

Faculdade de Engenharia Universidade Porto
Fundação Universidade Regional de Blumenau



Análise de Qualidade e Processos de Bobinagem de Motores de Indução de Baixa Tensão

Alexandre Augusto Carvalho Roças



Blumenau 2012

Análise de Qualidade e Processos de Bobinagem de Motores de Indução de Baixa Tensão

VERSÃO FINAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para aprovação às disciplinas de
Estágio Supervisionado e Trabalho de Conclusão de Curso parceria feita entre
FEUP-FURB

Orientador: Prof. Doutor Sérgio Henrique Lopes Cabral
Co-orientador: Prof. Doutor Carlos Manuel Araújo Sá
Co- Supervisor: Eng. Abilio Orcioli Neto

Julho de 2012

Análise de Qualidade e Processos de Bobinagem de Motores de Indução de Baixa Tensão

Dissertação de Mestrado

Realizada Por:
Alexandre Augusto Carvalho Roças

Dissertação submetida à faculdade de Engenharia da Universidade do Porto como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia electrotécnica e de computadores.

Blumenau 2012

Resumo

Este documento corresponde ao relatório de dissertação intitulado “Análise de Qualidade e Processos de Bobinagem de Motores de Baixa Tensão”, realizado para aprovação às disciplinas de Estágio Supervisionado e Trabalho de Conclusão de curso do curso de Engenharia Elétrica da Fundação Universidade Regional de Blumenau; em parceria com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O princípio de funcionamento de um motor elétrico é baseado na interação entre campos magnéticos originados por correntes elétricas que fluem pelos enrolamentos do motor. A construção dos enrolamentos, a maneira como os enrolamentos são ligados, determina os modos de operação e o tipo da máquina elétrica.

Este documento tem o fundamento de exemplificar todas as etapas que decorrem no processo de bobinagem de um motor.

Estando-se num mercado extremamente exigente e competitivo, não se podia deixar de citar a importância da qualidade em todo o processo produtivo, quer pela diminuição de defeitos através da realização de diversos testes certificados por normas IEC e IEEE/ANSI em diferentes etapas do processo de bobinagem, quer através de acções preventivas para se atingir níveis de qualidade cada vez mais satisfatórios.

Este documento descreve ainda possíveis áreas de atuação para promover uma melhoria no processo de bobinagem dos motores elétricos para a redução de custos através da otimização de recursos utilizados.

Todo o trabalho apresentado foi feito com o autor integrado no projeto de uma nova unidade fabril da WEG.

Abstract

This document corresponds to the report of the dissertation “Quality Analyses and winding processes of low voltage electrical motors”, made for approval to the disciplines of supervised work and final work to complete the Course of Electrical Engineering of the Regional University of Blumenau in partnership with Faculty of Engineering of the University of Porto.

The principle operation of an electrical motor is based in the interaction between magnetic fields, generated by electric currents that flow through the motor windings. The windings construction, the way the windings are connected, determine the operating modes and type of electrical machines.

This document intends to illustrate all the steps involved in the winding process of a motor.

In presence of a highly demanding and competitive market, could not fail to highlight the role that quality is in the process, with regard to reduction of defects by performing several tests certified by the IEC and IEEE standards at different stages of winding process, or through preventive actions to achieve levels of quality increasingly satisfactory.

This dissertation also describes possible areas to act in order to improve the winding process of electrical motors, with regards to cost reduction through optimization of used resources.

All the presented work was done with the author integrated into the design of a new factory WEG.

Agradecimentos

Um curso superior faz-se com muita dedicação, força de vontade e com muito trabalho, por vezes existem momentos na vida académica, em que se torna menos fácil gerir um misto de emoções, no entanto é aí que entram as pessoas que fazem a diferença na nossa vida, não posso assim de deixar de agradecer a todas essas pessoas das quais destaco.

Em primeiro lugar à minha família que apesar de ter uma vida atribulada nunca deixaram de ter uma palavra de incentivo, de amor, nunca em momento algum perderam a confiança depositada em mim a eles o meu MUITO OBRIGADO por serem uma família maravilhosa.

Ao meu orientador, o Prof. Doutor Sérgio Henrique Lopes Cabral pela boa disposição, pela disponibilidade, apoio e dedicação durante a realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador o Prof. Doutor Carlos Manuel Araújo Sá, por todo o apoio pela amizade, pela confiança depositada em mim e por ter tornado possível o meu estágio na WEG.

Queria ainda destacar todo o apoio incondicional e ainda os bons momentos passados na companhia dos grandes amigos que fiz ao longo do meu percurso académico, amigos esses que com certeza serão para toda a vida. Quero destacar o Sandro Vale, Samuel Cunha, Pedro Pinto, André Quintino e o Nuno Matos.

Quero também deixar a minha palavra de agradecimento aos colegas de casa de Jaraguá do Sul pelos momentos passados, pela recepção e pela amizade destaco assim o Alexandro Obalski, Cristian Boeck e Rafael Boeck.

Não podia também deixar de agradecer às pessoas com quem lidei da fabrica 3 parque fabril 2 da WEG pela ajuda, pela amizade, pelos bons momentos passados, destaco Giovani Beltrame, Rodrigo Socha, Rodrigo Muller, Cristiano Venturi, Mário Reiguel, Jean Paris, Evelise Kretzfeld , Arildo Xavier, Osanir Santos, Francisco Costa.

Por fim agradecer à Filipa, pela paciência, pelos momentos partilhados, pelas palavras de conforto, por toda a confiança depositada e pelas palavras encorajadoras que foram parte da minha força para conseguir concluir um curso superior a ela o meu muito obrigado.

Muito obrigado a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

Índice

Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice	xi
Lista de figuras	xiv
Lista de tabelas e gráficos:	xvi
Abreviaturas e Símbolos	xviii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento	1
1.2 - Contextualização Histórica.....	2
1.3 - Evolução do Motor Elétrico.....	3
1.4 - Objectivos.....	4
1.5 - Estrutura da Dissertação.....	4
Capítulo 2	5
Máquinas Elétricas Rotativas.....	5
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Motor de indução Trifásico:	7
2.2.1 - Aspetos construtivos do M.I.T	7
2.2.2 - Princípio de Funcionamento M.I.T	9
2.2.3 - Conclusão	13
Capítulo 3	14
Bobinagem Motores B.T.....	14
3.1 - Introdução.....	14
3.2 - Fios para bobinagem	14
3.2.1 - Processo de Esmaltação.....	15

3.2.2 - Processo de Lubrificação	16
3.2.3 - Ensaios em fios	16
3.3 - Circuito Magnético.....	17
3.3.1 - Perdas no Circuito Magnético	17
3.3.2 - Métodos de redução de perdas magnéticas	18
3.3.3 - Construção dos pacotes de chapas de motores de baixa tensão:	19
3.4 - Sistema de Isolação Motores Eléctricos	20
3.4.1- Classe térmica de materiais isolantes:.....	20
3.4.2- Materiais isolantes utilizados e características.....	21
3.4.3 Processos de Impregnação:.....	22
3.5 - Terminologia associada bobinagem	24
3.6- Tipos de Enrolamentos	25
3.7- Ranhuras e tipos de Camadas	26
3.8- Número de bobinas por grupo:	27
3.9 - Associação Grupos de Bobinas	29
3.9.1 - Interligação em Série:	29
3.9.2 - Interligação em paralelo:	30
3.10 - Formação de polos.....	32
3.11 - Cálculos associados à bobinagem de motores	34
3.12 - Desenho de esquemas trifásicos.....	36
3.12.1- Dimensionamento de bobinas	37
Capítulo 4	41
Qualidade no Processo de Fabricação de Motores de B.T	41
4.1 - Defeitos na Bobinagem	42
4.1.1 - Principais defeitos no processo de fabrico de motores eléctricos:	43
4.2 - Ensaios realizados para a redução de refugo de cobre.....	45
Capítulo 5	56
Ensaios Realizados Motores Eléctricos B.T	56
5.1 Introdução	56
5.2 Tipo de testes realizados em estatores bobinados:	57
5.3 - Testes realizados no laboratório:	66
5.4 Outros testes:	75
Capítulo 6	79
Conclusão e perspectivas de trabalhos futuros.....	79
Referências	80
Anexo A.....	81
Desenho de Esquemas Trifásicos	81
Exemplo:	81
Especificações do Motor:	81
Anexo A.....	85
Fluxograma Processo de Bobinagem.....	85
Anexo B.....	86
Método Proposto Redução Refugo de Cobre nas Bobinadeiras.	86

Anexo C	87
Motor Dahlander	87
D.1 - Introdução:	87
D.1.1 - Mudança do número de Polos:	90
D.1.2 - Ligação das fases na ligação dahlander	90

Lista de figuras

Figura 1.1 - Evolução do motor trifásico AEG. Relação Peso/Potência (Motor trifásico de 4Kw e 2 Pólos).

Figura 2.2 - Classificação das máquinas eléctricas rotativas.

Figura 1.2- Constituição do Motor de Indução Trifásico.

Figura 1.3 - Exemplo de estatores em diferentes etapas do processo de fabricação.

Figura 1.4 - Rotor bobinado.

Figura 1.5 - Rotor gaiola de esquilo.

Figura 1.6 - Ligação de três enrolamentos de um sistema trifásico configuração estrela.

Figura 1.7 - Diagrama temporal de um sistema trifásico de Campos Magnéticos.

Figura 1.8 - Campo girante provocado por um sistema trifásico de correntes em três instantes t_1 , t_2 e t_3 .

Figura 3.1 - Processo de trefilação.

Figura 3.2 - Fio WEG geração 2.

Figura 3.3 - Fio WEG geração 3.

Figura 3.4 - Empacotamento de chapas do circuito magnético.

Figura 3.5 - Grampeamento.

Figura 3.6 - Soldagem.

Figura 3.7 - Auto- Empacotamento.

Figura 3.8 - Elementos constituintes de um enrolamento.

Figura 3.9 - Diferentes tipos de enrolamentos.

Figura 3.10 - Exemplo de ranhura de camada única.

Figura 3.11 - Exemplo de ranhura de camada dupla.

Figura 3.12 - Ligação de grupo em série (motor 8 pólos).

Figura 3.13 - Interligação de grupos em série (motor 4 pólos).

Figura 3.14 - Interligação de grupos em paralelo.

Figura 3.15 - Interligação de grupos em paralelo (2× paralelo).

Figura 3.16 - Interligação de grupos em paralelo (3× paralelo).

Figura 3.17 - Interligação de grupos em paralelo (4× paralelo).

Figura 3.18 - Interligação de grupos em paralelo (4× paralelo).

Figura 3.19 - Interligação de grupos em paralelo (6× paralelo).

Figura 3.20 - Ligação em paralelo dos grupos em sequência direta.

Figura 3.21 - Ligação em série dos grupos em sequência direta.

Figura 3.22 - Ligação em paralelo dos grupos/ ligação em oposição.

Figura 3.23 - Ligação em série dos grupos / ligação em oposição.

Figura 3.24 - Grupo de bobinas concêntricas com número ímpar de bobinas.

Figura 3.25 - Grupo de bobinas concêntricas com número par de bobinas.

Figura 5.1 - Forma de onda padrão vs forma de onda com defeito surge test.

Figura 5.2 - Forma de onda para estator sem defeito.

Figura 5.3 - Curto-circuito entre espiras.

Figura 5.4 - Curto-circuito entre bobinas mesma fase.

Figura 5.5 - Curto-circuito parcial entre fases.

- Figura 5.6** - Curto-circuito total entre fases.
- Figura 5.7** - Ligação errada das bobinas.
- Figura 5.8** - Ligação invertida das bobinas.
- Figura 5.9** - Ligação de bobina aberta.
- Figura 5.10** - Curto-circuito parcial para massa do estator.
- Figura 5.11** - Curto-circuito total para a massa do estator.
- Figura 5.12** - Gráfico de classes de Isolamento.
- Figura 5.13** - Circuito Equivalente por fase referido ao estator.
- Figura 5.14** - Esquema de ligação dos equipamentos dos ensaios em vazio e rotor travado teste.
- Figura 5.15** - Gráfico Corrente e Binário em função da velocidade do motor.
- Figura 5.16** - Loop - Test Carcaça Completa (Carcaça + Estator).
- Figura A.1** - Esquema de Ligação do Primeiro Grupo de Bobina Fase R.
- Figura A.2** - Esquema de Ligação 2º Grupo da Fase R.
- Figura A.3** - Esquema de Ligação 1º Grupo Fase S.
- Figura A.4** - Loop - Esquema de Ligação 2º Grupo Fase S.
- Figura A.5** - Esquema de Ligação 1º Grupo Fase T.
- Figura A.6** - Esquema de Ligação 2º Grupo Fase T.
- Figura D.1** - Ligação das bobinas com formação do maior número de pólos.
- Figura D.2** - Ligação das bobinas com formação do menor número de pólos.
- Figura D.3** - Ligações na caixa de ligação para configuração de dupla velocidade.
- Figura D.4** - Configurações possíveis de ligação para dupla velocidade.
- Figura D.5** - Ligações na caixa de ligação para configuração de dupla velocidade.
- Figura D.6** - Configurações possíveis de ligação para dupla velocidade.

Lista de tabelas e gráficos:

- Tabela 3.1** - Classes térmicas materiais isolantes pela Norma IEC 60085.
- Tabela 3.2** - Materiais isolantes utilizados e principais características.
- Tabela 1.3** - Cálculos associados à bobinagem.
- Tabela 1.4** - Relação entre o número de polos com o número de grupos de bobina por fase.
- Tabela 1.5** - Dados para a escolha ou para se alterar o passo do enrolamento.
- Tabela 1.6** - Fator de enchimento em função da área da ranhura.
- Tabela 4.1** - Quantidade de Motores produzidos no período de estudo por carcaça.
- Tabela 4.2** - Dados de produção FAB III 2011 motores testados.
- Tabela 4.3** - Produção 2011 em função das bitolas dos cabos de ligação.
- Tabela 4.4** - Médias dos dados recolhidos vs dados motores de teste.
- Tabela 4.5** - Estudo económico com base valores recolhidos.
- Tabela 5.1** - Valores de tensão DC a aplicar no ensaio da resistência de isolamento em função da tensão estipulada da máquina.
- Tabela 5.2** - Critério de avaliação do isolamento em função do valor de resistência de isolamento medida.
- Tabela 5.3** - Avaliação do isolamento da máquina em função do índice de absorção e índice de polarização.
- Tabela 5.4** - Tipo de Chapas utilizadas na fabricação de motores elétricos WEG.
- Gráfico 4.1** - Percentual de cada tipo de defeitos
- Gráfico 4.2** - Percentual de motores com defeito
- Gráfico 4.3** - Comprimento de pontas cortadas / 2 Polos ligação série
- Gráfico 4.4** - Comprimento excesso pontas em relação N.O
- Gráfico 4.5** - Refugo de Cobre 2 polos ligação série
- Gráfico 4.6** - Comprimento de pontas cortadas / 2 Polos 2× paralelo
- Gráfico 4.7** - Comprimento excesso pontas em relação N.O
- Gráfico 4.8** - Refugo de Cobre (kg)
- Gráfico 4.9** - Comprimento de pontas cortadas /4 Polos 2 × paralelo
- Gráfico 4.10** - Comprimento excesso pontas em relação N.O
- Gráfico 4.11** - Refugo de Cobre (kg)
- Gráfico 4.12** - Comprimento de pontas cortadas / 4 polos 2 × paralelo
- Gráfico 4.13** - Comprimento excesso pontas em relação N.O
- Gráfico 4.14** - Refugo de cobre
- Gráfico 4.15** - Resumo pontas cortadas para cada tipo de motor.
- Gráfico 4.16** - Resumo de quantidade cobre cortado para cada tipo de motor
- Gráfico 4.17** - Produção por tamanho de carcaça
- Gráfico 4.18** - % Motores testados vs % motores não testados.
- Gráfico 4.19** - % de cada família de motores testados
- Gráfico 4.20** - Poupança de Cobre para os motores testados (Kg)
- Gráfico 4.21** - Poupança anual considerando-se os motores testados (R\$)

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas:

B.T	Baixa tensão
C.C	Curto - Circuito
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FURB	Fundação Universidade Regional de Blumenau
N.O	Nota de operação
MIT	Motor de Indução Trifásico
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IEC	International Eletrical Comission
ANSI	American National Standards Institute
C.A	Corrente alternada
D.C	Corrente contínua

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo será feita uma introdução ao presente trabalho por forma a explicar o enquadramento do projecto, os seus objectivos e a estrutura adoptada na sua elaboração.

1.1 - Enquadramento

Este trabalho de dissertação em Engenharia Electrotécnica e de Computadores foi realizado no âmbito de uma parceria entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), a Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB) e a WEG equipamentos elétricos S.A.

A WEG - fundada em 1961, por Werner Ricardo Voigt, Eggon João da Silva e Geraldo Werninghaus baseia a sua estratégia de atuação para além dos motores elétricos, na oferta de um serviço global de equipamentos de comando e protecção, variação de velocidade, automação de processos industriais, geração e distribuição de energia, tintas e vernizes industriais. Tem a sua principal sede no Brasil em Jaraguá do Sul, cidade onde nasceu. A empresa tem como principais valores a companhia humana, o trabalho em equipa, eficiência, flexibilidade, inovação e liderança. Aposta numa relação de proximidade entre todos os seus colaboradores o que fomenta um espírito de entre ajuda e de companheirismo saudável para o bom funcionamento da empresa. Produzindo inicialmente motores elétricos, a WEG começou a ampliar as suas actividades a partir da década de 80, com a produção de componentes eletroeletrónicos, produtos para automação industrial, transformadores de força e distribuição, tintas líquidas e em pó e vernizes eletro isolantes. Tornando-se numa multinacional brasileira de referência.

A bobinagem de motores é um processo chave para o fabrico de motores elétricos, a maneira como um motor é bobinado determina as características de funcionamento nomeadamente binário nominal, velocidade de rotação, binário de arranque, corrente nominal, corrente de arranque.

Este trabalho de conclusão de curso é feito em ambiente empresarial na fábrica 3 do parque fabril 2 da WEG onde são feitos os motores das carcaças 225/250 e 280/315. (Entenda-se por tamanho da carcaça a altura de eixo "H" desde a base dos pés até ao centro do eixo do motor).

1.2 - Contextualização Histórica

Estima-se que o ano de 1866 possa ser considerado em termos práticos, como o ano do nascimento da máquina elétrica, pois foi nessa data que o cientista alemão Werner Siemens inventou o primeiro gerador de corrente contínua auto-induzido. No entanto toda a evolução do motor elétrico ascende a quase três séculos de estudos, pesquisas e invenções de muitos outros cientistas. São assim de salientar as principais datas históricas:

No ano de 1600 o cientista inglês William Gilbert publicou em Londres, a obra intitulada “De Magnete”, descrevendo a força de atração magnética. A primeira máquina eletrostática foi construída em 1663, pelo alemão Otto Guericke, e aperfeiçoada em 1775 pelo suíço Martin Planta. Hans Christian Oersted físico Dinamarquês ao fazer experiência com correntes elétricas, verificou, em 1820, que a agulha magnética de uma bússola era desviada da sua posição quando esta passava perto de um condutor no qual circulava corrente elétrica esta observação iria permitir reconhecer a íntima relação entre magnetismo e electricidade.

Em 1825 seria o Inglês William Sturgeon suportando-se na descoberta de Oersted a descobrir que um núcleo de ferro envolto por um fio condutor elétrico, transformava-se num ímã quando se aplicava uma corrente elétrica, observando ainda que a força do ímã cessava assim que a corrente elétrica fosse interrompida.

Estava assim inventado o electroímã e seria esta descoberta mais uma peça fundamental para a construção de máquinas elétricas girantes. Mas as descobertas envolvendo magnetismo e electricidade não ficariam por aqui, em 1832, o cientista italiano S. Dal Negro construiu a primeira máquina de corrente alternada com movimento de vaivém. Em 1833 o inglês W. Ritchie inventou o comutador, construindo um pequeno motor elétrico onde o núcleo de ferro enrolado girava em torno de um ímã permanente, para dar uma rotação completa, a polaridade do electroímã era alternada a cada meia volta através do comutador.

A inversão da polaridade também foi demonstrada pelo mecânico parisiense H. Pixii ao construir um gerador com um ímã em forma de ferradura que girava diante de duas bobinas fixas com um núcleo de ferro. A corrente alternada era transformada em corrente contínua pulsante através de um comutador. Só em 1866 Siemens construiu um gerador sem a utilização de um ímã permanente, provando assim que a tensão necessária para o magnetismo podia ser retirada do próprio enrolamento do rotor, isto é, que a máquina podia auto-excitar-se.

O primeiro dínamo de Werner Siemens possuía uma potência de aproximadamente 30 watts e uma rotação de 1200 rpm. A máquina de Siemens não funcionava só como gerador de electricidade, podia também operar como motor elétrico desde que se aplicasse aos seus bornes uma corrente contínua.

No ano de 1879, a firma Siemens & Halske apresentou, na feira industrial em Berlim, a primeira locomotiva elétrica, com uma potência de 2 kW. No entanto esta nova máquina de corrente contínua apresentava vantagens em relação à máquina a vapor, à roda d'água e à força animal entretanto, o alto custo de fabricação a sua vulnerabilidade em serviço (por causa do comutador) marcaram-na de tal modo que muitos cientistas dirigiram as atenções para o desenvolvimento de um motor elétrico mais barato, mais robusto e de menor custo de manutenção.

Foi assim que surgiram uma série de pesquisadores preocupados com esta ideia destacaram-se assim o jugoslavo Nicola Tesla, o italiano Galileu Ferraris e o russo Michael von Dolivo Dobrowolsky. Os esforços não se resumiram apenas ao aperfeiçoamento do motor de corrente contínua, mas também ao estudo de sistemas de corrente alternada, cujas vantagens já eram conhecidas desde 1881.

Em 1885, o engenheiro electricista galileu Ferraris construiu um motor de corrente alternada de duas fases. Ferraris, apesar de ter inventado o motor de campo girante, concluiu erradamente que motores construídos segundo este princípio, poderiam no máximo atingir um rendimento de 50 %. Em 1887 Tesla apresentou um pequeno protótipo de motor de indução bifásico com rotor em curto- circuito no entanto o motor continuou com baixo rendimento o que levou a abandonar-se este sistema durante algum tempo.

Foi o engenheiro electricista Dobrowolsky, da firma AEG, de Berlim, que, persistindo na pesquisa do motor de corrente alternada entrou em 1889 com um pedido de patente de um motor trifásico com rotor em gaiola. O motor tinha uma potência de 80 Watts e um rendimento aproximado de 80 % e um bom binário de partida.

As vantagens do motor em gaiola em relação aos motores de corrente contínua eram muitas, nomeadamente, construção mais simples, silencioso, menor manutenção e alta segurança em operação. Dobrowolsky desenvolveu em 1891, a primeira fábrica em série de motores assíncronos, nas potências de 0,4 a 7,5 kW. [3]

1.3 - Evolução do Motor Elétrico

O desenvolvimento de condutores esmaltados, dos papéis ou filmes isolantes sintéticos, das chapas magnéticas, das ligas de alumínio e dos materiais plásticos, contribuíram ativamente para a redução da relação peso potência dos motores elétricos como mostra a *figura 1.1*. Pode-se observar que o motor actual tem apenas 8 % do peso do seu antecessor em 1891. A redução do peso dos motores conduziu a que estes tivessem um menor tamanho (para uma mesma potência) de aproximadamente 20 % a cada década, com excepção das últimas décadas onde a redução foi menos acentuada. Esta evolução tecnológica é caracterizada principalmente, pelo desenvolvimento de novos materiais isolantes, que suportam temperaturas mais elevadas.

