walter M. Cuenca; José M. Seixas; Alain F. Levy; “*Análise de componentes principais para identificar descargas parciais em transformadores de potência*”, 2009.
- [16] Sá, F; Uemori, M;” *Considerações técnicas sobre a importância do ensaio de impulso de tensão no processo de bobinas de múltiplas espiras*”, 2008.
- [17] WEG, “*Sistema de Isolamento Micatherm*”.