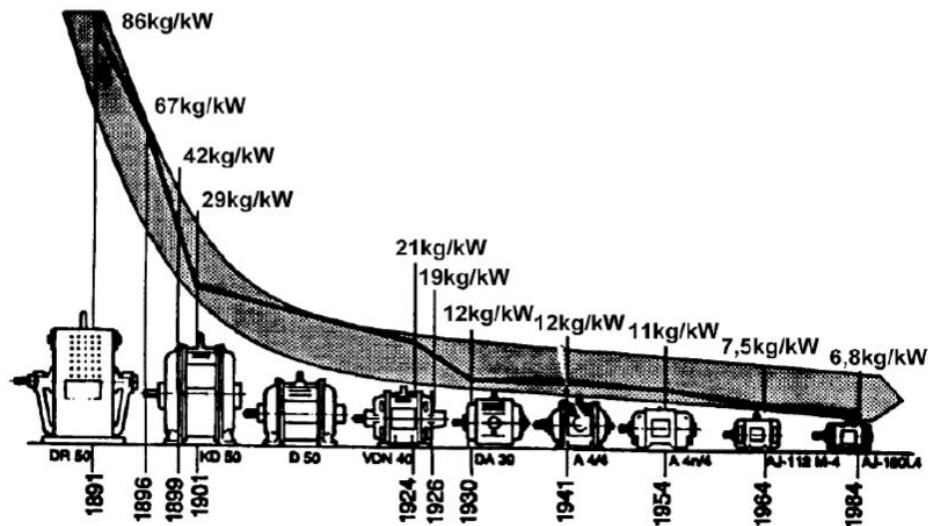


Figura 1.1 - Evolução do motor trifásico AEG. Relação Peso/Potência (Motor trifásico de 4Kw e 2 Pólos)

1.4 - Objectivos

Este trabalho teve como principal objectivo a “Análise de Qualidade e Processos de Bobinagem em Motores de Baixa Tensão” e como requisitos:

- Identificar processos de fabrico associados à bobinagem de motores BT.
- Identificar áreas de intervenção da Engenharia de Processos.
- Analisar os diferentes processos, métodos e problemáticas associadas.
- Identificar os processos de controle de qualidade existentes em cursos de fabrico de motores BT.
- Identificar áreas de intervenção da engenharia de qualidade.

1.5 - Estrutura da Dissertação

Para além deste capítulo introdutório, este documento é constituído por mais cinco capítulos.

No Capítulo 2, fez-se uma introdução às máquinas eléctricas rotativas. Foi dado especial ênfase ao motor de indução Trifásico: as leis que o regem, o seu funcionamento, as suas características e aplicações.

No Capítulo3, procedeu-se ao estudo e à exposição de temas relacionados com a bobinagem de motores B.T.

No Capítulo 4, é apresentada a questão da qualidade no processo de fabricação de motores B.T.

No Capítulo 5 Erro! A origem da referência não foi encontrada., é dada continuidade à uestão da qualidade, para isso será apresentado os testes realizados a motores de indução de B.T.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho e as perspectivas de trabalho futuro.

Capítulo 2

Máquinas Eléctricas Rotativas

2.1 - Introdução

No acionamento de cargas mecânicas utilizam-se motores eléctricos, que são máquinas capazes de promover uma transformação de energia eléctrica em energia mecânica. É grande a variedade de máquinas eléctricas existentes actualmente na indústria, no comércio e para aplicações domésticas. Consequentemente, a diversidade de tarefas a efectuar, as condições de utilização, características dos locais tipos de corrente eléctrica e exigências económicas impõem, caso a caso, características específicas para cada máquina. No domínio das máquinas eléctricas a primeira a ser utilizada foi a de corrente contínua, já que a distribuição de energia inicialmente era feita em C.C. A generalização da utilização das máquinas eléctricas em corrente alternada deu-se com a descoberta do transformador, dispositivo este que apenas funciona em corrente alternada o que conduziu a que o transporte de energia fosse feito maioritariamente em corrente alternada. Actualmente a esmagadora maioria das máquinas rotativas é alimentada em corrente alternada. Há casos no entanto em que a máquina de corrente contínua desempenha ainda um papel importante.

Existem diversos factores eléctricos e mecânicos que condicionam a escolha de uma determinada máquina eléctrica rotativa de entre os quais destacam-se:

Aspectos eléctricos:

- Tipo de corrente de alimentação (contínua ou alternada)
- Tensão utilizada
- Frequência ou gamas de frequência
- Potência útil
- Corrente estipulada
- Corrente de arranque
- Rendimento
- Factor de potência

Aspectos mecânicos:

- Velocidade ou gamas de velocidade
- Binário de arranque
- Binário resistente
- Factor de serviço
- Sistemas de refrigeração
- Aspectos construtivos diversos

Estes aspectos são extremamente importantes quando se pretende escolher uma máquina, nomeadamente na questão da diminuição da corrente de arranque, facilidade de controlo da velocidade de rotação e quanto ao valor do binário de arranque necessário para arrancar uma determinada carga. Como se pode constatar pela *figura 2.1* existe uma grande diversidade de máquinas eléctricas rotativas quanto à sua constituição e função.

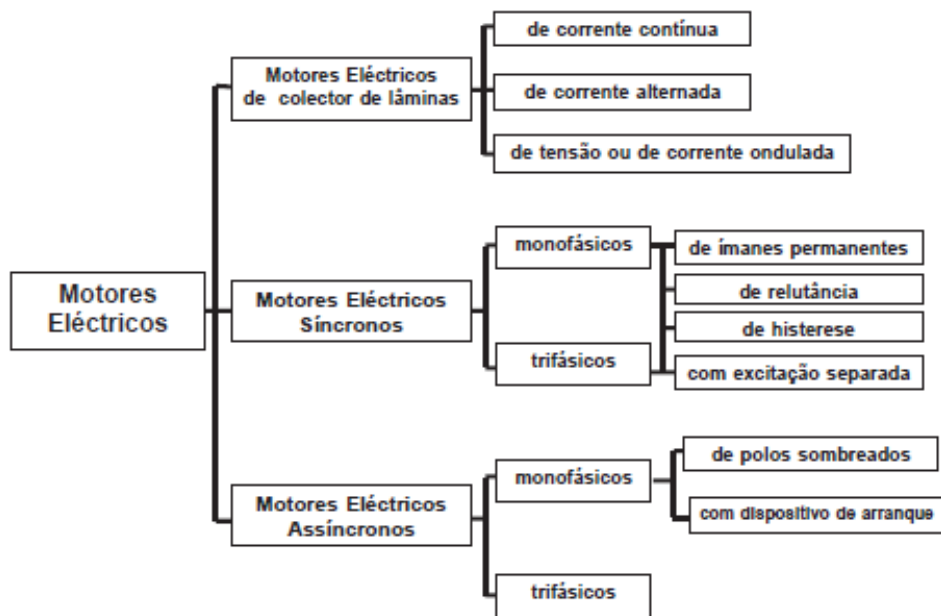


Figura 2.1 - Classificação das máquinas eléctricas rotativas

2.2 - Motor de indução Trifásico:

O motor de indução trifásico é a máquina de corrente alternada mais utilizada nos sistemas de accionamento electromecânicos. Isto deve-se às suas qualidades de robustez e simplicidade de manutenção. Este motor tem vindo gradualmente a substituir os motores eléctricos de colectores de lâminas nas suas aplicações típicas. [4]

Com o avançar do tempo foi possível explorar melhor o MIT desenvolvendo-se estratégias de controlo de velocidade o que permite uma boa adaptação às características de funcionamento para as diversas cargas mecânicas accionadas.

O MIT é uma máquina eléctrica de corrente alternada, com o circuito eléctrico de uma parte ligado a um sistema de alimentação trifásico, e com o circuito eléctrico da outra parte submetido à indução magnética criada pela circulação de correntes nos enrolamentos estatóricos. Normalmente o circuito eléctrico indutor encontra-se no estator da máquina, enquanto o circuito induzido está no rotor da máquina.

2.2.1 - Aspetos construtivos do M.I.T

O motor de indução trifásico é essencialmente constituído pelas seguintes partes: estator, rotor, carcaça (estrutura mecânica) *figura 2.2.*



Figura 2.2- Constituição do Motor de Indução Trifásico

2.2.1.1 - Estator

O estator do motor *figura 2.2* é constituído por um empacotamento de chapas de ferro magnético silicioso, com baixa densidade de perdas magnéticas que forma o circuito magnético estatórico. As chapas têm uma forma de coroa circular ranhurada na periferia interior e são revestidas de um verniz isolante. As ranhuras são semifechadas, e destinam-se a conter os condutores do circuito elétrico estatórico. Entre o conjunto de chapas magnéticas podem existir canais de ventilação, que servirão para a passagem do ar de refrigeração. O circuito elétrico estatórico é formado por três bobinas desfasadas no espaço de $2\pi/3$ rad. elétricos e destinam-se a ser alimentadas por cada uma das fases de um sistema trifásico. Os condutores elétricos que formam as diversas espiras das bobinas são isolados com esmalte. Estes podem estar dispostos em duas camadas na ranhura isolados entre si e também isolados do material magnético, por um material isolante plástico que forra a parte interior da ranhura. O enchimento da ranhura é completado por regletes plásticos (estecas).



Figura 2.3 - Exemplo de estatores em diferentes etapas do processo de fabricação.

2.2.1.2 - Rotor

O núcleo magnético rotórico é também folheado e construído com o mesmo tipo de chapa magnética utilizada no núcleo estatórico. As chapas magnéticas têm a forma de coroas circulares que possuem ranhuras perto da periferia exterior. O número de ranhuras rotóricas está ligada ao número de ranhuras estatóricas para se evitar o aparecimento de ruído no funcionamento do motor.

O rotor pode ser do tipo “gaiola de esquilo” *figura 2.5* ou pode ser bobinado *figura 2.4*. O rotor em gaiola de esquilo é constituído por uma gaiola de alumínio, dopado de uma pequena percentagem de impurezas, que são obtidas na injeção. Trata-se de um circuito elétrico polifásico em curto-circuito permanente, constituído com um material com muito menor resistividade do que o material ferromagnético em que está envolvido, por esse motivo os condutores da gaiola não estão envolvidos por qualquer tipo de material isolante. Quando

o circuito rotórico é em cobre, as barras de cobre são colocadas manualmente nas ranhuras e os anéis de topo são ligados às barras por soldadura a alta frequência. As barras são travadas nas ranhuras para evitar vibrações durante o funcionamento do motor de indução trifásico.

O circuito elétrico de um motor de indução com rotor bobinado contacta com a parte fixa da máquina através de um sistema colector de anéis - escovas. Desta forma é possível alterar-se o valor dos parâmetros (resistência rotórica) durante o funcionamento da máquina.



Figura 2.4 - Rotor Bobinado

Rotor em
alumínio
fundido

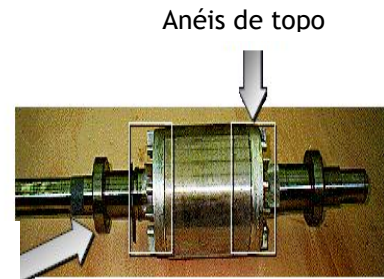


Figura 2.5 - Rotor gaiola de Esquilo

2.2.1.3 - Estrutura mecânica

O rotor da máquina é colocado a quente no eixo da máquina, sendo este fabricado por torneamento em aço. O veio apoia-se em mancais de rolamento colocados nas tampas da carcaça. O MIT pode ser construído para funcionar com o eixo em posição horizontal, em posição vertical ou inclinado. O motor pode estar assente em patas ou sobre flange.

A parte rotórica e a parte estatórica encontram-se envolvidas do meio exterior por uma carcaça, que pode ser em alumínio injectado a baixa ou alta pressão, de ferro fundido ou em chapas de aço soldada.

2.2.2 - Princípio de Funcionamento M.I.T

2.2.2.1 - Campo girante gerado por um sistema trifásico

Será visto como é que a partir de um conjunto de três bobinas colocadas no estator deslocadas entre si de 120° , alimentadas por um sistema trifásico de correntes tal como se sugere na *figura 2.6*, é possível criar-se um campo girante. As três fases para o exemplo apresentado estão ligadas em estrela, no entanto poderiam estar ligadas em triângulo. Um sistema trifásico de correntes (i_1, i_2, i_3) cria um sistema trifásico de campos magnéticos (h_1, h_2, h_3) .

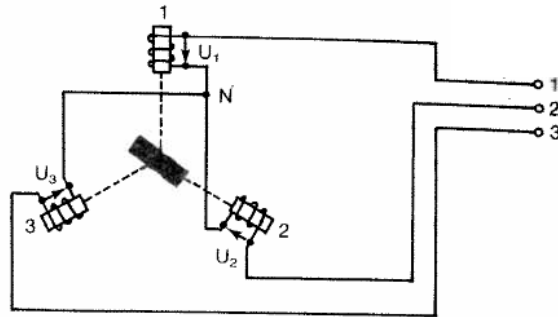


Figura 2.6 - Ligação de três enrolamentos de um sistema trifásico configuração estrela.

Expressões das correntes e dos campos magnéticos num sistema trifásico:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_M \text{sen}(wt) \\ I_2 &= I_M \text{sen}(wt - 2\pi/3) \\ I_3 &= I_M \text{sen}(wt - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} h_1 &= H_m \text{sen}(wt) \\ h_2 &= H_m \text{sen}(wt - 2\pi/3) \\ h_3 &= H_m \text{sen}(wt - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Tendo-se em conta a expressão 2.2 e a figura 2.7 verifica-se que os três campos evoluem sinusoidalmente no tempo, passando cada um deles sucessivamente por um máximo, defasados entre si de 120° ou $1/3$ de período.

No instante t_1 , h_1 é máximo enquanto h_2 e h_3 têm sentidos contrários a h_1 , sendo iguais entre si e iguais a $h_1/2$ (em módulo).

No instante t_2 temos que h_2 é máximo enquanto h_1 e h_3 têm sentidos contrários a h_2 , sendo iguais entre si e iguais a $h_2/2$ (em módulo).

No instante t_3 temos que h_3 é máximo enquanto h_1 e h_2 têm sentidos contrários a h_3 , sendo iguais entre si e iguais a $h_3/2$ (em módulo).

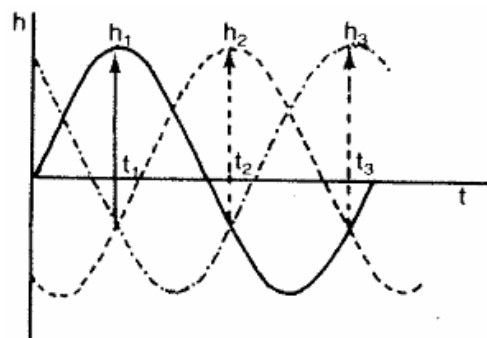


Figura 2.7 - Diagrama temporal de um sistema trifásico de Campos Magnéticos

Fazendo-se agora a representação vectorial destas três grandezas ($\vec{h}_1, \vec{h}_2, \vec{h}_3$) para cada um dos instantes considerados (t_1, t_2, t_3) e calculando-se a soma vectorial dos três vectores é possível obter-se as representações vectoriais da figura 2.8.

Quando h_1 é máximo positivo (instante t_1) o vector \vec{h}_1 “sai” da bobina respectiva (bobina b_1) em direcção ao interior da máquina. No mesmo instante, sendo h_2 e h_3 negativos, então os seus sentidos, relativamente às respectivas bobinas (b_2 e b_3), são contrários, os vectores \vec{h}_2 e \vec{h}_3 “entram” nas bobinas.

Nos instantes t_2 e t_3 ocorrem situações semelhantes, mas nesta situação os valores máximos são os de h_2 e h_3 , respectivamente.

Em cada instante o valor de h_r tem o mesmo comprimento. O módulo de h_r é:

$$\frac{3}{2}h_{1m\acute{a}x} = \frac{3}{2}h_{2m\acute{a}x} = \frac{3}{2}h_{3m\acute{a}x} \quad (2.3)$$

Pode-se verificar que por exemplo no instante t_1 , a soma vectorial de h_2 com h_3 dá um vector cujo comprimento é igual ao de h_2 ou de h_3 , portanto metade de h_1 .

$$\vec{h}_1 + \frac{\vec{h}_1}{2} = \frac{2 \times \vec{h}_1 + \vec{h}_1}{2} = \frac{3\vec{h}_1}{2} = \frac{3}{2}\vec{h}_1 \quad (2.4)$$

Pode-se observar pela *figura 2.8*, que nos três instantes considerados (t_1, t_2, t_3), o vector resultante h_r foi rodando num determinado sentido apresentando sempre o mesmo valor.

Se por ventura se utilizasse outros instantes de tempo, obter-se-ia de igual modo o mesmo valor de h_r com o mesmo comprimento e rodando no mesmo sentido.

Conclui-se que um sistema trifásico de tensões cria um campo magnético girante de valor $h_r = 3/2h_{m\acute{a}x}$.

O sentido de rotação do campo para o caso ilustrado é de 1-2-3, caso a sucessão de fases fosse trocada 1-3-2, o campo girante passaria a rodar em sentido contrário. A situação ilustrada para o campo girante de um sistema formado por três bobinas é explicada em pormenor pelo teorema de ferraris.

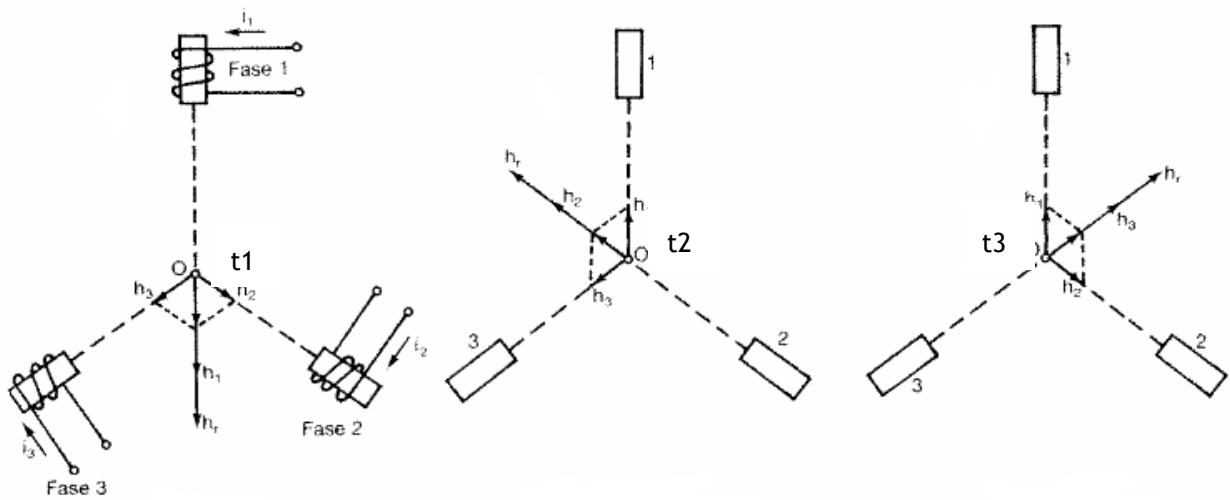


Figura 2.8 - Campo girante provocado por um sistema trifásico de correntes em três instantes t1, t2 e t3.

2.2.2.2 - O deslizamento do motor de indução trifásico

A tensão induzida no rotor de um motor de indução depende da velocidade do rotor relativamente ao campo magnético. Visto que o comportamento do motor de indução depende da tensão e corrente no rotor, é usual falar-se da velocidade relativa. Este movimento relativo do rotor e do campo magnético é normalmente definido pela velocidade de deslizamento e pelo deslizamento em si. Podemos obter estes parâmetros com as seguintes fórmulas:

$$n_d = n_s - n_r \quad (2.5)$$

$$s(\%) = \frac{n_d}{n_s} \times 100 = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \quad (2.6)$$

onde n_d é a velocidade de deslizamento da máquina, n_s é a velocidade do campo magnético, n_r é a velocidade do rotor e s o deslizamento.

No funcionamento como motor, este deslizamento assume valores de 0 a 1, sendo praticamente igual a 0 quando o motor se encontra a funcionar em vazio ($n_{r0} = n_s$) e sendo igual a 1 quando o rotor se encontra travado ($n_r = 0$).

2.2.3 - Conclusão

Dadas as características enunciadas, o motor de indução trifásico apresenta-se assim como uma escolha viável para a aplicação nas mais diversas áreas. Estima-se que entre 80 a 85 % de todos os motores utilizados no mundo sejam motores de Indução trifásicos. [5]

O MIT leva vantagem sobre os demais motores dadas as suas características construtivas, a sua robustez e baixa manutenção. No entanto este motor apresenta como principal desvantagem o controlo de velocidade. Muitos inversores de frequência utilizados para além de possuírem um custo elevado, sujeitam o motor a tensões harmónicas que se não forem correctamente acauteladas provocam aumento de perdas e temperatura, aumento dos níveis de vibração e ruído, perda de rendimento e possibilidade de degradação do material isolante. No entanto estes efeitos indesejáveis têm vindo a ser melhorados com o aperfeiçoamento da electrónica de potência, métodos de controlo de velocidade por actuação na magnitude e posição do “vector espacial do fluxo” (controlo vectorial) permitindo controlo de torque com a variação da velocidade do motor. [7]

Capítulo 3

Bobinagem Motores B.T.

3.1 - Introdução

A Bobinagem é uma das partes principais na fabricação dos motores e geradores. Esta etapa na fabricação de motores e geradores é constituída de vários processos. No anexo A é apresentado um fluxograma de todo o processo. Na maioria das vezes o processo é de fácil execução. No entanto são necessários alguns cuidados especiais. A forma como um motor é bobinado determina o seu desempenho. Os motores de indução trifásicos de baixa tensão para aplicações generalistas são fabricados com 2,4,6,8,10,12 pólos. Tipicamente existem motores com 24,36,48,54 ou 72 ranhuras. As bobinas são confeccionadas em fio de cobre electrolítico esmaltado, este esmalte tem a finalidade de proporcionar isolamento elétrico entre as diversas espiras de uma bobina e entre as espiras e as chapas do circuito magnético do estator. Em todo o processo de bobinagem os materiais isolantes assumem um papel de elevada importância como será visto.

3.2 - Fios para bobinagem

Os fios utilizados na bobinagem são considerados de elevada importância para o desempenho do motor, sendo também o elemento mais sensível entre os demais componentes. O cobre é o principal metal utilizado para a fabricação de fios por apresentar uma alta condutividade elétrica ($59,6 \times 10^6$ S/m), maleabilidade e resistência à corrosão. O cobre também pode ser soldado com facilidade por apresentar um ponto de fusão em torno de 1084° C. O alumínio no entanto, tende a ser uma alternativa viável à substituição do cobre, por possuir um custo mais baixo. Além disso, por ser mais leve que o cobre permite reduzir o peso dos motores e facilitar o processo de trefilação *figura 3.1* por ser mais fácil o seu manuseio.

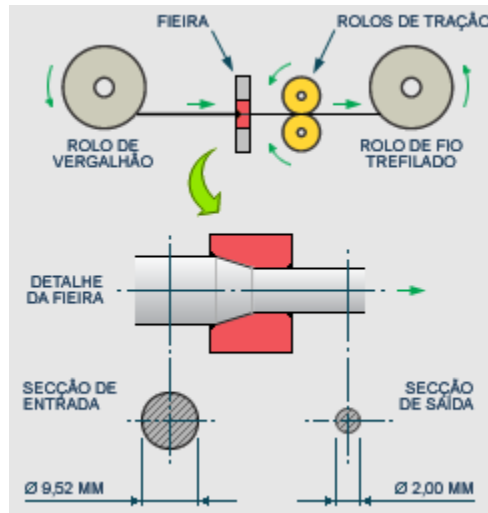


Figura 3.1 - Processo de trefilação.

O processo de trefilação consiste na tração de um fio de secção mais elevada através de uma matriz chamada fieira ou trefila com o objectivo da redução da secção transversal do fio e respectivo aumento do comprimento do material.

As fieiras para trefilar fios grossos e médios (até 1,4 mm de diâmetro) e fios rectangulares são feitas num metal duro cuja constituição é 95 % carboneto de tungsténio + 5 % cobalto, e para fios finos são feitas de diamante industrial.

A redução do diâmetro do fio deve ser feita em várias etapas, utilizando-se para isso várias fieiras interligadas que realizam pequenas reduções graduais até se obter o produto final.

O objectivo do processo de trefilação é a obtenção de um produto com dimensões, acabamento superficial e propriedades mecânicas controladas.

A necessidade de trefilação dá-se também devido ao facto de o cobre e o alumínio ser fornecido em vergalhão em jungos de 4500 kg nas bitolas de 8 e 11 mm para o cobre e em jungos de 1500 kg e bitola de 9,5 mm para o alumínio.

3.2.1 - Processo de Esmaltação

O processo de esmaltação consiste em aplicar uma película de isolante sobre o fio, conferindo ao condutor resistência eléctrica, mecânica e química de acordo com os requisitos dos produtos.

O fio de cobre aplicado nos motores WEG pode suportar até 12 kV.

A aplicação do esmalte é feita em várias camadas através de fieiras de esmaltação, sendo que a cada aplicação das diversas camadas de esmalte antecede um período de cura numa estufa.

Para a esmaltação dos fios são utilizados dois tipos de verniz:

Verniz Base: Responsável pela rigidez dielétrica (isolamento).

Verniz Capa: Responsável pela resistência mecânica (proteção).

Numa primeira instância são aplicadas as camadas do verniz base, que podem variar entre 6 e 12 camadas dependendo do tipo de fio, em seguida são aplicadas as camadas de verniz capa, que podem variar entre 2 a 4 camadas.

O fio de geração 2 da WEG *figura 3.2* é constituído de 80 % de verniz base e 20 % de verniz capa, sendo utilizado em motores de linha normal (standard).

O fio de geração 3 da WEG *figura 3.3* é constituído por 40 % de verniz base e 60 % de verniz capa, sendo mais utilizado em motores acionados por inversor de frequência.

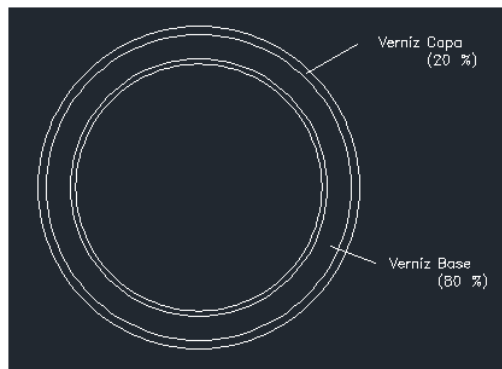


Figura 3.2 - Fio WEG geração 2

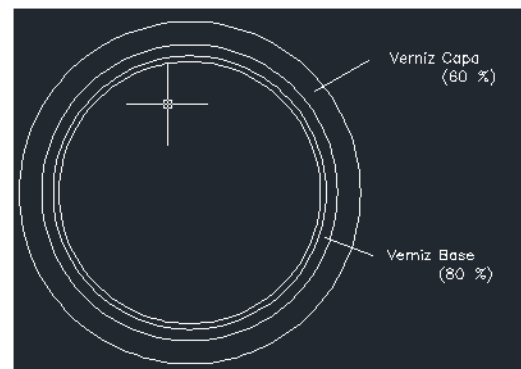


Figura 3.3 - Fio WEG geração 3

3.2.2 - Processo de Lubrificação

Antes do acondicionamento no carretel, o fio já trefilado passa pelo processo de lubrificação, que consiste na aplicação de uma camada fina de óleo lubrificante constituído à base de parafina. Este processo tem como objectivo melhorar a bobinagem, facilitando a inserção das bobinas no estator reduzindo-se assim o atrito (redução risco fios arranhados) durante a inserção e ainda de melhorar a bobinagem do fio no carretel.

3.2.3 - Ensaios em fios

A cada lote de fios já prontos são realizados ensaios em laboratório, que verificam as características eléctricas e mecânicas do fio esmaltado, sendo os principais ensaios realizados:

- **Dimensional** - Verifica-se se o diâmetro e se o formato do fio está dentro da tolerância permitida pela norma.
- **Aderência e flexibilidade ao alongamento** - Verifica-se se o esmalte tem aderência sobre o fio após o dobramento.
- **Termoplasticidade** - Determina a temperatura de reamolecimento do esmalte através do aquecimento lento.
- **Choque Térmico** - Verifica se a camada de esmalte suporta a temperatura da classe térmica.
- **Resistência à abrasão unidirecional** - Indica qual é a força necessária para remover a camada de esmalte.
- **Alongamento à ruptura** - Determina qual o alongamento máximo que o fio pode suportar sem romper.
- **Rigidez dielétrica** - Determina a tensão máxima que o isolamento em esmalte suporta sem que haja ruptura do isolamento.
- **Continuidade de Película** - Determina o número de falhas na camada isolante num comprimento máximo de 30 metros.
- **Angulo de recuo** - Determina o grau de maleabilidade do fio.

3.3 - Circuito Magnético

O circuito magnético do motor de indução é constituído por um núcleo ferromagnético estático, denominado de estator, um entreferro, e um núcleo ferromagnético rotativo, denominado rotor. O rotor gira livremente no interior do estator por se encontrar apoiado nas suas extremidades em rolamentos alojados nas tampas do motor. O circuito magnético estático é constituído por um pacote (várias chapas empilhadas) de chapas unidas entre si. Este empacotamento é efectuado com o propósito de redução de perdas magnéticas no motor, desta forma é possível separar magneticamente todas as chapas. As perdas magnéticas ou também denominadas perdas no ferro podem dividir-se em perdas por correntes de Foucault ou perdas por histerese.[5]

3.3.1 - Perdas no Circuito Magnético

As perdas por histerese estão associadas com a mudança da magnitude e direcção dos domínios magnéticos e podem ter origens devido a:

- Núcleos percorridos por fluxos magnéticos variáveis no tempo.
- Derivam da histerese magnética que é característica dos materiais ferromagnéticos.
- Em condições de excitação sinusoidal e por cada ciclo de magnetização, o seu valor é directamente proporcional à área do ciclo histerético do material para baixas frequências.
- No caso de excitação sinusoidal de baixas frequências, o seu valor por unidade de massa (perdas específicas) podem determinar-se com base na seguinte lei:

$$P_h = K_h * f * B_M^\alpha, \quad (3.1)$$

Onde K_h e α são constantes que dependem do material e numa máquina, do arranjo do circuito magnético é frequente tomar-se α igual a 2.

As perdas por efeito de Foucault têm origem:

- Núcleos magnéticos percorridos por fluxos magnéticos variáveis no tempo.
- A variação do fluxo magnético induz, nos materiais magnéticos, micro - correntes eléctricas também designadas de corrente de turbilhão cuja circulação originam perdas por efeito Joule que para além de dependerem da intensidade do fluxo magnético e da sua taxa de variação no tempo, dependem também da resistividade eléctrica do próprio material magnético.
- No caso de excitação sinusoidal de baixa frequência, o seu valor por unidade de massa (perdas específicas) podem determinar-se com base na seguinte lei:

$$P_f = K_f * f^2 * B_M^2 \quad (3.2)$$

Onde K_f é uma constante que depende do material e numa máquina, do arranjo concreto do circuito magnético.

3.3.2 - Métodos de redução de perdas magnéticas

As perdas por histerese e por correntes de foucault podem ser atenuadas recorrendo-se a algumas técnicas, sabe-se que à partida a composição química de uma chapa interfere directamente no desempenho do motor. Elementos como o carbono reduzem o rendimento da chapa enquanto o silício aumenta a sua eficiência. O silício apresenta maior resistividade eléctrica que o carbono.[15]

- O núcleo ferromagnético deve ser laminado *figura 3.4* no sentido das linhas de força do campo magnético.
- As chapas não devem ter contacto eléctrico entre elas, durante o processo de fabrico são aplicados vernizes, processos termoquímicos de tratamento de superfície.
- A laminação e o isolamento das chapas do circuito magnético conduz a um aumento da resistência transversal do circuito magnético, facto que é determinante para a redução substancial das correntes de Foucault e consequentemente das perdas originadas por essas correntes.

- Caso as correntes sejam limitadas pela resistividade do material as perdas também são proporcionais a $1/t^2$ onde t corresponde à espessura da lâmina do pacote de chapas, a altas frequências a condição de limitar as perdas pela resistividade do material não é válida e as perdas aumentam rapidamente com a frequência.

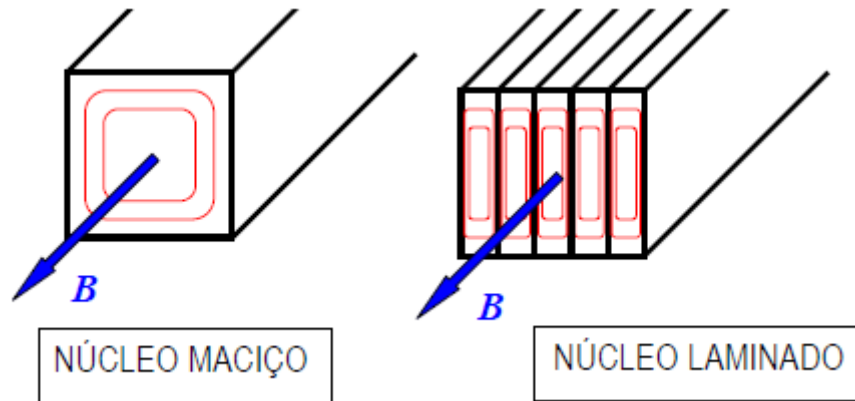


Figura 3.4 -Empacotamento de chapas do circuito magnético

Tratamento Térmico (Descarbono)

O tratamento térmico aplicado às chapas do circuito magnético tem a finalidade de melhorar o rendimento da chapa. Esta melhoria é conseguida através do aquecimento da chapa a uma temperatura que ronda os 760 C°, baixando-se assim o teor de carbono para 0,005 %. Este método permite reduzir significativamente as perdas magnéticas (aumenta a resistividade elétrica do material) tornando-se assim uma alternativa viável e bastante eficiente para melhorar o desempenho dos motores, depois do tratamento térmico as chapas adquirem uma cor azulada.

3.3.3 - Construção dos pacotes de chapas de motores de baixa tensão:

Para motores de baixa tensão o método de fixação das diversas chapas que constituem o circuito magnético pode ser:

- ✓ Grampeamento

A união das chapas é feita através de uma tira de aço aplicada nas laterais do pacote, proporcionando assim ao pacote uma elevada resistência mecânica, que lhe confere resistência suficiente para o processo de prensagem do estator na carcaça.

- ✓ Soldagem

A união das chapas é feita através de um cordão de solda nas laterais do pacote, este processo é utilizado quando a largura do pacote de chapas não ultrapassa os 105 mm devido à baixa resistência conferida durante a prensagem do estator na carcaça. Este processo tem ainda o problema de as perdas magnéticas serem mais elevadas devido à soldadura.

✓ Auto empacotamento

A união das chapas é feita através de vincos (engates) estampados na própria chapa do estator. Este processo é mais utilizado nos motores destinados ao mercado de electrodomésticos devido à facilidade e agilidade do processo.



Figura 3.5 - Grampeamento

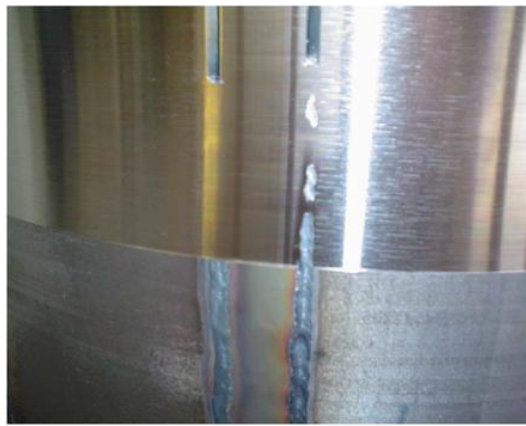


Figura 3.6 - Soldagem



Figura 3.7 - Auto empacotamento

3.4 - Sistema de Isolação Motores Elétricos

Os isoladores são amplamente utilizados no processo de bobinagem e constituem um dos elementos mais importantes do bobinado, uma vez que influenciam directamente na vida útil de um motor [16]. Para se definir um sistema de isolamento é necessário conhecer-se a temperatura de trabalho da máquina, a tensão estipulada da máquina, a resina utilizada na impregnação, o ambiente em que a máquina irá operar bem como a sua aplicação e o seu sistema de acionamento [16].

Pela lei de Arrhenius, um aumento de 8 a 10 graus Celsius acima do limite da classe térmica de um isolante pode, reduzir a metade a sua vida útil [16]. A vida útil de um isolante está ligada à perda das suas características dieléctricas ao ponto de este não conseguir suportar o nível de tensão para o qual foi projectado originando um curto-circuito.

3.4.1- Classe térmica de materiais isolantes:

A temperatura está directamente relacionada com a vida útil de um material isolante, sendo assim existe uma vasta classe de materiais isolantes que são apresentados na IEC 60085, os valores de temperatura e as classes térmicas dos materiais estão indicados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classes térmicas materiais isolantes pela Norma IEC 60085.

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)

3.4.2- Materiais isolantes utilizados e características.

Os filmes isolantes têm como finalidade isolar térmica e eletricamente partes do bobinado dos motores. Existem assim uma série de materiais isolantes que são colocados no processo de bobinagem nos seguintes pontos:

Isolamento de fundo de ranhura: Este isolamento tem como finalidade separar fisicamente as bobinas energizadas do pacote de chapas do estator. Devem ter boas características de flexibilidade ao dobramento. Os principais problemas que ocorrem com o isolamento fundo de ranhura são:

- ✓ Problemas dimensionais.
- ✓ Posicionamento incorreto.
- ✓ Danificações que ocorrem no processo de inserção das bobinas (casos de enchimento alto).
- ✓ Respingos de solda (soldas das ligações).
- ✓ Amarração das cabeças de bobinas.
- ✓ Conformação cabeças de bobina, conformação final.

Isolamento de fechamento de ranhura: Este isolamento tem como finalidade evitar que as espiras entrem em contato com o rotor da máquina. Conferem ainda uma forma compacta às bobinas colocadas nas ranhuras para que o sistema não se danifique quando sujeito aos esforços electrodinâmicos. Os principais problemas que ocorrem com o isolamento de fundo de ranhura são:

- ✓ Dimensionamento incorreto
- ✓ Posicionamento incorreto.

- ✓ Respingos de solda.

Isolamento entre fases: Este isolamento é colocado entre as bobinas das diferentes fases para se evitar o contato entre fases e diminuir-se o risco de curto-circuito. Este isolador deve possuir uma elevada maleabilidade para facilitar a sua colocação manual entre as diferentes fases. Os principais problemas que ocorrem com o isolamento entre fases são:

- ✓ Dimensionamento incorreto (corte excessivo de material).
- ✓ Posicionamento incorrecto.
- ✓ Rompimento do isolador entre fases na amarração da cabeça das bobinas.

Separadores entre fases: Este tipo de isolamento cria um espaço físico entre os grupos de bobinas, substituindo os isoladores entre fases. Este tipo de separadores é utilizado em máquinas em que é exigido mais capacidade de dissipação de calor. Podem ser calços em Poromat (fibra expansora) ou calços de Nylon (poliamida + fibra de vidro).

Isoladores de reforço: Os isoladores de reforço têm a função de garantir o isolamento entre fases, evitando-se assim o contato entre a saída de uma fase com a saída de outra fase.

Isoladores entre camadas: Os isoladores entre camadas têm a finalidade de separar as bobinas de uma fase das bobinas de outra fase, esta separação dá-se dentro da ranhura. Os principais problemas que podem ocorrer são:

- ✓ Dimensionamento incorreto.
- ✓ Posicionamento incorreto.

3.4.3 Processos de Impregnação:

O processo de impregnação utilizado no curso de fabrico de motores elétricos é essencial para a classificação final da classe térmica da máquina. [6] Este método tem a finalidade de tornar compacto todo o conjunto para que os condutores não se desloquem das suas posições.

A impregnação é ainda responsável por:

- ✓ Preencher todos os espaços vazios que ficam dentro das ranhuras e nas cabeças das bobinas, facilitando assim a dissipação de calor para o meio exterior.
- ✓ Minimizar a vibração entre fios de cobre, evitando-se assim desgaste na camada isolante.
- ✓ Reduzir a entrada de agentes que ponham em risco a integridade do isolamento como por exemplo humidade e poeiras.
- ✓ Reforço do isolamento dos enrolamentos.
- ✓ Diminuir a oxidação em todo o bobinado.

Métodos de Impregnação:

Para os motores de baixa tensão a impregnação pode ser realizada por 3 métodos:

- ✓ Impregnação por imersão.
- ✓ Impregnação por gotejamento.
- ✓ Impregnação por inundação.

O processo de impregnação por imersão:

Consiste em mergulhar o estator bobinado num tanque com verniz até que o ar contido nas ranhuras seja eliminado. Seguidamente é realizada a cura do verniz numa estufa a uma temperatura de aproximadamente 150 °C. Este método tem como desvantagem o tempo de todo o processo.

O processo de impregnação por gotejamento:

A resina é canalizada através de um fluxo contínuo sobre a cabeça da bobina, enquanto o estator vai girando em cima de uma plataforma inclinada. Antes da impregnação o estator é aquecido a 80 °C para se eliminar a humidade e para se dilatar o material para que o verniz ocupe todos os espaços vazios. Após a impregnação, o motor segue para uma estufa de cura de verniz onde é aquecido a 150 °C.

O processo de impregnação por inundação:

O motor montado com o estator é preenchido com o verniz lentamente até que o bobinado esteja completamente submerso. A cura do verniz é feita a uma temperatura de 150 °C.

Tabela 3.2 - Materiais isolantes utilizados e principais características.

	Classe B (130 °C)	Classe F (155 °C)		Classe H (180 °C)
	(Poliéster)	(DMD)	(NMN)	(NOMEX)
Forma do material	Filme homogêneo	Laminado em camadas	Laminado em camadas	Folha homogênea
Constituição	100% Poliéster (Tereftalato de Polietileno)	Fibra de Poliéster (0,05 mm)+Filme de Poliéster+ Fibra de Poliéster (0,05 mm)	Poliaramida 464 (0,05 mm)+ Poliéster+ poliaramida 464 (0,05 mm)	Poliaramida 410
Absorção de água (%) (24 h temperatura 23 °C ± 1°C)	Máximo de 0,75	Máximo 6,0	Máximo 6,0	Máximo 10,0
Contração (%) (24 h temperatura da classe térmica)	Máximo de 3,0	Máximo de 3,0	Máximo de 3,0	Máximo de 3,0
Classe térmica (durabilidade térmica)	20.000 h a 130 °C	20.000 h a 155 °C	20.000 h a 155 °C	20.000 h a 180 °C
Resistência Térmica	Isento de ressecamento, bolhas ou separação entre camadas.			
Envelhecimento (96 h na temperatura da classe térmica)	Isento de ressecamento, bolhas ou separação entre camadas. Não deve apresentar trincas ou rupturas quando dobrado em mandril.			
Resistência ao verniz de impregnação	O filme isolante não deve apresentar variações nas suas propriedades de resistência à tração e alongamento à ruptura quando sujeitos condição A: (4 h a 90 °C ± 3°C), Condição B: (24 h a 25°C ± 3°C)			
Comportamento após a impregnação	Isento de ressecamento, trincas, bolhas ou separação entre camadas			

3.5 -Terminologia associada bobinagem

Pretende-se neste ponto padronizar a linguagem que vai ser utilizada ao longo do trabalho e ainda introduzir-se alguns conceitos gerais que permitem um melhor entendimento das questões relacionadas com bobinagem.

- Espira - Uma volta de fio.
- Bobina- Várias espiras do mesmo tamanho, colocadas numa mesma ranhura.
- Grupo- Uma ou mais bobinas que formam os polos.
- Fase- É constituída por grupos.
- Conjunto- Corresponde ao conjunto das três fases juntas, isto é, todo o bobinado do motor para motores trifásicos. Para motores monofásicos é formado pela fase principal e pela auxiliar.
- Passo- Indica o tamanho de cada bobina. É o número de ranhuras existentes entre os dois lados de uma mesma bobina.
- Passo Polar - Distância (em radianos elétricos) entre polo norte e sul adjacentes, por outras palavras, pode ser definido como o ângulo de abrangência de um polo magnético (Ex. 360 / nº de polos).

- Bobina de passo pleno (ou passo inteiro) - Bobina que tem os seus lados afastados de 180 graus elétricos.
- Bobina de passo fracionário (ou passo encurtado) - Bobina que tem os seus lados afastados de menos de 180 graus elétricos.
- Enrolamento distribuído - Enrolamento no qual o número de grupos de bobinas (ou número de bobinas por pólo/fase) é maior que um.
- Enrolamento Concentrado - Enrolamento no qual o número de grupos de bobinas (ou número de bobinas por pólo/fase) é unitário.
- Passo da fase - Passo das fases determina o ângulo ou a distância entre as ranhuras em que estão colocadas as entradas das fases do enrolamento.

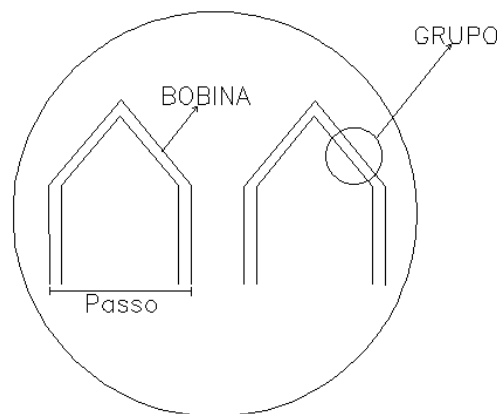


Figura 3.8 - Passo de um enrolamento.

3.6- Tipos de Enrolamentos

A melhor maneira de associar vários condutores de um enrolamento é distribuindo-os em bobinas, e a distribuição das bobinas deve ser feita de tal maneira que as mesmas formem grupos. Pode-se pensar que um conjunto é formado pelas fases do motor, cada fase é formada por grupos, cada grupo por sua vez é formado por bobinas e cada bobina é formada por espiras.

As bobinas de cada grupo são interligadas entre si, sendo que cada grupo possui uma entrada e uma saída (duas pontas). As bobinas que constituem os grupos são distribuídas uniformemente nas ranhuras do estator para criarem o campo magnético.

O campo magnético é obtido pela aplicação de um sistema trifásico de tensões em três circuitos idênticos mas electricamente independentes entre si, isto é, três enrolamentos separados, um para cada fase da rede de alimentação. Cada fase vai alimentar um determinado número de bobinas dispostas no estator de tal forma que as mesmas quando alimentadas resultem num sistema de bobinas distribuídas simetricamente e desfasadas umas em relação às outras de 120 graus elétricos.

Para o caso do rotor ser bobinado o número de ranhuras por pólo e por fase no rotor é diferente do estator, de preferência primos entre si, porque se fossem iguais, ao coincidirem

no repouso as ranhuras do rotor com as ranhuras do estator haveria um ponto de mínima relutância e não se conseguiria dar partida na máquina.

Frequentemente nos rotores dos motores de indução são empregadas ranhuras inclinadas em relação ao seu eixo geométrico, com esta técnica consegue-se melhorar significativamente o problema da relutância, consegue-se assim forças electromotrizes induzidas que se aproximam mais da forma de onda sinusoidal, reduz-se assim harmónicos e ruídos provenientes da indução magnética.

Quando os enrolamentos de um determinado motor são concêntricos *figura 3.9 b)*, as bobinas têm passos diferentes, as cabeças das bobinas são alojadas umas no interior das outras sem se cruzarem.

No caso de os enrolamentos serem imbricados *figura 3.9 a)* as bobinas têm todas o mesmo passo, as cabeças das bobinas cruzam-se.

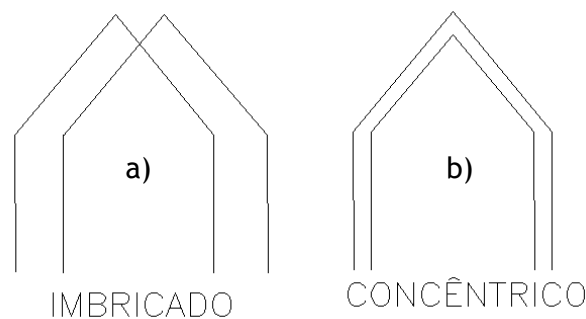


Figura 3.9 - Diferentes tipos de enrolamentos

3.7- Ranhuras e tipos de Camadas

As ranhuras de um estator podem ser divididas em três classes, ranhuras abertas, ranhuras semi - abertas e ranhuras semi - fechadas. As ranhuras abertas são utilizadas em motores de M.T e A.T por permitirem uma fácil acomodação das bobinas pré fabricadas (bobinas de secção rectangular) e previamente isoladas. As ranhuras semi - fechadas têm uma vasta aplicação porque a área efectiva da face dos dentes é maior e isso reduz a intensidade da corrente de magnetização e a relutância do entreferro. Com isto a máquina apresenta uma maior eficiência e um melhor fator de potência, o motor ganha termicamente, possui maior dissipação de calor. Nas ranhuras semi - fechadas o processo de inserção das bobinas nas ranhuras é mais complicado, o que torna mais demorado o processo e a colocação dos isolamentos. Existe uma geometria “ótima” do formato da ranhura dependendo da aplicação do motor.

Os enrolamentos do motor podem designar-se de camada única, camada dupla ou camada mista quando o motor possui enrolamentos de camada única e de camada dupla.

- ✓ Na camada única cada ranhura é ocupada por apenas um lado de bobina (ranhura cheia). *Figura 3.10*
- ✓ Na camada dupla cada ranhura é preenchida por dois lados de bobina (meia ranhura). *Figura 3.11*
- ✓ Na camada mista, são combinados os dois tipos de camadas anteriormente referidas, o motor terá ranhuras em que é utilizada camada única e ranhuras onde será utilizado camada dupla.

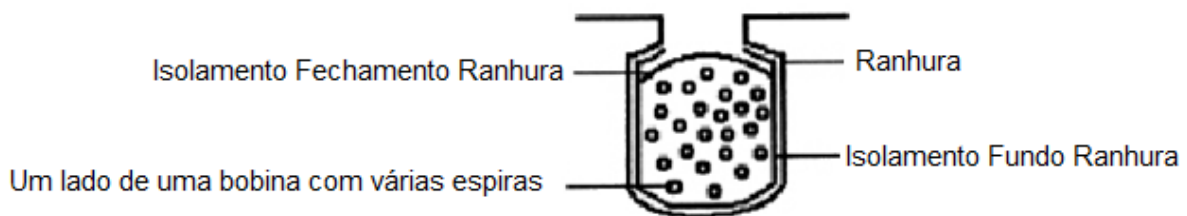


Figura 3.10 - Exemplo de ranhura de camada única

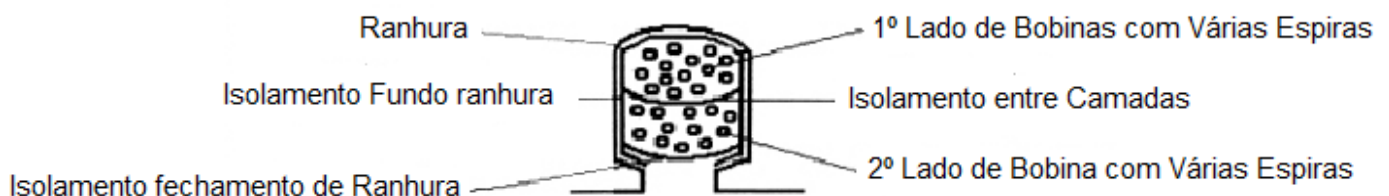


Figura 3.11 - Exemplo de ranhura de camada dupla

3.8- Número de bobinas por grupo:

No caso de a bobinagem ser por polos, vai-se ter em cada fase tantos grupos quanto o número de polos.

Na bobinagem por polos consecuentes vai-se ter um número de grupos por fase igual a metade do número de polos.

Número de Bobinas por Grupo (Válidos para motores Trifásicos):

Depende basicamente da quantidade de ranhuras do motor, do número de polos e do tipo de enrolamento, dado pela fórmula seguinte:

1. Para camada única, por polos, o número de bobinas é dado por:

$$N_B = \frac{N_R}{3 \times P \times 2} \quad (3.3)$$

2. Para camada única, por polos consequentes:

$$N_B = \frac{N_R}{3 \times P} \quad (3.4)$$

3. Para camada dupla por Polos:

$$N_B = \frac{N_R}{3 \times P} \quad (3.5)$$

4. Camada dupla por Polos Consequentes

$$N_B = \frac{2 \times N_R}{3 \times P} \quad (3.6)$$

Onde :

N_R – Número de ranhuras do motor

P – Número de Polos

N_B – Número de bobinas

Em resumo apresenta-se uma tabela com os diferentes tipos de enrolamentos.

Tabela 3.3 - Cálculos associados bobinagem

	Camada Única		Camada Dupla	
	Por Polos	Polos Consequentes	Por polos	Polos Consequentes
Nº de grupos por fase	P	P/2	P	P/2
Nº de Grupos por Conjunto	3P	(3/2)×P	3P	(3/2)×P
Nº de Bobinas por Grupo	NR/(3×P×2)	NR/(3×P)	NR/(3×P)	2NR/(3×P)

3.9 - Associação Grupos de Bobinas

3.9.1 - Interligação em Série:

A Interligação dos grupos em série tem como particularidade oferecer apenas um caminho à passagem da corrente elétrica, a saída de um grupo está ligada à entrada do grupo seguinte.

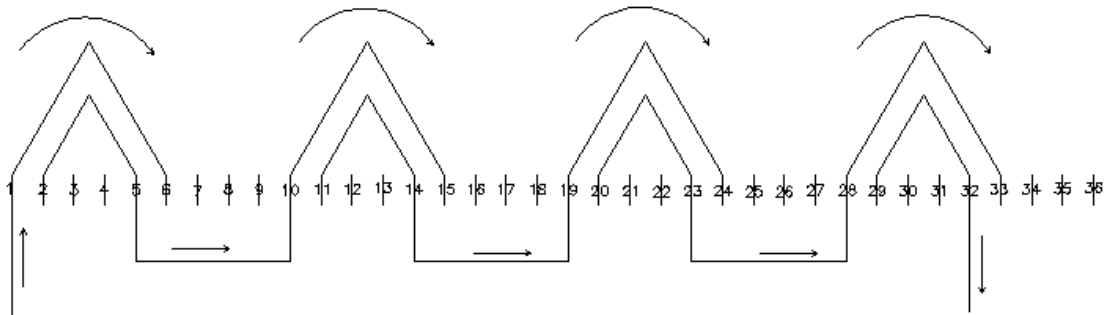


Figura 3.12 - Ligação de grupo em série (motor 8 pólos) por polos consequentes

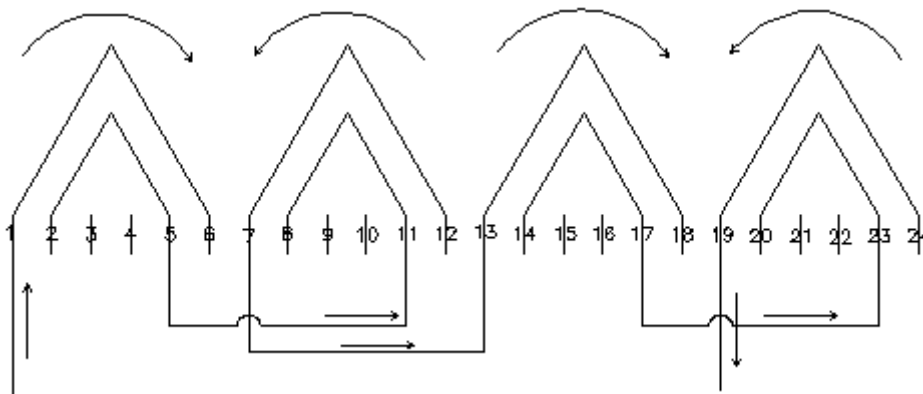


Figura 3.13 - Interligação de grupos em série (motor 4 pólos) por polos

Principais características de uma interligação em série de grupos:

- Por se encontrarem ligados em série a corrente é igual em qualquer ponto da fase.
- No caso de se interromper a corrente em qualquer grupo de bobinas toda a fase deixara de estar energizada.
- A tensão ficará dividida de igual modo ao longo de todos os grupos que constituem a fase.
- A resistência total de toda a fase é igual à soma da resistência de cada grupo.

3.9.2 - Interligação em paralelo:

A interligação em paralelo ao contrário do que acontecia na interligação em série, caracteriza-se por oferecer dois ou mais caminhos à passagem da corrente elétrica. Neste caso cada grupo de bobinas é alimentado de forma independente:

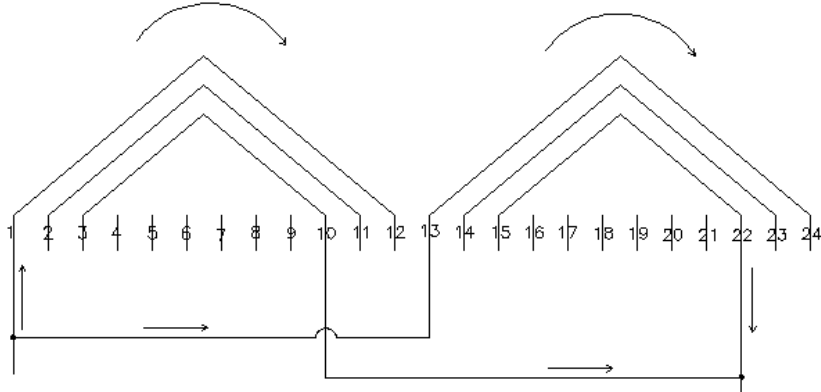


Figura 3.14 - Interligação de grupos em paralelo

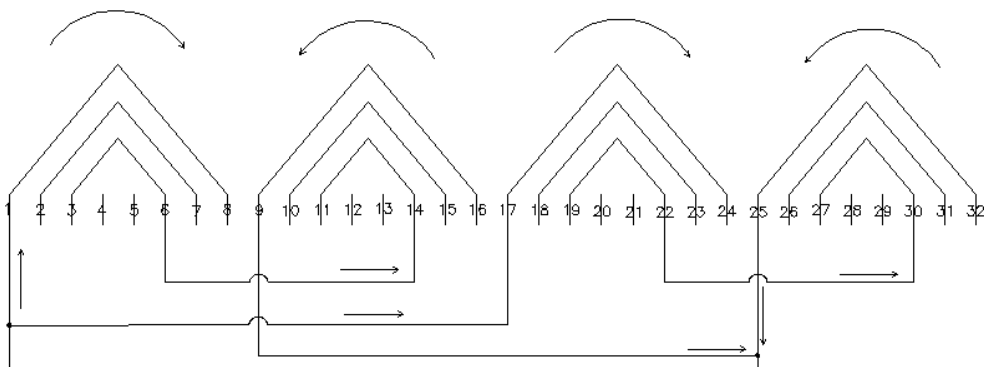


Figura 3.15 - Interligação de grupos em paralelo (2 × paralelo)

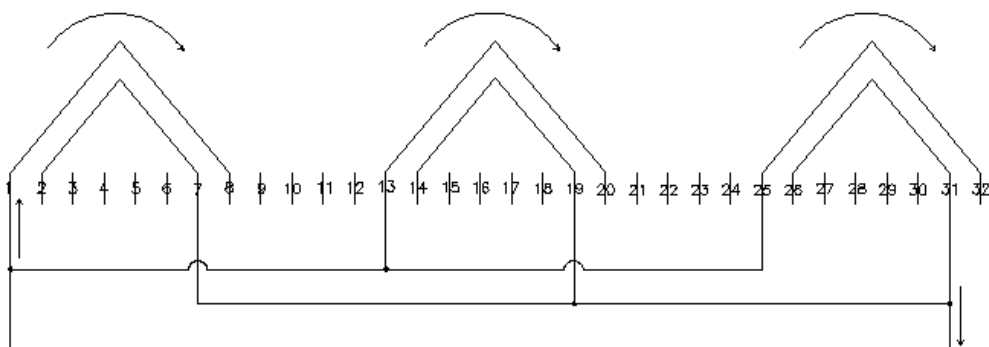


Figura 3.16 - Interligação de grupos em paralelo (3 × paralelo)

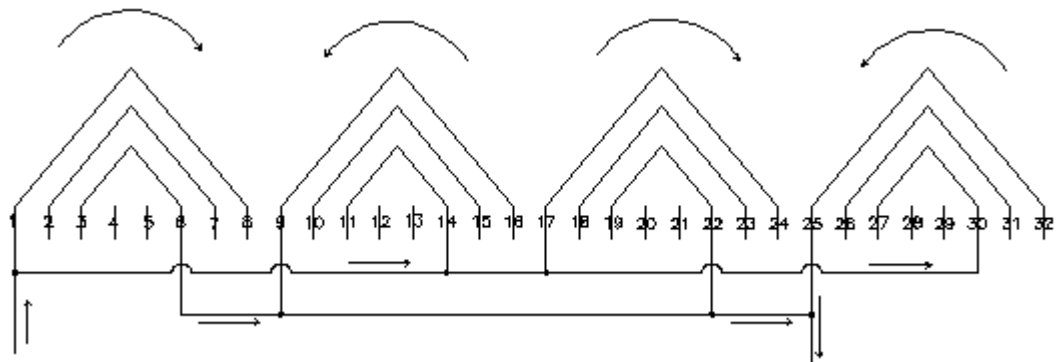


Figura 3.17 - Interligação de grupos em paralelo (4× paralelo)

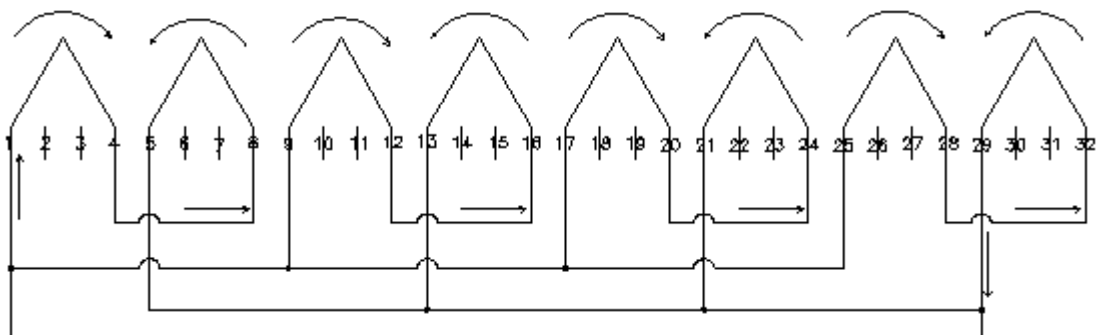


Figura 3.18 - Interligação de grupos em paralelo (4× paralelo)

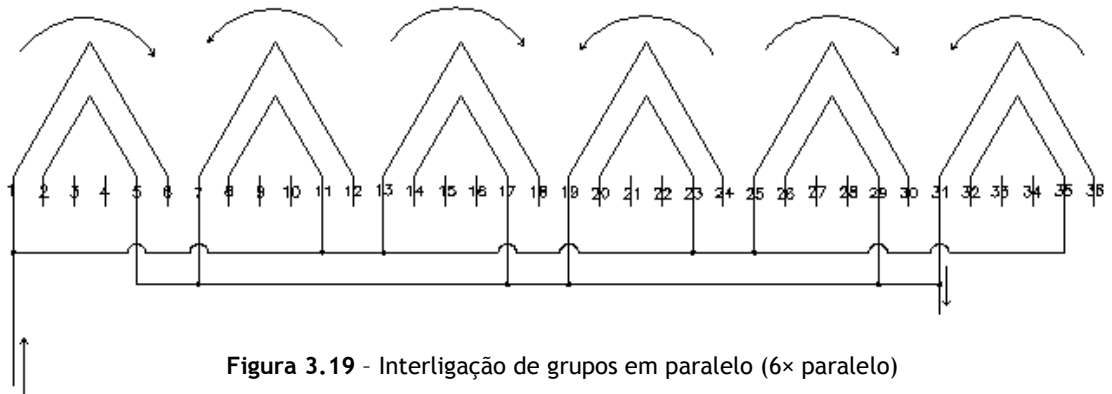


Figura 3.19 - Interligação de grupos em paralelo (6× paralelo)

Principais características de uma interligação em paralelo de grupos:

- A tensão em grupos que se encontrem em paralelo é a mesma.
- A corrente total de uma fase é dividida igualmente por todos os grupos de bobinas.
- A interrupção de alimentação de um grupo, não afecta os restantes grupos.
- A Resistência total de toda a fase é igual à soma dos inversos das resistências de cada grupo.

No anexo C é apresentada uma configuração do motor que tem como princípio a alteração do número de polos pela mudança da configuração da ligação das bobinas.

Pode-se reter pela teoria fundamental das máquinas elétricas rotativas que o torque fornecido pelo motor de indução é directamente proporcional ao produto do fluxo magnético pela corrente elétrica [18], por sua vez o fluxo no entreferro da máquina depende da maneira como as bobinas são ligadas (se em paralelo se em série, em ligação direta ou em oposição, com configurações Y ou Δ). Conclui-se assim que todas as configurações de ligação das bobinas estão directamente ligadas com o projeto da máquina.

3.10 - Formação de polos

Quando se tem uma quantidade de grupos igual ao número de polos (interligação por polos), independentemente de a ligação entre grupos ser em série ou em paralelo, todos os grupos da fase deverão ter a chamada ligação em oposição. Quer isto dizer que o fim de um grupo deverá ser ligado ao fim do grupo seguinte e o começo com o começo do próximo.

Quando se tem um grupo de bobinas por par de pólos (interligação por pólos consequentes) independentemente de os grupos estarem ligados em série ou em paralelo, todos os grupos da fase deverão ter a chamada ligação direta, quer isto dizer que o fim de um grupo deve ser ligado ao início do grupo seguinte.

O objectivo é garantir a inversão do sentido da corrente entre os sucessivos grupos de bobinas, num instante a corrente circula no sentido horário num grupo e no instante a seguir ela inverte o sentido e passa a circular no sentido anti - horário no outro. Sempre que há inversão do sentido da corrente entre grupos há formação de polos.

Tabela 3.4 - Relação do número de polos com o número de grupos de bobina por fase.

Número de polos	Grupos de bobinas/ fase
2	2
4	2 ou 4
6	3 ou 6
8	4 ou 8

As *figuras 3.20 e 3.21* representam a ligação em sequência direta, em que um grupo de bobinas forma um par de polos. Observa-se que existem quatro inversões do sentido da corrente o que provoca a formação de 4 polos, isto é, formam-se dois polos por grupo de bobinas.

As *figuras 3.22 e 3.23*, representam a ligação em oposição, em que dois grupos de bobinas formam um par de polos, neste caso constata-se que existem apenas duas inversões do sentido de corrente.

Estes tipos de ligação são independentes de os grupos serem ligados em série ou em paralelo, com grupos de bobinas concêntricas ou imbricadas, em bobinas de camada única ou dupla.

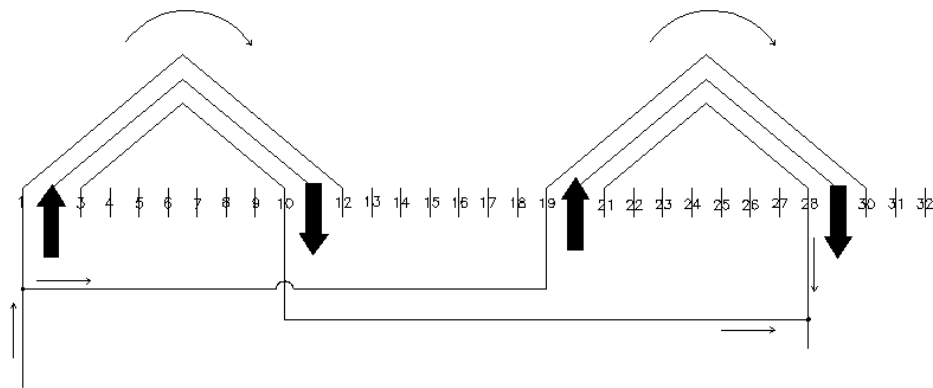


Figura 3.20 - Ligação em paralelo dos grupos em sequência direta.

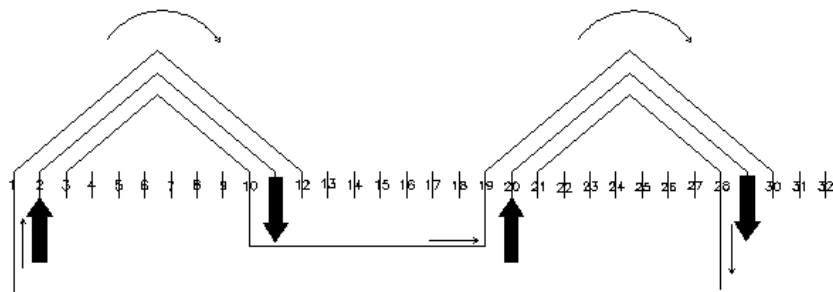


Figura 3.21 - Ligação em série dos grupos em sequência direta.

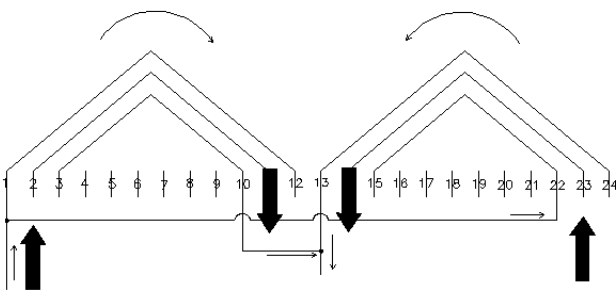


Figura 3.22 - Ligação em paralelo dos grupos / ligação em oposição.

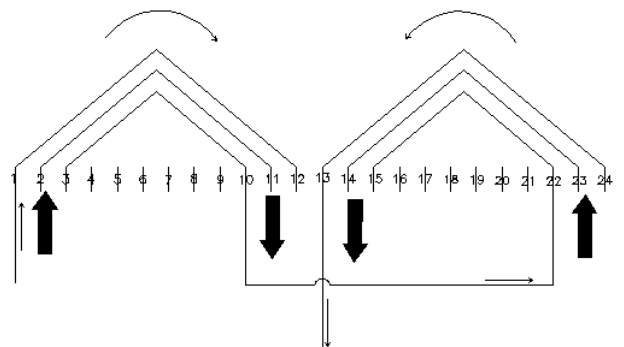


Figura 3.23 - Ligação em série dos grupos / ligação em oposição.

3.11 - Cálculos associados à bobinagem de motores

Para o cálculo dos dados de bobinagem existem algumas considerações que devem ser tomadas em conta, para uma eficaz aplicação destas regras utiliza-se na maioria das vezes como unidade de medida o número de ranhuras. O enrolamento de um motor costuma ser esquematizado de forma planificada para uma melhor visualização e melhor entendimento do esquema de bobinagem, as ranhuras do estator são numeradas em sequência o que leva a que qualquer ranhura do estator possa ser considerada como referência, ranhura número 1. Geralmente considera-se a ranhura número 1 a ranhura que acomoda o lado da primeira bobina do primeiro grupo de bobinas da primeira fase.

É possível definir-se algumas relações associadas à bobinagem de motores, deve-se no entanto ter em consideração que as relações apresentadas não se aplicam para motores em que sejam utilizados enrolamentos de camada mista ou para motores que possuam enrolamentos nos quais os grupos tenham diferente número de bobinas.

$$P_p = \frac{NR}{P} \quad (3.7)$$

$$P_f = \frac{2}{3} \times P_p \quad (3.8)$$

$$P_g = \frac{2 \times P_p}{N_g} \quad (3.9)$$

Quando o enrolamento for de camada única todos os passos apresentados em cima deverão resultar em números inteiros, caso contrário não se pode aplicar estas regras para os enrolamentos. Em relação ao passo de bobinas existem duas considerações que devem ser tomadas em conta. Para o caso dos enrolamentos serem imbricados as bobinas apresentam todas o mesmo passo. No caso de as bobinas serem concêntricas, determina-se o passo médio das bobinas. No arranjo concêntrico de bobinas, a diferença entre duas bobinas consecutivas é sempre igual a 2. Quando o número de bobinas por grupo for ímpar, o passo médio das bobinas será aplicado à bobina central *figura 3.24*. Se por sua vez o número de bobinas for par, a bobina central interna terá passo médio subtraído de um, e a bobina central externa, somado de um como se pode verificar pela *figura 3.25*. [1]

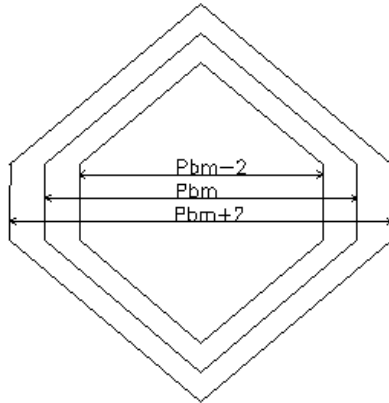


Figura 3.24 - Grupo de bobinas concêntricas com número ímpar de bobinas.

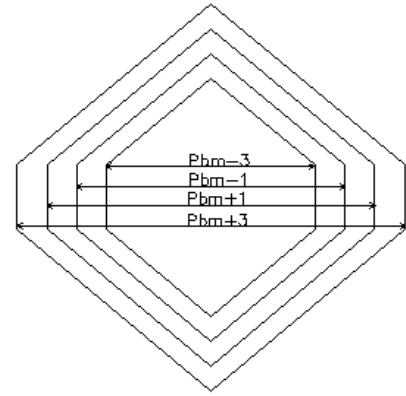


Figura 3.25 - Grupo de bobinas concêntricas com número par de bobinas.

Para a situação em que o enrolamento é de camada única o passo da bobina é dado por:

$$P_b = P_p \text{ se } P_p < P_g \quad (3.10)$$

$$P_b = P_p - N_b \text{ se } P_p = P_g \quad (3.11)$$

Onde,

$$N_b = \frac{P_p}{3 \times N_g} \quad (3.12)$$

A situação ótima seria que o passo das bobinas fosse igual ao passo polar para uma melhor distribuição do fluxo magnético no interior do entreferro do motor. O passo do grupo de bobinas é fixado pela geometria, e quando coincide com o passo polar, não existe outra hipótese a não ser o encurtamento do passo da bobina em relação ao passo polar. Bobinas com o passo encurtado devem ter um maior número de espiras para compensar a distorção do fluxo magnético no entreferro. [1]

Se o enrolamento for de camada dupla, o passo polar deverá ser múltiplo de 0,5 e os restantes parâmetros inteiros. Caso contrário, não se aplicam as expressões enunciadas acima. Na maior parte dos casos os enrolamentos de camada dupla são diametrais, isto é, o passo polar é igual ao passo do grupo ($P_p = P_g$), isto porque são enrolamentos com número de grupos igual a 2, dois grupos de bobinas por fase e por par de pólos. Não existe nenhum impedimento geométrico por a ranhura possuir dois lados de bobina para não se fazer o passo

da bobina igual ao passo polar ($P_b=P_p$). No entanto para se melhorar as condições de partida costuma-se encurtar o passo da bobina, sendo assim tem-se:

$$P_p - N_b < P_b < P_p \quad (3.13)$$

Em que:

$$N_b = \frac{2 \times P_p}{3 \times N_g} \quad (3.14)$$

Onde,

P - Número de Polos

NR - Número de ranhuras estator

P_p - Passo Polar

P_g - Passo do grupo

P_f - Passo da fase

P_b - Passo bobinas

N_g - Número de bobinas por fase e por par de polos (1 ou 2)

N_b - Número de bobinas dos grupos

3.12 - Desenho de esquemas trifásicos

Para a realização da bobinagem de um motor é necessário ter em conta o posicionamento dos grupos ao longo de todo o estator. Pretende-se assim otimizar o desempenho pela correcta colocação dos grupos por forma aos mesmo ficarem simetricamente distribuídos em toda a periferia do estator.

- **Cálculo de Distribuição:** Utiliza-se para o posicionamento dos grupos de bobinas no estator, para que fiquem simetricamente distribuídas pela fase.

$$D = \frac{NR}{N^{\circ} G/F} \quad (3.15)$$

- Cálculo de defasagem: Permite estabelecer a distância medida em ranhuras à qual se inicia a fase seguinte.

$$\theta = \frac{2 \times NR}{3 \times N^{\circ} P} \quad (3.16)$$

Onde,

D – Distância em ranhuras a partir da qual começam os restantes grupos de uma fase.

NR – Número de ranhuras estator

N^o G/F – Número de grupos por fase

N^o P – Número de polos

θ – Distância em ranhuras à qual se inicia a fase seguinte

3.12.1- Dimensionamento de bobinas

O dimensionamento que se apresenta é utilizado em motores de potência inferior a 50 Cv, de indução trifásicos totalmente fechados e com ventilação externa. A aplicação deste tipo de dimensionamento é sugerida para o caso de rebobinagem.

Neste cálculo é determinado o número de espiras por bobina e a bitola do fio a ser empregado.

O comprimento do passo polar é dado por:

$$P_p = \frac{\pi \times D_i}{P} \quad (3.17)$$

$$\Phi = \frac{B \times P_p \times L}{10^6} \quad (3.18)$$

É então possível nesta altura o cálculo do número de espiras por fase que é dado da seguinte forma:

$$N_f = \frac{V}{4,44 \times \Phi \times f \times \xi} \times \frac{k \times k_1}{k_2} \quad (3.19)$$

Por fim o número de espiras por bobina é dado por:

$$N_e = \frac{3 \times N_f}{NR} \quad (3.20)$$

O valor de N_e deve ser um número inteiro. Por sua vez o valor de ξ é dado na *tabela 3.5* em função do número de polos, do número de ranhuras e do passo médio do enrolamento.

Tabela 3.5 - Dados para a escolha ou para se alterar o passo do enrolamento.

Nº de Ranhuras do estator				P	Z (%)	ξ	P	Z (%)	ξ	P	Z (%)	ξ
2 polos	4 polos	6 polos	8 polos									
12	24	36	48	1:7	0	0.966	1:6	3.6	0.934	1:5	15.4	0.837
				1:4	41.2	0.684						
18	36	54	72	1:10	0	0.96	1:9	1.5	0.945	1:8	6.4	0.902
				1:7	15.2	0.832	1:6	30.8	0.735			
24	48	72	96	1:13	0	0.958	1:12	1.2	0.946	1:11	3.6	0.926
				1:10	8.2	0.885	1:9	15.4	0.83	1:8	26.0	0.76
				1:7	41.0	0.678						
30	60	90	-	1:16	0	0.957	1:15	1	0.947	1:14	2.3	0.935
				1:13	5.1	0.91	1:12	9.5	0.874	1:11	15.2	0.829
				1:10	23.7	0.774	1:9	35	0.71			
36	72	-	-	1:19	0	0.956	1:18	0.8	0.948	1:17	1.5	0.942
				1:16	3.5	0.923	1:15	6.3	0.898	1:14	10.2	0.866
				1:13	15.2	0.829	1:12	22	0.783	1:11	30.8	0.732
48	96	-	-	1:25	0	0.955	1:24	0.8	0.948	1:23	1.2	0.944
				1:22	1.9	0.937	1:21	3.3	0.923	1:20	6.0	0.902
				1:19	8.2	0.881	1:18	11.4	0.856	1:17	15.2	0.827
				1:16	20.2	0.794	1:15	26.0	0.757	1:14	33.1	0.716

Em que os dados da *tabela 3.5* representam:

P – Passo médio do enrolamento

Z – % de espiras a mais por passo do enrolamento encurtado

ξ – Fator de enrolamento

A secção do fio para o fabrico das bobinas é dada por:

$$S = \frac{I \times K_2}{\sqrt{3} \times J \times K_1} \quad (3.21)$$

Pode-se ainda fazer uma verificação do dimensionamento pela análise do fator de enchimento que é dado por:

$$FE = \frac{Sc}{SR} \quad (3.22)$$

Onde,

D_i = Diâmetro interno do estator (cm)

P = Número de Polos

$K = 1$ para camada única $K = 2$ para camada dupla.

K_1 = Número de ligações em paralelo para a tensão especificada.

$K_2 = 1$ para ligação em triângulo $K_2 = 1,73$ para ligação em estrela

V = Tensão da rede (V).

f = Frequência da rede (Hz).

NR = Número de ranhuras do estator.

S = Secção de cobre do fio (mm^2).

J = Densidade de corrente (A/mm^2).

$J = 7$ (A/mm^2) para motores com potências inferiores a 10 cv .

$J = 5,5$ (A/mm^2) para motores com potências superiores a 10 cv .

SC = É a área total de cobre contida na ranhura.

SR = É a área total da ranhura.

Φ = Fluxo magnético dado em Weber.

P = Número de polos.

L = Comprimento do pacote (cm).

B = Indução Magnética estimada no entreferro (5 kgauss)

N_e = Número de espiras por bobina

N_f = Número de espiras por fase

Valores muito baixos do factor de enchimento deixam as espiras de cobre muito soltas dentro da ranhura, e valores muito altos do fator de enchimento dificulta a inserção das bobinas nas ranhuras.

A tabela que se segue fornece algumas orientações para o fator de enchimento em função da área da ranhura:

Tabela 3.6 - Fator de enchimento em função da área da ranhura

SR (mm ²)	FE
30	0.28
50	0.32
75	0.37
100	0.40
150	0.43

Capítulo 4

Qualidade no Processo de Fabricação de Motores de B.T

A qualidade de um produto é uma questão que deve estar sempre presente ainda mais por estarmos face a um mercado de exigências extremamente competitivo. Por isso mesmo todo o processo de fabrico de motores tem por base criteriosos métodos de aumento de qualidade dos produtos.

A qualidade na fabricação de motores tem como áreas de intervenção:

- ✓ Defeitos na bobinagem
- ✓ Defeitos na montagem
- ✓ Defeitos de campo
- ✓ Refugos

Defeitos na bobinagem compreendem todos os defeitos registados desde a colocação do isolamento de fundo de ranhura até ao momento em que é prensada a carcaça no estator bobinado. Os defeitos na montagem compreendem defeitos em todo o processo de montagem depois da prensagem da carcaça no estator bobinado até chegada ao acabamento final (pintura). Defeitos de campo são defeitos que ocorrem nos motores que já estão em funcionamento em posse dos clientes que por ventura podem apresentar defeitos que não tenham sido detectados durante o fabrico dos mesmos. Existe ainda a questão relacionada com o refugo, pode ser refugo de carcaça fofo (ferro fundido), refugo de isolantes, refugo de alguns componentes como por exemplo chapas de estator grampeado, cabos, tampas deflectoras, rolamentos. De entre os defeitos e refugos, são os refugos de fio de cobre que apresentam a maior perda económica no processo de fabricação de motores. Neste capítulo será analisado os defeitos na bobinagem e apresentado um estudo de refugo de cobre.

4.1 - Defeitos na Bobinagem

Os defeitos de bobinagem apresentados neste capítulo dizem respeito aos estatores bobinados que vão equipar os motores das carcaças 280/315 produzidas na fábrica III. Será explicado em que consiste cada um dos defeitos encontrados e quais as suas causas. Para além disso será exposto um estudo de refugo de cobre.

Foi realizado durante 45 dias um levantamento dos principais defeitos. Para o período de tempo considerado, foram registados um total de 67 defeitos dividindo-se os mesmos da forma representada no *gráfico 4.1*. (O percentual de cada defeito não foi revelado por ordem da WEG). Será detalhado mais à frente os defeitos encontrados.

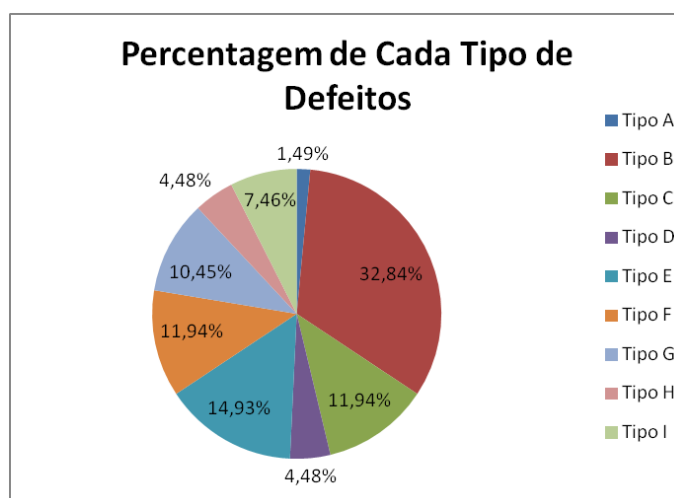


Gráfico 4.1 - Percentual de cada tipo de defeitos.

Tendo-se em conta o número de motores produzidos das carcaças 280 / 315 e o número de defeitos registados obteve-se um percentual de 1.15 % de motores com defeito indicados no *gráfico 4.2*.

Produção FAB III actual	Produção diária	Dias de estudo	Produção 45 dias
280/315	130	45	5850
225/250	195		8775
Total	325		

Tabela 4.1 - Quantidade de Motores produzidos no período de estudo por carcaça

Percentagem de Motores com Defeito

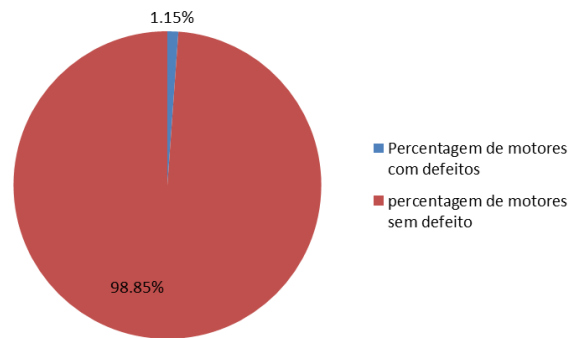


Gráfico 4.2 - Percentual de motores com defeito

4.1.1 - Principais defeitos no processo de fabrico de motores elétricos:

Cabos Cortados:

Os cabos são cortados geralmente depois da impregnação por gotejamento, isto acontece porque depois da impregnação antes de o estator já impregnado entrar no túnel de resfriamento existe a necessidade de se limpar o verniz que se acumula nos cabos de ligação, o operador utiliza um alicate para picar o excesso de verniz que se acumulou. Se este não tiver o cuidado necessário, factor que aliado a um material dilatado com a temperatura do verniz (silicone de pouca resistência mecânica) acaba por haver corte de cabos. Outro problema que estava a existir e que foi de certa forma acautelado era a questão de armazenamento dos estatores já impregnados, devido ao elevado número de estatores em estoque antes de irem para a prensagem da carcaça, a movimentação dos mesmos provocava choques entre eles e muitas vezes acabava-se a ter cabos cortados. Por último outro posto onde podem ocorrer cortes em cabos é na prensagem da carcaça no estator. Neste caso o retrabalho é demorado.

Ligações erradas:

A principal causa das ligações erradas é falta de atenção do operador, inexperiência, sistematização do processo e falta de verificação de alguma condição especial presente na nota de operação. Neste caso o retrabalho é rápido.

Bobina Trocada:

A principal causa de bobinas trocadas (bitolas de fio trocadas, engano no perímetro das bobinas) deve-se principalmente a desatenção do operador a observar a N.O o retrabalho é

demorado e os custos elevados, na maioria dos casos as bobinas são sucateadas perdendo-se o valor económico do cobre mais o custo de todo o processo de recuperação do estator (Mão de Obra, Recursos Materiais).

Fases Desfasadas:

Este defeito deve-se a uma incorrecta soldagem das ligações. Num sistema trifásico equilibrado como deve ser a configuração dos enrolamentos de um motor as fases devem estar desfasadas de 120 graus, caso as ligações não sejam correctamente executadas este desfasamento vai dar um valor diferente, caso não fosse detetado haveria um desequilíbrio de correntes nos enrolamentos o que levaria a um incorrecto funcionamento do motor. O retrabalho para este tipo de defeito é rápido.

Surto / Choque:

A principal causa deste defeito está relacionada com falhas / defeitos no sistema de isolamento do motor, a causa deste defeito pode ser isolamento de fundo de ranhura estourado / mal posicionado (curto - circuito entre bobina e massa), isolamento entre camadas danificado / Rasgado / Deslocado (curto - circuito entre fases / entre espiras da mesma fase), espiras de fio com o isolamento deteriorado são muitas vezes responsáveis por curto circuitos, isoladores entre fases deslocados e isoladores de fechamento de ranhura danificados podem também provocar c.c no bobinado do motor, a não colocação de estecas para motores com enchimento baixo pode com o passar do tempo comprometer a qualidade do produto por os condutores se encontrarem soltos sujeito a vibrações devido aos esforços electrodinâmicos sobre os mesmos. O retrabalho para este tipo de defeito é relativamente rápido no entanto dependente de qual isolante apresenta problema, o motor é enviado para recuperação.

Bobinas com o isolamento danificado:

A principal fonte de bobinas arranhadas é a máquina de amarrar as cabeças de bobinas, pode também ocorrer este problema na inserção manual e mecanizada, na inserção mecanizada se a máquina não estiver corretamente calibrada vai ser inevitável a ocorrência deste problema, na inserção manual se os operadores não tiverem o devido cuidado pode ocorrer de igual forma este problema. Este problema agrava-se quando o fator de enchimento do motor é elevado. O retrabalho é reduzido se for possível aplicar uma fita isoladora de material com características de isolamento semelhante ao esmalte aplicado no revestimento do fio de cobre.

Resistência alta / baixa:

Este problema deve-se a erros na fabricação das bobinas (bobinas com espiras a mais ou a menos, erro de bitola de fios, ou a soldas mal executadas os problemas expostos devem-se

essencialmente a desatenção \ inexperiência do operador. Os centros onde são causados os erros são nas bobinadeiras e na parte das soldagens das ligações. O motor é enviado para recuperação e o retrabalho pode ser demorado caso seja necessário substituir as bobinas, custo de retrabalho elevado. Se o problema for ligações mal executadas o retrabalho é rápido.

4.2 - Ensaios realizados para a redução de refugo de cobre

Segundo dados consultados fornecidos pelo controle de qualidade, a Fábrica III ultrapassa as metas estabelecidas para refugo de cobre . Face a estes dados, foi-se em busca do problema tendo-se identificado umas das principais causas deste refugo elevado.

O refugo gerado deve-se a um corte sem controle nas bobinadeiras, não existe um sistema implementado que dê orientação onde se deve cortar a ponta para que fique do tamanho especificado.

O operador quando inicia a fazer bobinas para um tipo de motor vai à nota de operação vê qual o valor especificado das pontas pega numa fita métrica (trena) e vê aproximadamente onde a ponta deve ser cortada, no entanto este método é totalmente ineficaz e ao fim de uma série de bobinas as pontas começam a ser cortadas acima do valor, nesta situação é melhor que as pontas sejam cortadas com tamanho superior ao especificado do que com tamanho inferior o que podia levar a que quando o motor chegasse à parte das ligações não fosse possível ligar e ao fazer-se as soldas estas poderiam não ficar com qualidade por as pontas estarem curtas. Isto implicaria um prejuízo maior do que um excesso de cobre que se possa cortar na parte das soldas das ligações.

Sendo assim foi feito um estudo de refugo de cobre por tipo de motor tendo-se em conta a sua polaridade, a(s) bitola(s) dos fios das bobinas, o seu tipo de ligação, o número de cabos de ligação e a bitola dos cabos de ligação. Com este estudo dá para se ter uma ideia do refugo gerado da maior parte de famílias de motores tendo-se em conta as amostras recolhidas.

Para o estudo foram tiradas amostras de motores: 2 polos ligação série e ligação paralela, 4 polos ligação paralela e 6 polos ligação 3 × paralelo tendo em conta bitolas de fio de 1,18/1,32; 6 cabos de ligação com secção de 50 mm².

4.2.1 - 2 Polos ligação série

Estes motores com 2 polos ligação série apresentam as maiores pontas cortadas de todos os motores testados e apresentam também o maior peso de cobre refugado, este facto deve-se a que as pontas das bobinas são ligadas umas ao lado das outras o que faz com que haja muito refugo de cobre gerado. Isto demonstra que existe inadequação da N.O (nota de operação) para este tipo de motores. A maior ponta cortada foi de 420 mm o que representa um grande comprimento de cobre cortado como se pode observar pelo *gráfico 4.3*.

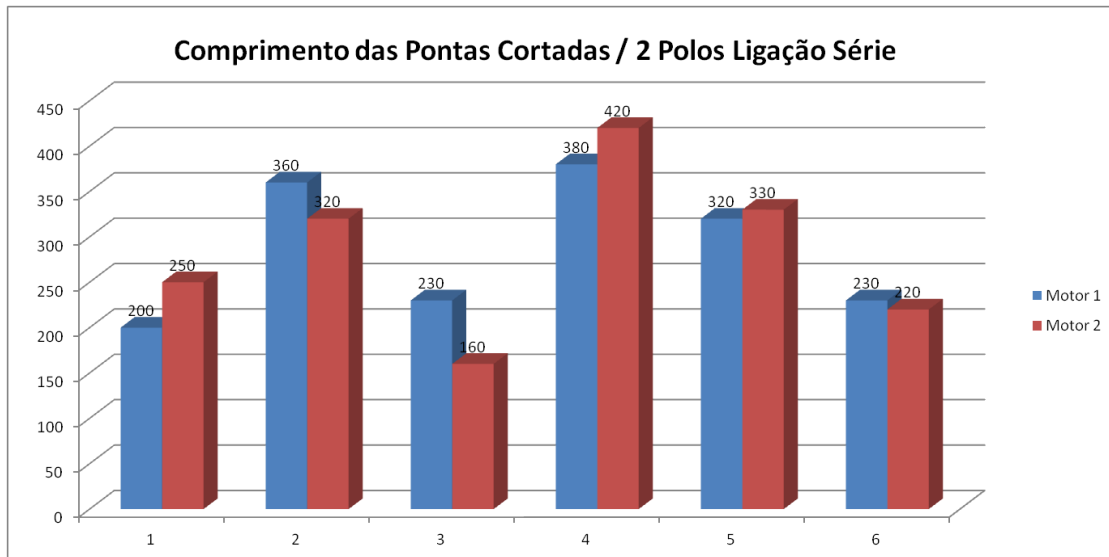


Gráfico 4.3 - Comprimento de pontas cortadas / 2 Polos ligação série

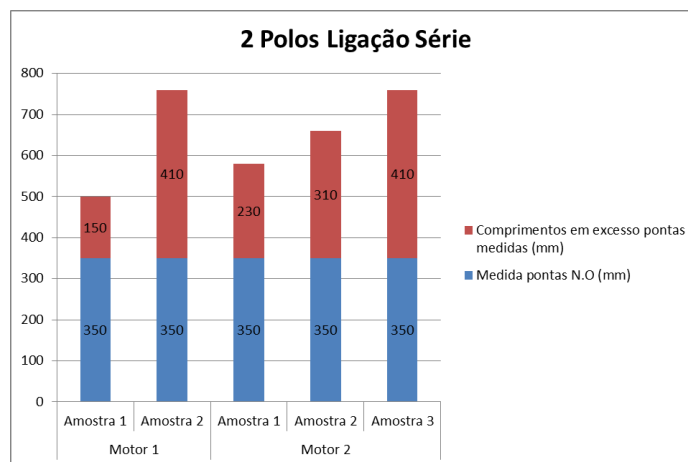


Gráfico 4.4 - Comprimento excesso pontas em relação N.O

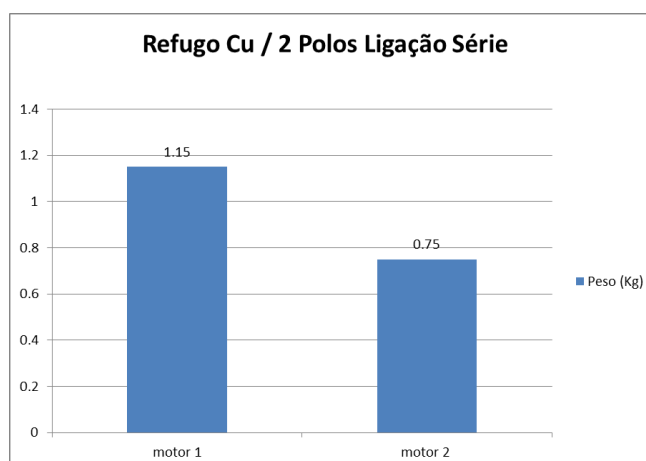


Gráfico 4.5 - Refugo de cobre 2 polos ligação série

4.2.2 - 2 Polos ligação 2 × paralelo:

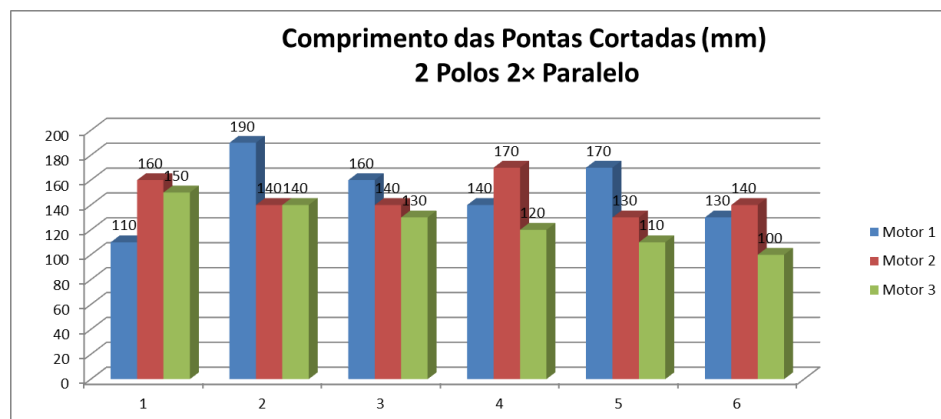


Gráfico 4.6 - Comprimento de pontas cortadas / 2 Polos 2x paralelo

Foram tiradas 3 amostras de motores de 2 polos ligação 2 × paralelo, é possível observar pelo gráfico o que foi dito anteriormente, não existe um controlo de corte de pontas, a ponta menor medida tem 100 mm e a maior tem 190 mm praticamente o dobro do tamanho.

Em relação ao gráfico 4.7, verifica-se uma vez mais um corte de pontas excessiva, a ponta menor medida tinha 30 mm a mais do que devia ter, e a ponta maior tinha 150 mm, uma diferença bastante significativa.

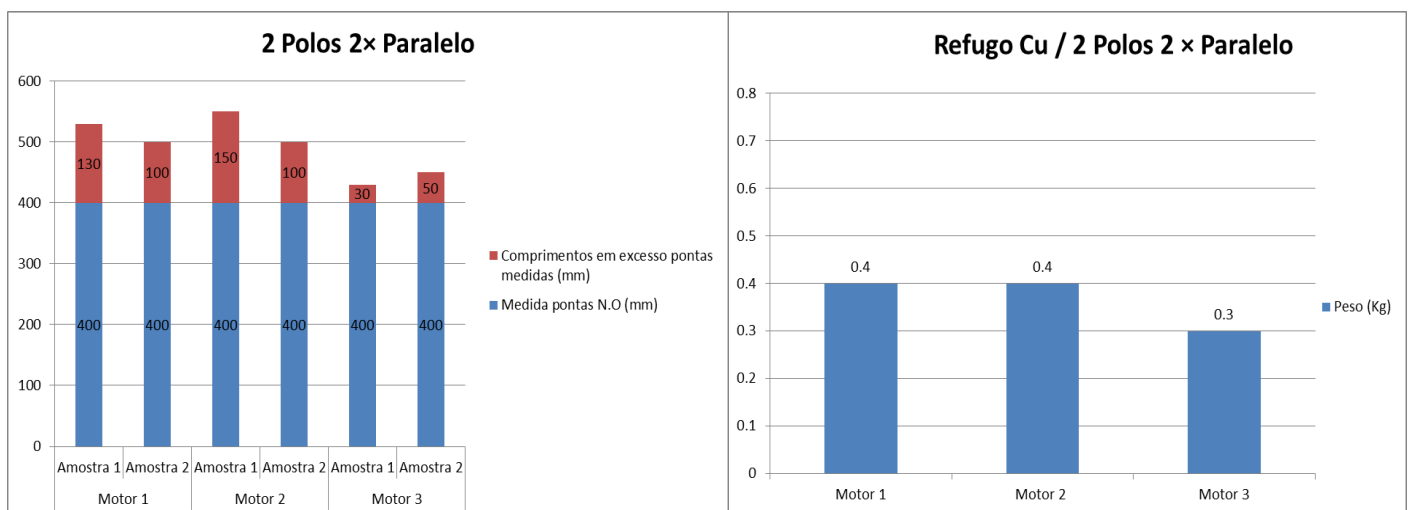


Gráfico 4.7 - Comprimento excesso pontas em relação N.O

Gráfico 4.8 - Refugo de Cobre (kg)

4.2.3 - 4 Polos Ligação 2 × Paralelo:

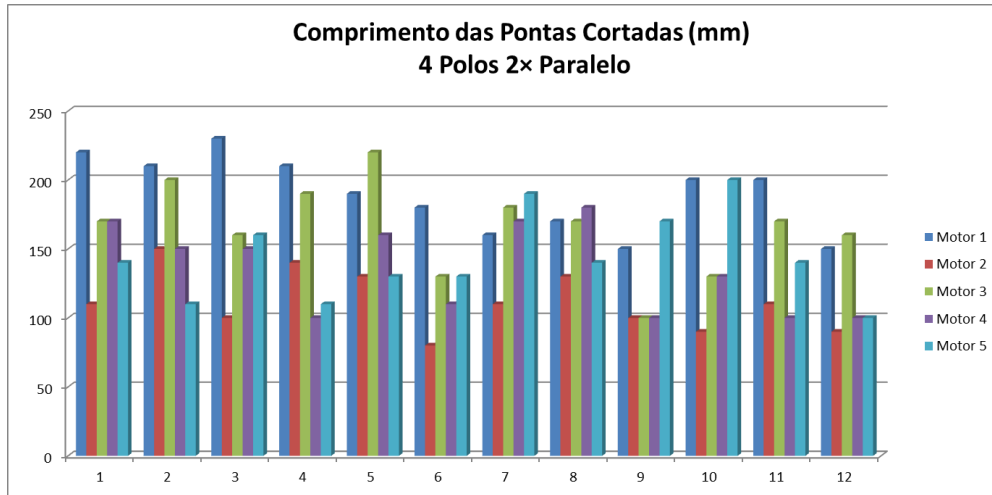


Gráfico 4.9 -Comprimento de pontas cortadas /4 Polos 2 × paralelo

Neste tipo de ligações , existe também uma grande aleatoriedade de comprimentos de pontas cortadas. Este tipo de motor é o motor com mais saída na produção, foram recolhidas 5 amostras de motores com as características enunciadas.

Pelo gráfico 4.10, é possível observar-se que uma ponta tinha um valor inferior ao especificado na N.O no entanto as restantes já tinham um valor de comprimento excessivo.

Este tipo de motores é o segundo motor testado que apresenta maior refugo de cobre em peso de cobre cortado. Apesar de não ser do tipo de motores que apresenta as maiores pontas cortadas, apresenta elevado peso de cobre cortado, isto deve-se ao elevado número de ligações que têm de ser feitas.

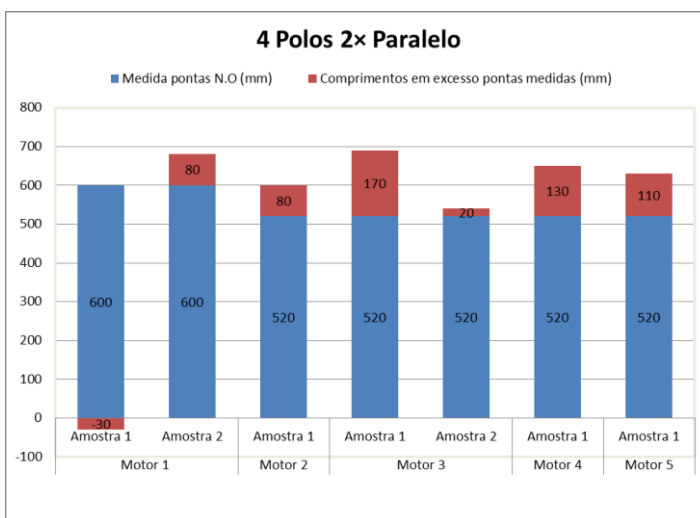


Gráfico 4.10 - Comprimento excesso pontas em relação N.O

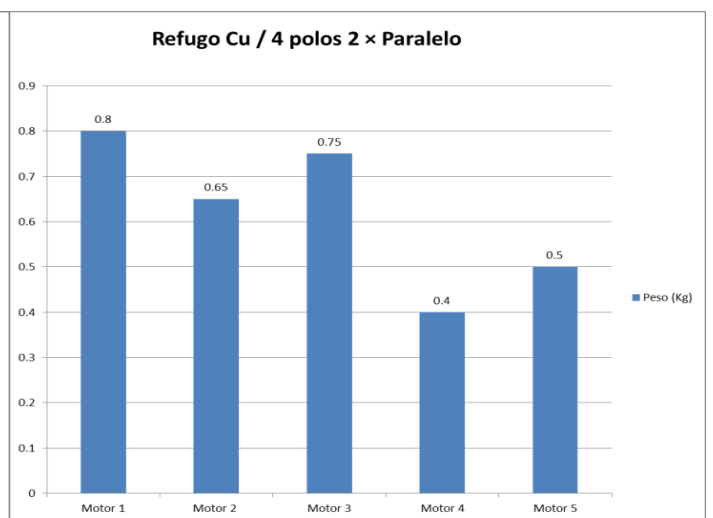


Gráfico 4.11 - Refugo de Cobre (kg)

4.2.4 - 6 Polos Ligação 3 × Paralelo:

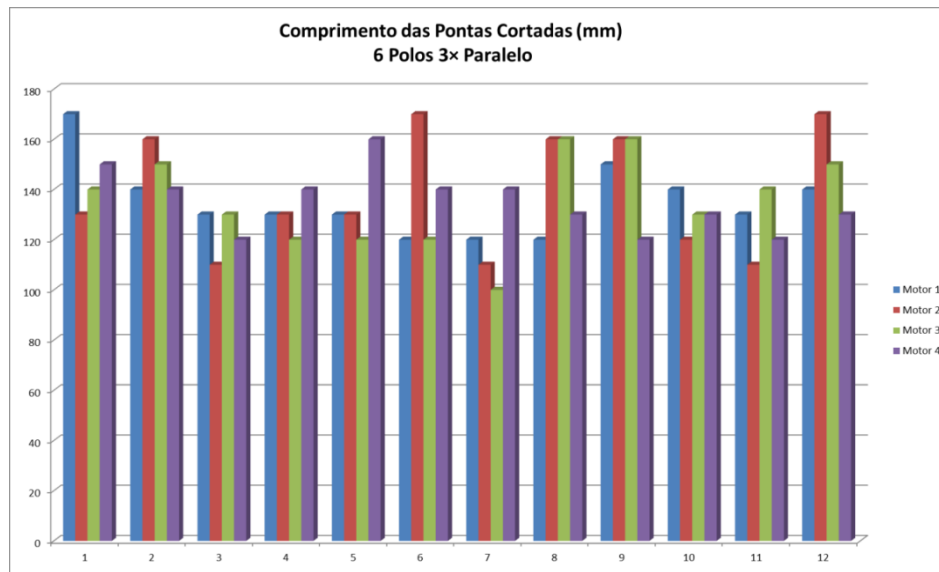


Gráfico 4.12 - Comprimento de pontas cortadas / 4 polos 2 × paralelo

Este motor apresenta também excesso de comprimento de pontas cortadas, é possível observar pelo gráfico 4.13 que a N.O apresentava dois valores de comprimento de pontas 300 mm e 650 mm. O motor é projetado com duas medidas de pontas por causa da distribuição das mesmas ao longo da periferia do estator bobinado tendo em conta o esquema de ligação.

Nota-se claramente que em relação ao valor das pontas mais pequenas o operador na bobinadeira, tem a tendência de as cortar “quase do tamanho das pontas maiores indicadas na N.O”. Em relação às pontas maiores é possível observar que elas são cortadas maiores que o valor indicado mas no entanto esse excesso é menor que nas pontas pequenas.

Este tipo de ligações de motor também apresenta elevado peso de cobre desperdiçado.

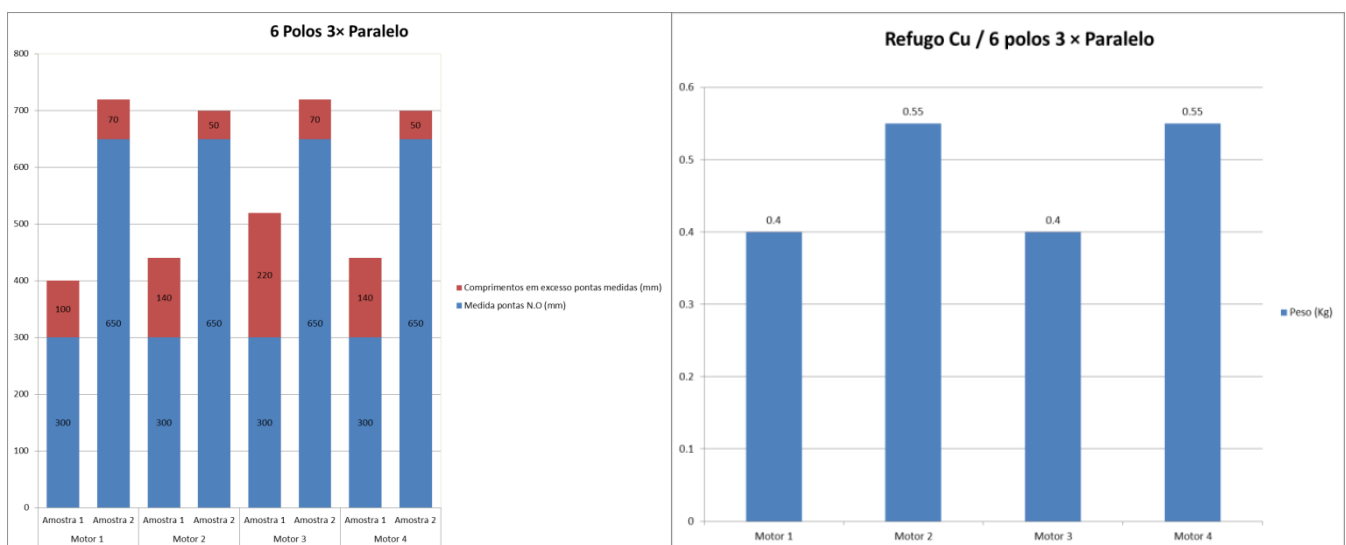


Gráfico 4.13 - Comprimento excesso pontas em relação N.O

Gráfico 4.14 - Refugo de cobre

4.2.5 Comparativo entre os diversos tipos de motores testados

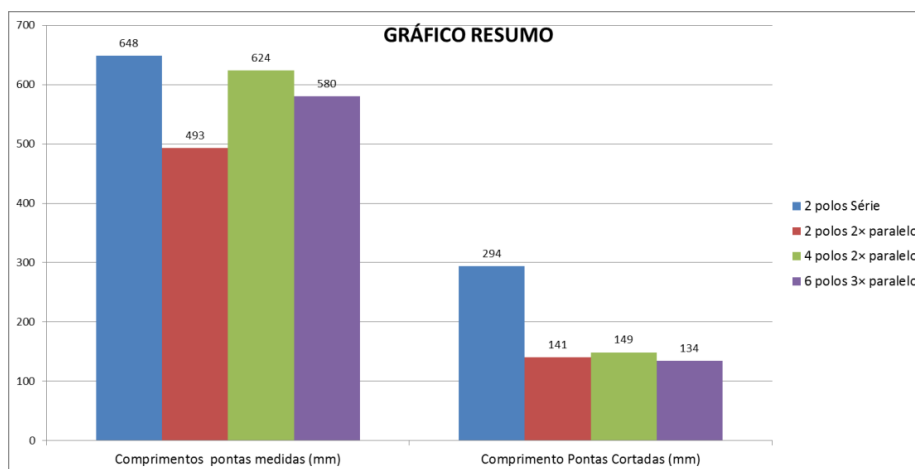


Gráfico 4.15 - Resumo pontas cortadas para cada tipo de motor.

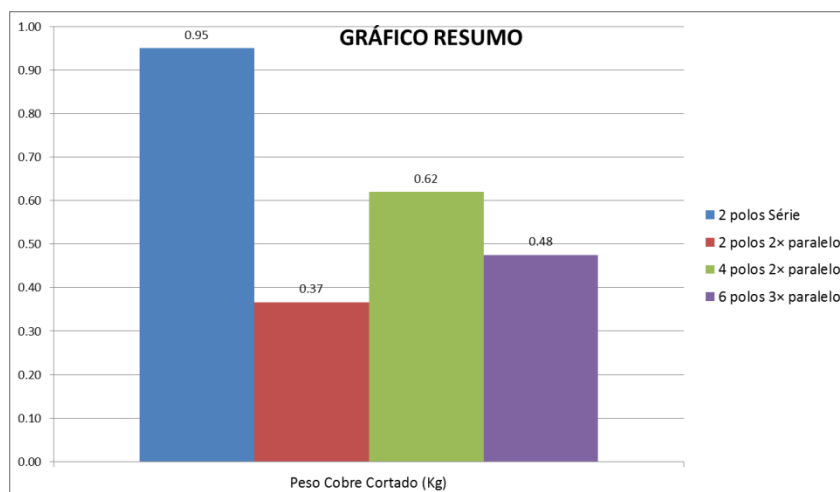


Gráfico 4.16 - Resumo de quantidade cobre cortado para cada tipo de motor

4.3 - Estudo económico:

Para se ter uma noção de valor gasto com refugo de cobre que diz respeito a comprimento de pontas, foram levantados os dados de produção da FAB III no ano de 2011.

Neste levantamento faz-se uma divisão de acordo com as características dos motores para o qual foram tirados valores, assim vai ser possível chegar-se a algumas conclusões de quanto a WEG gasta e quanto poderia poupar se houvesse um método de controle de corte de pontas. No gráfico 4.17 está representado o percentual da produção da fabrica III por tamanho de carcaça.

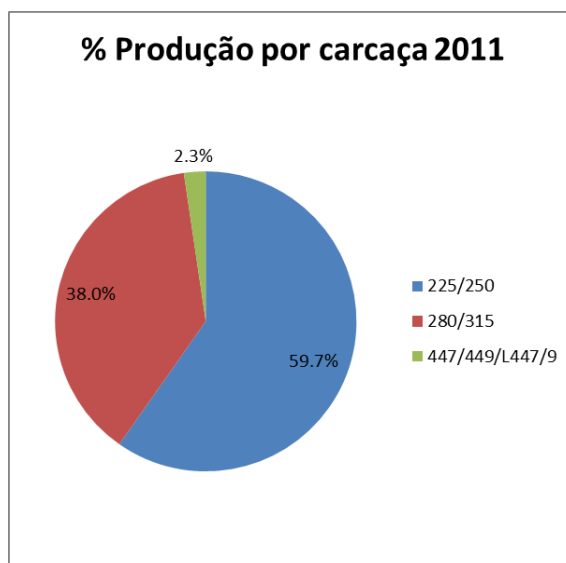


Gráfico 4.17 - Produção por tamanho de carcaça

Na *tabela 4.2* são apresentados os percentuais de motores produzidos com características semelhantes aos motores testados para se ter uma ideia da abrangência do estudo.

Tabela 4.2 - Dados de produção FAB III 2011 motores testados

Produção Ano 2011							
Polaridade	Tipo de Ligação	Número de Cabos	Secção do Cabo (mm)	Nº Mot. 2011	% total Motores Testados	% motores 280/315 testados	% Mot. ≠ Testados
2 Polos	Ligação Série	6	50	1766	2.4%	76.2%	71.1%
2 Polos	Ligação 2× Paralelo	6	50	3291	4.6%		
4 polos	Ligação 2× Paralelo	6	50	12816	17.7%		
6 Polos	Ligação 3× Paralelo	6	50	3018	4.2%		
Totais				20891	29%	76.2%	71.1%

Tabela 4.3 - Produção 2011 em função das bitolas dos cabos de ligação.

Produção Carcaça	Produção 2011	% por bitolas de cabo
280/315	27410	-
Secções Inferiores a 50 mm ²	17473	64%
Secções Iguais a 50 mm ²	8954	33%
Secções superiores a 50 mm ²	961	4%
Total	27410	

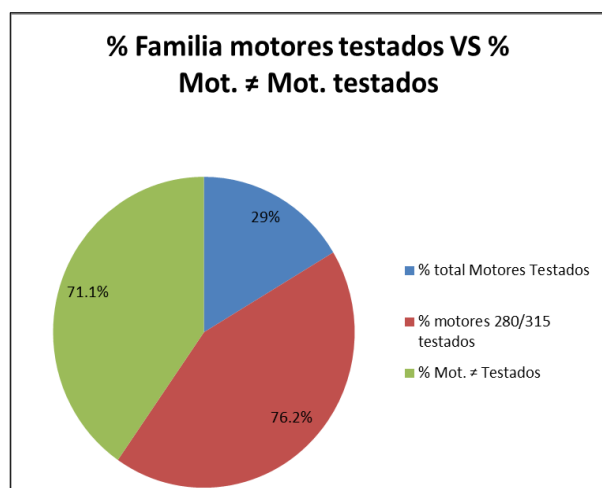


Gráfico 4.18 - % Motores testados vs. % motores não testados.

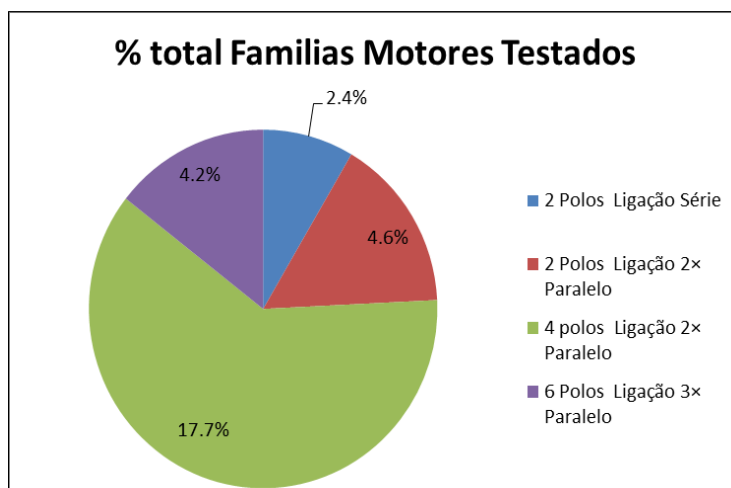


Gráfico 4.19 - % de cada família de motores testados

Pelo *Gráfico 4.18*, acima, é possível observar-se que entre todos os motores produzidos na Fab III em 2011 apenas uma percentagem de 29 % é incluída no nosso estudo considerando-se todas as carcaças, considerando-se as carcaças 280/315 foram considerados um total de 76 % de motores com características iguais aos motores testados. O *gráfico 4.19* representa de entre as carcaças 280/315 a percentagem de cada família de motores testados sendo a esmagadora maioria motores de 4 polos ligação 2 × paralelo.

Os motores testados tinham secção dos cabos de ligação de 50 mm², no entanto foram consideradas todas as secções disponíveis porque como se pode ver pela *tabela 4.3*, no ano de 2011 foram produzidos mais motores com secções inferiores a 50 mm², o que na verdade significa que o refugo será maior do que o considerado porque motores com secções inferiores de cabos de ligação geram mais refugo (é necessário menos comprimento de pontas para se fazer as ligações).

Tendo-se em conta os valores do preço do cobre (WEG) processado e de venda do refugo não divulgados por serem valores restritos à WEG, é possível fazer-se uma estimativa do valor perdido em dimensional de comprimento de pontas utilizando-se os valores indicados na *tabela 4.4*.

Tabela 4.4 - Médias dos dados recolhidos vs dados motores de teste

Tabela de Médias				Tabela motores de Teste
Descrição	Comprimentos pontas medidas (mm)	Comprimento Pontas Cortadas (mm)	Peso Cobre Cortado (Kg)	Peso Cobre Cortado (Kg)
2 polos Série	648	294	0.95	0.45
2 polos 2× paralelo	493	141	0.37	0.25
4 polos 2× paralelo	624	149	0.62	0.40
6 polos 3× paralelo	580	134	0.48	0.25

Tabela 4.5 - Estudo económico com base valores recolhidos.

Comparativo Refugo de Cobre Carcaças 280 / 315											
	Descrição	Comprimentos pontas medidas (mm)	Comprimento Pontas Cortadas (mm)	Peso Cobre Cortado (Kg)	Nº Motores 2011	Peso de cobre cortado (Kg)	Valor Gasto Refugo Cobre R\$	Cobre Poupado (kg) Medio VS teste	Cobre poupado (Kg)	Poupança R\$	Redução Valor gasto Refugo de Cobre Depois do teste R\$
Valores Médios	2 polos Série	648	287	0.95	1766	1677.7	R\$ 4 731.11	0.50	883	R\$ 2 490.06	R\$ 2 241.05
Valores Motor Teste	2 polos Série			0.45							
Comparativo				0.50							
Valores Médios	2 polos 2× paralelo	493	141	0.37	3291	1206.7	R\$ 3 402.89	0.12	383.95	R\$ 1 082.74	R\$ 2 320.16
Valores Motor Teste	2 polos 2× paralelo			0.25							
Comparativo				0.12							
Valores Médios	4 polos 2× paralelo	624	149	0.62	12816	7945.92	R\$ 22 407.49	0.22	2819.52	R\$ 7 951.05	R\$ 14 456.45
Valores Motor Teste	4 polos 2× paralelo			0.40							
Comparativo				0.22							
Valores Médios	6 polos 3× paralelo	580	134	0.48	3018	1433.55	R\$ 4 042.61	0.23	679.05	R\$ 1 914.92	R\$ 2 127.69
Valores Motor Teste	6 polos 3× paralelo			0.25							
Comparativo				0.23							
Total					20891	12264	R\$ 34 584	1.06	4766	R\$ 13 439	R\$ 21 145

Para a realização do estudo económico, foram efetuados testes a quatro motores com as mesmas características dos motores estudados acima. O procedimento foi ir-se às bobinadeiras e depois de serem feitas as bobinas cortar-se a ponta das mesmas com o valor indicado na nota de operação. Em seguida o objectivo era acompanhar-se esse motor até à zona das ligações e ver-se se com as pontas com o comprimento indicado era fácil fazer-se as ligações. Foi concluído que não se compromete a qualidade do processo nem a qualidade das ligações. Em seguida nos postos das soldas foram tiradas as pontas sobranes e tiradas conclusões. Conclusões essas relatadas em seguida de acordo com os dados obtidos. O gráfico 4.20 mostra a poupança conseguida de cobre em cada tipo de motor testado. O gráfico 4.21 mostra a poupança conseguida anual tendo em conta todo o estudo feito anteriormente.

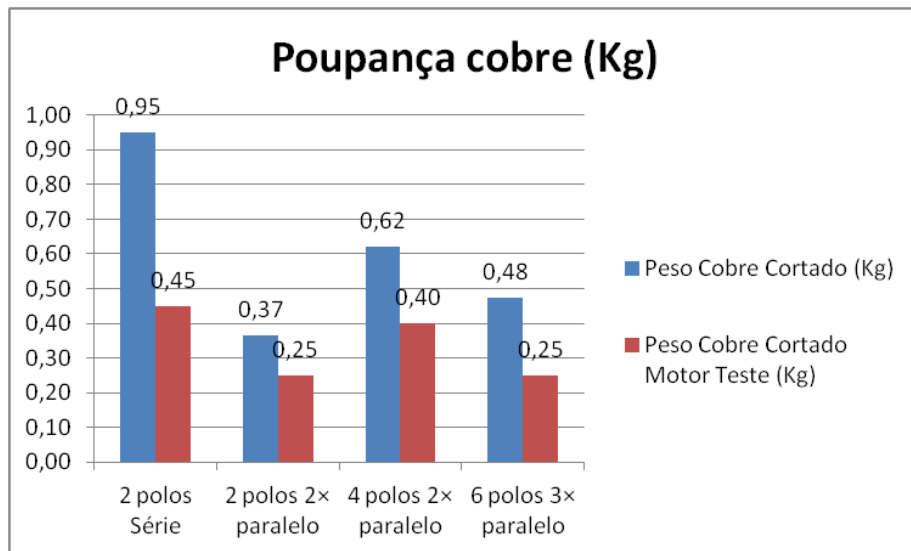


Gráfico 4.20 - Poupança de Cobre para os motores testados (Kg)

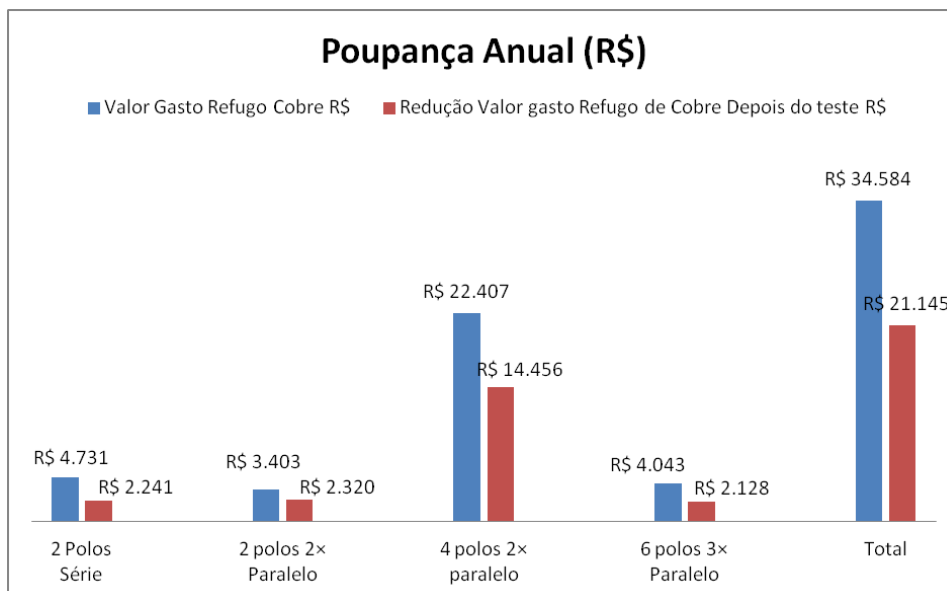


Gráfico 4.21 - Poupança anual considerando-se os motores testados (R\$)

Pontos fortes do estudo:

- ✓ Contacto direto e abordagem de um problema real de refugo cobre na Fábrica III.
- ✓ Observação de como é gerado esse refugo.
- ✓ Identificação de variáveis que influenciam diretamente a quantidade de refugo de cobre na FAB III.
- ✓ Identificação de uma possível causa do problema.
- ✓ Possibilidade de redução de refugo.
- ✓ Aumento de Produtividade no Processo de fazer bobinas, redução do número de vezes que o operador troca carretéis (aumento de tempo útil de trabalho) , redução do tempo que o operador demora a fazer emendas quando acaba o fio no carretel.
- ✓ Redução de Custos associado a fornecimento de cobre.

Pontos fracos:

- ✓ Poucas amostras de determinadas famílias de motores devido à variação do Mix de produção e devido à demora no processo de recolha de dados.
- ✓ Percentagem de famílias de motores testados das carcaças 280 / 315 de 76,2 %.
- ✓ Não foram feitos testes nos estatores dos motores das carcaças 225 / 250 o que perfaz um total de amostragem de 29 %.
- ✓ Necessidade de investimento em sistema de controlo das pontas cortadas nas bobinadeiras, não foi avaliado o custo do equipamento.

Conclusões:

- ✓ Não existe qualquer tipo de controle sobre as pontas cortadas, os gráficos recolhidos mostram isso mesmo.
- ✓ 64 % dos motores das carcaças 280 / 315 produzidos em 2011 tinham Bitolas dos cabos inferiores a 50 mm². Os testes foram realizados para bitolas de cabos iguais a 50 mm², sendo o estudo mais uma vez por defeito, conclui-se que a N.O não leva em conta a bitola dos cabos que vão ser utilizadas.
- ✓ As pontas são sobredimensionadas de modo a atender a pior situação (cabo com maior seção e com o menor número de cabos de ligação).
- ✓ Possibilidade de se poupar cerca de 40 % do dinheiro gasto em refugo para os motores testados.
- ✓ No **anexo C** deste documento é apresentado um método proposto para a redução de cobre nas bobinadeiras.
- ✓ Atualmente a diferença entre o preço do cobre já processado e o preço de venda do cobre como sucata tem um valor baixo, o que acaba por ser um fator inibidor de investimento.

Capítulo 5

Ensaio Realizados em Motores Eléctricos de B.T

5.1 Introdução

Neste capítulo será dada continuidade à questão da qualidade no processo de fabrico de motores B.T apresentando-se os ensaios realizados para se detectar alguns dos defeitos apresentados no capítulo 4.

Estes testes têm como finalidade o aumento da fiabilidade dos motores aplicando ao motor condições severas de funcionamento, às quais os motores podem ser sujeitos durante o seu funcionamento normal. Durante o processo de fabricação o estator/motor é sujeito a uma série de testes que são realizados em 3 etapas.

O primeiro teste realizado no decurso do processo é ao estator bobinado, este teste tem o propósito de identificar problemas que possam ter ocorrido ao fazer-se as bobinas nas bobinadeiras, na aplicação do isolamento de fundo de ranhura, no processo de inserção das bobinas quer manualmente quer nos centros de inserção automatizado, durante a amarração e conformação das cabeças de bobinas, no processo de solda das ligações, bandageamento e em todo o manuseio do estator até este ser testado.

O painel de teste utilizado no teste de estatores bobinados deve ser capaz de testar estatores de 3,6,9,12 cabos, o teste é provido de uma unidade de teste controlada por um computador. Todos os parâmetros que são ensaiados nesta fase, bem como as suas tolerâncias devem estar numa base de dados do painel. A preparação do teste consiste na introdução do item do estator a ser testado, e o painel fará a associação deste com o seu banco de dados, para que a influência humana seja minimizada no critério de aceitação ou reprovação de um estator. Pode-se no entanto alterar as tolerâncias que permitem liberar o estator bobinado como aprovado ou não, dependendo da margem de desvio de tolerância apresentada em face à tolerância da base de dados.

Existem ainda testes que são realizados em laboratório. Geralmente estes testes são realizados em máquinas que vão estar sujeitas a condições de funcionamento específicas em

que é exigida grande fiabilidade. Normalmente estes testes são solicitados pelo cliente que vai adquirir a máquina.

5.2 Tipo de testes realizados em estatores bobinados:

Os ensaios realizados em estatores bobinados segundo a sua ordem de execução são:

- ✓ Medição de resistência ôhmica.
- ✓ Teste de tensão aplicada AC (Hipot AC).
- ✓ Teste de tensão aplicada DC (Hipot DC).
- ✓ Teste de surto elétrico (Surge test).
- ✓ Teste de protetor térmico.
- ✓ Teste do sentido de rotação.

Os principais problemas que podem ocorrer até o estator bobinado chegar ao teste, que se pretendem identificar são:

- ✓ Choque (mau isolamento entre bobinas e chapa do estator).
- ✓ Variação de resistência devido a diferente número de espiras por fase.
- ✓ Erro no processo de se fazer as bobinas (troca da medida do perímetro da bobina nas bobinadeiras).
- ✓ Mau isolamento entre bobina e chapa de estator.
- ✓ Soldas mal feitas.
- ✓ Ligações trocadas / Invertidas.
- ✓ Sentido de rotação trocado.
- ✓ Curto- circuito entre espiras.
- ✓ Fio fora da ranhura.
- ✓ Curto - circuito entre fases.
- ✓ Fios cortados ou interrompidos.
- ✓ Ligações erradas.
- ✓ Isolamentos dobrados / rasgado.
- ✓ Isolamentos danificados.
- ✓ Protetor térmico danificado.
- ✓ Fuga do protetor para o enrolamento.

5.2.1 - Resistência de isolamento:

A norma para a medida da resistência de isolamento para máquinas elétricas rotativas utilizada foi a *IEEE std 43 -2000*.

Quando um material isolante separa dois condutores sob a influência de uma diferença de potencial podem aparecer correntes de fuga que vençam as propriedades dieléctricas do

material isolador. A resistência de isolamento corresponde à resistência que o isolante oferece à passagem dessa corrente de fuga.

Quando se mede o isolamento de um motor, está-se a medir a resistência de isolamento dos materiais isolantes aplicados no processo de fabricação do motor (esmalte que cobre os fios, e todos os materiais isolantes utilizados na confecção dos enrolamentos, como folhas de isolantes que forram as ranhuras do pacote estatórico onde as bobinas são acamadas, espaguetes, isolamentos entre fases, isolamentos início e término de bobinas.

A medição de resistência elétrica de motores exige equipamentos com elevada precisão na faixa de 0,001 ohm e com alta fiabilidade. Para a realização do ensaio é utilizado um megômetro.

Tabela 5.1 - Valores de tensão DC a aplicar no ensaio da resistência de isolamento em função da tensão estipulada da máquina.

Tensão estipulada entre fases da máquina (V)	Tensão DC a aplicar no ensaio (V)
< 1000	500
1000 - 2500	500- 1000
2501 - 5000	1000- 2500
5001 - 12000	2500- 5000
>12000	5000-10000

Após a medição da resistência de isolamento é necessário fazer-se a correção da medida para a temperatura de 40 °C. Esta correção é possível aplicando-se as seguintes expressões:

$$K_T = 0,5^{(40-T)/10} \quad (5.1)$$

$$R_C = K_T * R_T \quad (5.2)$$

Em que:

K_T – Coeficiente de temperatura da resistência de isolamento à temperatura T (°C).

T – Temperatura no final do teste (°C).

R_T – Resistência de isolamento medida à temperatura T (MΩ).

R_C – Resistência de isolamento medida corrigida para a temperatura de 40 °C (MΩ).

Para a classificação do isolamento da máquina testada pode-se ter como referência a tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Critério de avaliação do isolamento em função do valor de resistência de isolamento medida.

Valor da resistência do isolamento	Avaliação do isolamento
2MΩ ou menor	Ruim
< 50MΩ	Perigoso
50...100MΩ	Regular
100...500MΩ	Bom
500...1000MΩ	Muito Bom
> 1000MΩ	Ótimo

Índice de polarização e índice de absorção:

É possível ainda caracterizar-se a qualidade de um isolamento de um motor pelo índice de polarização e índice de absorção. Estes índices estão associados à característica de os materiais isolantes atingirem com maior ou menor rapidez um valor estável de resistência de isolamento quando sujeitos a uma tensão de ensaio constante. O ensaio é realizado usando-se um megômetro.

O ensaio consiste em aplicar-se a tensão dada pela *tabela 5.1*. O procedimento é registrar-se o valor de resistência obtida, ao fim de 30 segundos, ao fim de 1 minuto e ao fim de 10 minutos.

Índice de absorção:

$$I_{ab} = \frac{R_{1 \text{ minuto}}}{R_{30 \text{ segundos}}} \quad (5.3)$$

Índice de polarização:

$$I_p = \frac{R_{10 \text{ minutos}}}{R_{1 \text{ minuto}}} \quad (5.4)$$

Em que:

I_p = Índice de Polarização

I_{ab} = Índice de Absorção

R_1 = Resistência medida ao fim de 1 minuto (Ω)

R_{30} = Resistência medida ao fim de 30 segundos (Ω)

R_{10} = Resistência medida ao fim de 10 minutos (Ω)

É possível avaliar-se o nível de isolamento da máquina pela consulta da *tabela 5.3*:

Tabela 5.3 - Avaliação do isolamento da máquina em função do índice de absorção e índice de polarização.

Índice de Absorção	Índice de polarização	Avaliação do isolamento
-	1 ou menor	Ruim
Abaixo de 1,1	< 1,5	Perigoso
1,1 a 1,25	1,5 a 2,0	Regular
1,25 a 1,4	2,0 a 3,0	Bom
1,4 a 1,6	3,0 a 4,0	Muito Bom
Acima de 1,6 (1)	> 4,0	Ótimo

Medição de resistência ôhmica por Fase:

O ensaio de medição da resistência ôhmica tem como norma de referência a *IEEE Std.118-1978*. Este ensaio tem como intuito comparar o valor obtido da medição da resistência com o valor da resistência estipulada prevista para o enrolamento e ainda comparar o valor da resistência entre as diferentes fases, esta comparação permite tirar conclusões acerca de defeitos que podem ocorrer na bobinagem.

Neste teste utilizam-se equipamentos de elevada precisão devido às apertadas tolerâncias utilizadas, para isso utilizam-se ponte Kelvin ou equipamentos de precisão semelhante.

O ensaio do motor deve ser realizado com o motor a frio com temperatura estabilizada, para a realização do ensaio deve ser considerado o valor da temperatura ambiente no momento da sua realização. Depois de adquiridos os valores existe a necessidade de se fazer a correção para a temperatura de referência (20 °C).

$$R_t = R_1 * \frac{t + C}{t_1 + C} \quad (5.5)$$

Em que:

R_t = Resistência corrigida para 20 °C (Ω).

R_1 = Resistência medida à temperatura ambiente (Ω).

t = Temperatura de 20 (°C).

t_1 = Temperatura ambiente (°C).

C = 234,5 para o cobre eletrolítico.

O desequilíbrio entre o valor estipulado de resistência das fases e o valor medido deve ser no máximo de 5 % e é dado por:

$$DR = \frac{RF_{Medido}}{RF_{Estipulado}} - 1 \times 100 \quad (\%) \quad (5.6)$$

O desequilíbrio entre o valor de resistência das fases deve ser no máximo 3 % e é dado por:

$$DR = \frac{RF_{Maior}}{RF_{Menor}} - 1 \times 100 \quad (\%) \quad (5.7)$$

Em que:

$DR =$ Valor percentual da diferença entre Fases (Ω)

$RF_{Maior} =$ Maior valor de resistência medida das três Fases (Ω)

$RF_{Menor} =$ Menor valor da resistência medida das três Fases (Ω)

$RF_{Estipulado} =$ Valor estipulado da resistência da fase (Ω)

5.2.2 Teste de surto elétrico (Surge Test)

O ensaio de surto elétrico, tem como norma de referência a *IEEE Std. 522-2004*, a falha no isolamento em um estator bobinado começa com um curto-circuito entre espiras estendendo-se a um c.c entre bobinas e finalmente entre fases. [8] O ensaio de surto elétrico permite detectar o estágio inicial de falhas no isolamento de um motor, tais como, c.c entre espiras, entre bobinas, entre fases, ligações invertidas, conexões abertas e ainda número de espiras erradas.

O ensaio tem como principio a aplicação de impulsos de tensão que são de seguida apresentados.

$$V_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} * V_L = 1 p.u \quad T_f = 0.0 \mu s \quad (5.8)$$

$$V_2 = 3.5 * V_1 = 3.5 p.u \quad T_f = 0.1 \mu s \quad (5.9)$$

$$V_3 = 5 * V_1 = 5 p.u \quad T_f = 1.2 \mu s \quad (5.10)$$

Em que:

V_n ($n = 1,2,3$) diferentes níveis de tensão aplicados durante o teste (V).

V_L = Tensão eficaz estipulada entre fases (kV).

T_f = Tempo de frente do impulso (μs).

p.u – Sistema por unidade.

No ensaio de surto elétrico não deve ser aplicado um tempo de frente de onda superior a $1.2 \mu s$ e o número de pulsos (testes) não deve ser superior a cinco sob pena de se por em causa a integridade do isolamento.

Como o circuito em causa é predominantemente indutivo a frequência de oscilação da tensão de surto é dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}\right)} \quad (5.11)$$

Como o segundo termo debaixo da raiz assume um valor pequeno devido à resistência ser desprezável face ao valor da indutância do circuito é possível reescrever-se a fórmula como:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.12)$$

Na *figura 5.1* é apresentada uma forma de onda de oscilação da tensão sem defeito e outra onda com defeito.

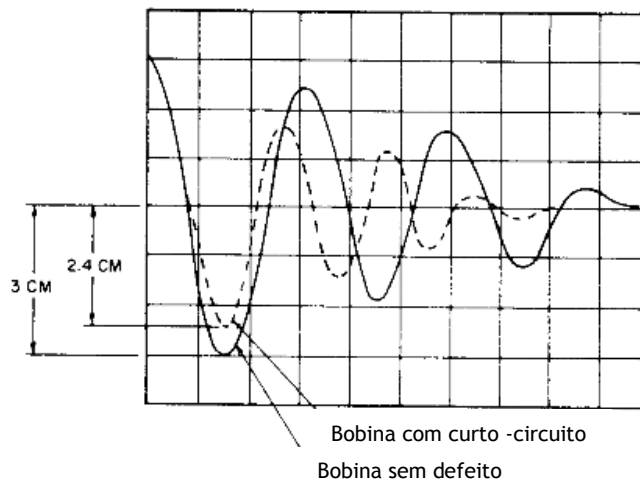


Figura 5.1 - Forma de onda padrão vs forma de onda com defeito

Da figura 5.2 à figura 5.11 são apresentadas as formas de onda para os principais defeitos.

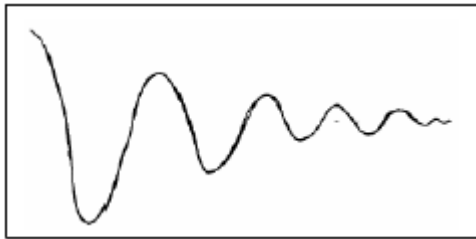


Figura 5.2 - Forma de onda para estator sem defeito

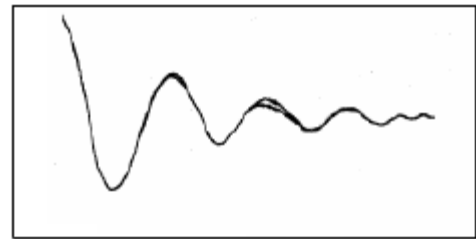


Figura 5.3 - Curto-circuito entre espiras

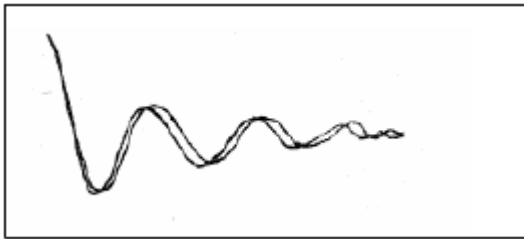


Figura 5.4 - Curto-circuito entre bobinas mesma fase

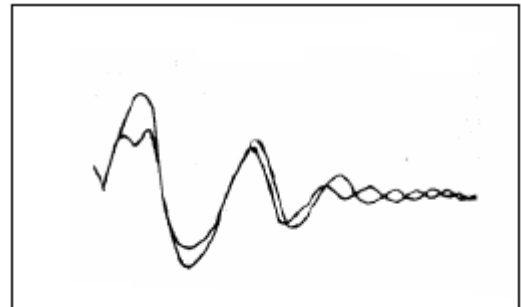


Figura 5.5 - Curto-circuito parcial entre fases

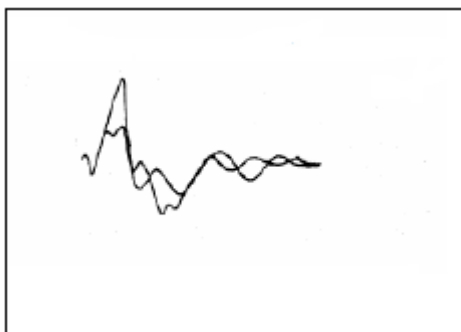


Figura 5.6 - Curto-circuito total entre fases

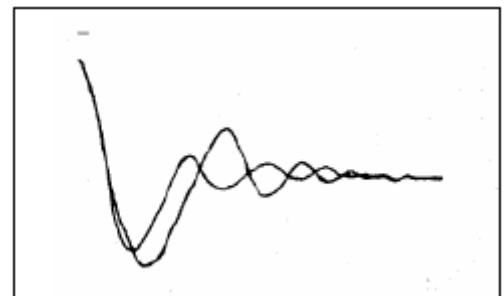


Figura 5.7 - Ligação errada das bobinas

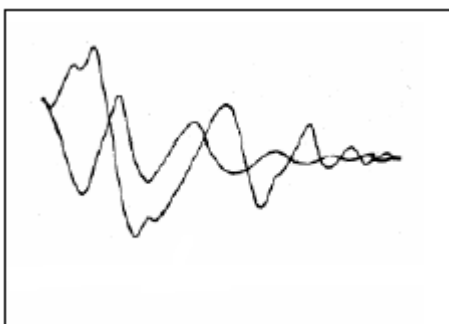


Figura 5.8 - Ligação invertida das bobinas

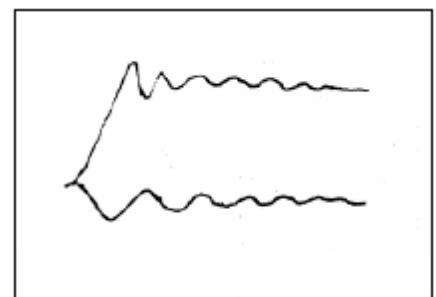


Figura 5.9 - Ligação de bobina aberta

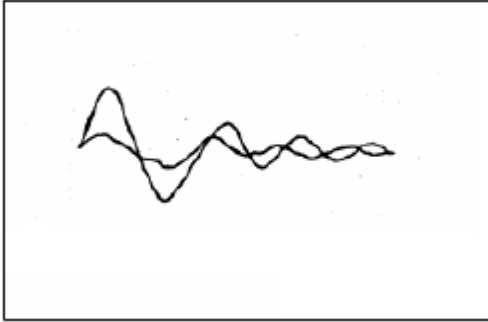


Figura 5.10 - Curto-circuito parcial para massa do estator

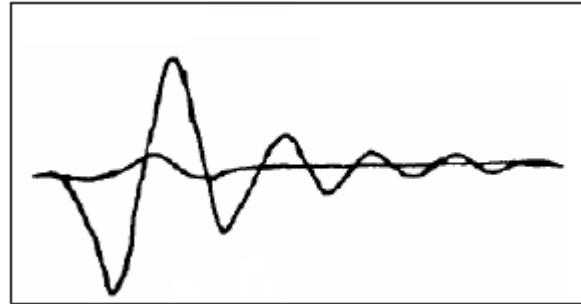


Figura 5.11 - Curto-circuito total para a massa do estator

Métodos de avaliação de resultados:

- Tolerância sob a forma de onda de referência

Neste método de comparação, exige-se o conhecimento das formas de onda que se devem obter caso não existam problemas de isolamento, estas são utilizadas como referência de comparação, define-se assim em torno da forma de onda de referência a tolerância admissível para o produto, quando o desvio for superior à tolerância conclui-se que o mesmo apresenta problemas de isolação.

- Análise de similaridade

Este método é usado em situações em que a análise por comparação de curvas exija rapidez e precisão, como é o caso das linhas de produção em série, onde se exige velocidade de fabricação, diagnóstico de produto automático (sem interferência do operador no critério de aprovação do motor). O teste consiste em verificar o percentual de similaridade entre a curva de referência e a curva obtida, este percentual de desvio é obtido pela aplicação de um complexo modelo matemático, neste método é definido qual a percentagem de desvio que podem ter as ondas em relação à referência.

5.2.3 - Teste de Tensão Aplicada (Hipot DC)

Quando a isolação não é perfeita, existirá uma corrente de fuga dos enrolamentos energizados pelo material isolante para a terra. A resistência do material isolante é um factor importante para a caracterização da qualidade do isolamento do estator bobinado. Através da aplicação do teste de tensão aplicada é possível determinar a resistência de isolamento do motor. A resistência de isolamento é determinada pela divisão da tensão aplicada pela corrente de fuga medida. Ambas são monitoradas pelo Hipot DC.

Quando um estator tem um bom isolamento ele vai apresentar um elevado valor de resistência de isolamento. O valor da tensão deve ser inferior ao valor para o qual o valor da

resistência dielétrica do material é ultrapassado sob pena de se danificar permanentemente o isolamento.

5.2.4 - Teste de Tensão Aplicada (Hipot AC)

Este ensaio tem como norma de referência a *IEEE 112 -2004*. À semelhança do ensaio anterior, este consiste em determinar a qualidade do sistema de isolamento, este teste consiste em aplicar uma alta tensão por um tempo especificado, por meio de um transformador monofásico ou HI-POT. A finalidade é saber se o sistema de isolamento vai suportar as solicitações dielétricas a que um motor geralmente está sujeito em condições normais de operação.

O valor de tensão que deve ser aplicado durante um minuto é dado por:

$$U = 2 \times U_N + 1000 \quad (5.13)$$

Em que:

U = Tensão a aplicar no teste (V)

U_N = Tensão estipulada do motor (V)

5.2.5 Teste do protector térmico:

Geralmente os estatores bobinados são dotados de protectores térmicos. O protector térmico pode ser testado através da medição da resistência, verificação de continuidade e da verificação da isolamento em relação ao enrolamento.

5.2.6 Teste do sentido de rotação:

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

Para se identificar o sentido de rotação do motor utiliza-se um sensor de efeito Hall o sensor é colocado no interior do estator bobinado e quando energizadas as bobinas este vai monitorizar o sentido das linhas de força do campo magnético.

5.3 - Testes realizados no laboratório:

5.3.1 - Introdução

Proteção de motores

Nos circuitos integrantes de uma máquina eléctrica rotativa, há em princípio, dois tipos de protecção, a protecção dos motores contra sobrecarga e protecção contra curto-circuito.

Os motores utilizados em regime contínuo de funcionamento, devem ser protegidos contra sobrecargas. Geralmente essa protecção obtém-se com a utilização de um rele térmico que deve ser regulado para um valor máximo igual ao produto do valor da corrente estipulada do motor a plena carga por:

- 1,25 para motores com factor de serviço igual ou superior a 1,15.
- 1,15 para motores com factor de serviço igual a 1.

Alguns motores, quando solicitado pelo cliente, possuem como parte integrante, dispositivos de protecção contra sobre-elevação de temperatura. Esta sobre-elevação de temperatura pode ocorrer devido a sobrecargas, travamento do motor, alimentação com valor de tensão abaixo do valor estipulado, falta de ventilação do motor. Estes dispositivos podem ser termostatos (sonda térmica), termistor, termo resistores tipo PT100.

De entre os dispositivos de protecção contra sobrecargas/sobre-elevação de temperatura destacam-se:

Termostato (bimetálico)

São detectores térmicos do tipo bimetálico, com contactos de prata normalmente fechados. Estes abrem quando a temperatura aumenta. Os termostatos são ligados em série ou independente entre si.

Termístores (Tipo PTC ou NTC)

São detectores térmicos, compostos de semicondutores que variam a sua resistência bruscamente ao atingirem uma determinada temperatura como no caso dos termostatos podem ser ligados em série ou independentes entre si.

Termo resistência (Tipo PT100- RTD)

A termo resistência é um elemento de resistência calibrada feito de platina. O seu funcionamento baseia-se no princípio de que a resistência eléctrica de um condutor metálico varia linearmente com a temperatura.

Estes sistemas de protecção contra sobrecargas, são conectados a uma unidade de controlo que interromperá a alimentação do motor ou acionará um dispositivo de sinalização para evitar que o motor seja danificado permanentemente. Normalmente a um aumento

excessivo de temperatura está associado degradação do sistema de isolamento, pondo - se assim em causa o correto funcionamento do motor.

Limite de temperatura para os enrolamentos:

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento deve ser mantida abaixo do limite da classe térmica. A temperatura total é a soma da temperatura ambiente com a elevação de temperatura mais a diferença que existe entre a temperatura média do enrolamento e o ponto mais quente. Para ambientes considerados normais, a temperatura ambiente assume valores até 40 °C, acima disso devem ser consideradas condições especiais.

2.1.12.1. CLASSES TÉRMICAS

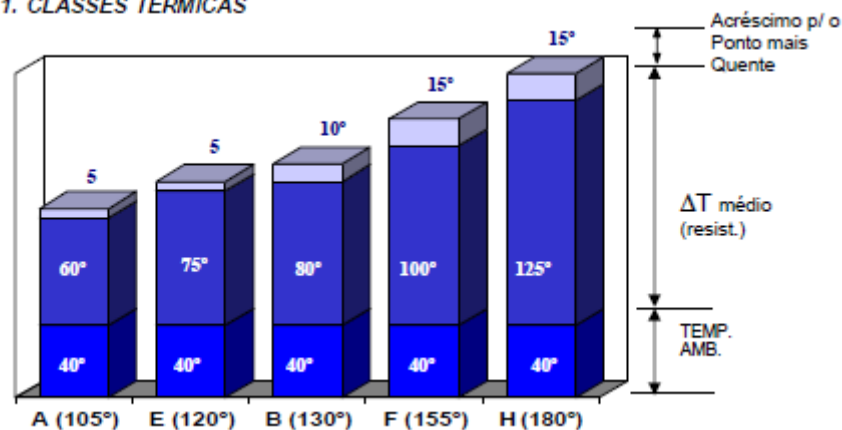


Figura 5.12 - Gráfico de classes de Isolamento

A classe térmica de um motor é definida em função da temperatura de funcionamento em regime estipulado da máquina. As temperaturas indicadas no gráfico da *figura 5.12* são temperaturas não ultrapassáveis em nenhum ponto. As temperaturas indicadas correspondem também às classes de isolamento em que os materiais isolantes são classificados.

Para se comprovar a classe térmica da máquina realiza-se muitas vezes testes de elevação de temperatura.

5.3.2 -Teste de elevação de temperatura:

O teste de elevação de temperatura, tem como norma de referência a *IEEE Std. 112*. Este ensaio serve para classificar ou verificar a classe de isolamento da máquina. Pode ser aplicado recorrendo a dois métodos:

Método 1: Método direto

O motor deve estar a funcionar em regime de carga, tensão e frequência estipulada até o motor atingir estabilidade térmica. A estabilidade térmica é atingida quando a variação de temperatura é menor do que 1 Kelvin no intervalo de 1 hora, quando a temperatura é monitorada na carcaça do motor, ou quando a variação da temperatura é inferior a 2 Kelvin no intervalo de 1 hora caso a temperatura seja monitorada por um sensor inserido nos enrolamentos do motor. Depois o motor é desligado, é medido a resistência dos enrolamentos e a temperatura ambiente. A diferença da resistência medida em frio e depois do teste de elevação da temperatura permite calcular a elevação da temperatura do motor pelo método da variação da resistência.

Método 2: Método indirecto (tensão estipulada e carga reduzida)

Este método deve ser utilizado quando não for possível aplicar o método direto.

Este método é aplicado em dois passos:

- ✓ Passo 1: Realizar três testes de elevação de temperatura com carga reduzida, assim a corrente não será inferior a 70 % da corrente estipulada, com tensão e frequência estipulada até ser atingida a estabilidade térmica (estabilidade térmica compreende o mesmo conceito do método direto).
- ✓ Passo 2: Realizar o teste de elevação de temperatura com o motor sem carga a tensão e frequência estipulada até a estabilidade térmica ser atingida.

A elevação de temperatura pode assim ser determinada pelas seguintes expressões:

$$\Delta T = \left(\frac{R_H - R_C}{R_C} \right) \times (K + T_{ambc}) - (T_{ambH} - T_{ambc}) \quad (5.14)$$

Ou pela determinação da temperatura utilizando valores nominais:

$$\Delta T_{Nominal} = \Delta T_{reduzido} + \frac{\Delta T_{reduzido} - \Delta T_{vazio}}{I_{reduzido}^2 - I_{vazio}^2} \times (I_{Nominal}^2 - I_{reduzido}^2) \quad (5.15)$$

Onde:

R_C = Resistência a quente (Ω).

R_H = Resistência a frio (Ω).

T_{ambc} = Temperatura ambiente antes do teste a frio ($^{\circ}C$).

T_{ambH} = Temperatura ambiente depois do teste a quente ($^{\circ}C$).

$\Delta T_{Nominal}$ = Elevação de temperatura estipulada ($^{\circ}C$).

$\Delta T_{reduzido}$ = Elevação de temperatura carga reduzida ($^{\circ}C$).

ΔT_{Vazio} = Elevação temperatura vazio ($^{\circ}C$).

$I_{Nominal}$ = Corrente estipulada indicada chapa de caraterísticas motor (A)

$I_{Reduzida}$ = Corrente durante teste de elevação temperatura com carga reduzida (A).

I_{Vazio} = Corrente durante o teste em vazio (A).

$K = 234,5$ para o cobre eletrolitico.

Critério de aceitação do motor:

A temperatura dos enrolamentos não deve exceder a temperatura limite especificada na norma IEC 60034-1. Se se quiser pensar de uma maneira mais simplificada e não menos errada a sobreelevação de temperatura não deve ser superior aos valores indicados na figura 5.12.

5.3.3 - Ensaio em Vazio:

O ensaio tem como norma de referência a IEEE 112-2004 section 5.5. Realiza-se com o motor a frequência estipulada com seis valores de tensão diferentes de alimentação, um dos quais deve ser o valor de tensão estipulada. A máquina deve estar sem carga mecânica acoplada (funcionamento em vazio). Os valores de tensão adoptados devem variar entre o mínimo fornecido pela fonte de alimentação e 1,05 Un.

Como o motor não possui carga mecânica, a energia absorvida por este serve exclusivamente para alimentar as perdas existentes na máquina neste regime de funcionamento (vazio).

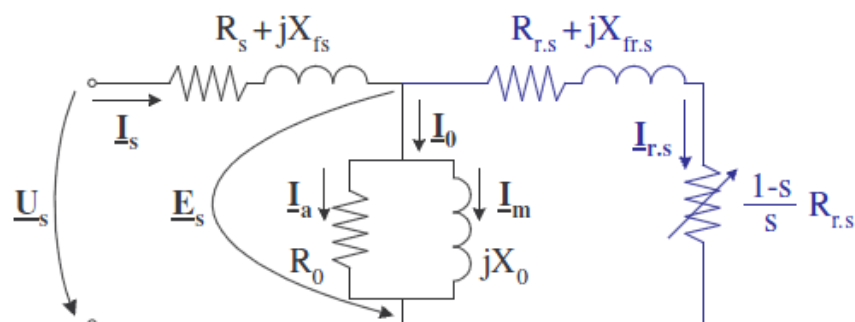


Figura 5.13 - Circuito Equivalente por fase referido ao estator

$$\begin{aligned}
 P_s &= 3 \times U_s \times I_s \times \cos \varphi_s \\
 &= P_{js} + P_{fe} + P_{jr} + P
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

\swarrow \searrow \searrow \searrow

$= 3R_s I_s^2$ $3R_0 I_a^2$ $3R_{r,s} I_{r,s}^2$ $3[(1-s)/s]R_{r,s} I_{r,s}^2$ P_{mec}

\swarrow \searrow \searrow \searrow

0 0

Em que:

P_s = Potência elétrica ativa trocada com a rede (W).

U_s = Tensão alimentação (V).

I_s = Corrente na fase (A).

$\cos \varphi_s$ = fator de Potência.

P_{js} = Perdas Joule estator (W).

R_0 = Resistência de perdas no ferro ($^\circ\Omega$).

I_a = Corrente alimenta perdas no ferro ($^\circ\Omega$).

$R_{r,s}$ = Resistencia rotórica referida ao estator($^\circ\Omega$).

$I_{r,s}$ = Corrente rotórica referida ao estator (A).

s = Deslizamento.

P_{mec} = Potência Mecânica (W)

P_{js} = Perdas de Joule no estator (W).

P_{fe} = Perdas no ferro estator (W).

P_{jr} = Perdas de Joule no rotor (W).

Pelo desmembramento da expressão 5.16 mencionada, repara-se que com o motor a funcionar em vazio o valor do deslizamento (s) é praticamente nulo o que nos leva a que a corrente que circula no ramo a azul da figura 5.10, seja nula. Sendo assim a potência activa trocada com a rede que representa as perdas da máquina ficará na seguinte forma:

$$P_s = P_{js} + P_{fe} + P_{mec} \quad (5.17)$$

Assim, numa primeira fase há que se separar as perdas elétricas, magnéticas e mecânicas. Isto é feito determinando-se a variação da potência de perdas magnéticas em função da tensão $P_{fe}(U_s)$ ou do quadrado da tensão $P_{fe}(U_s^2)$ a partir de diferentes valores de U_n . [13] O valor da potência de perdas mecânicas é obtido pela diminuição da tensão aos terminais do motor até ao momento em que haja um aumento de corrente consumida (tensão quase nula), o valor de potência nesse instante representa a potência de perdas mecânicas. Durante o ensaio deve ainda medir-se a corrente elétrica estatórica, a tensão aplicada em cada instante e potência total absorvida pela máquina, para o cálculo das perdas por efeito de Joule é necessário medir-se resistência estatórica por fase com correcção devida à temperatura.

O ensaio em vazio do motor de indução trifásico permite determinar a potência de perdas mecânicas (atrito e ventilação), perdas por efeito de Joule e perdas magnéticas da máquina. Fornece ainda informações sobre os parâmetros do circuito equivalente.

Critério de aceitação do motor:

Os valores obtidos devem coincidir com os valores da documentação técnica do motor a tolerância de desvio dos valores é de $\pm 10\%$.

5.3.4 - Ensaio com o rotor travado

O ensaio tem como norma de referência a *IEEE 112-2004 section 7.3.2.4*. Este ensaio é efectuado aumentando-se gradualmente a tensão aos terminais do motor. Estando para o efeito, o rotor bloqueado, isto é impedido de rodar. É evidente que neste ensaio a corrente absorvida pelo motor durante o ensaio atinge um valor elevado (igual à corrente de arranque do motor), da ordem de 6 vezes a corrente estipulada, este ensaio deve ser realizado com brevidade para não se danificar o isolamento da máquina.

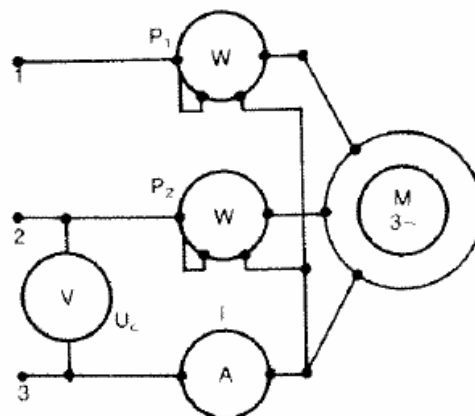


Figura 5.14 - Esquema de ligação dos equipamentos dos ensaios em vazio e rotor travado teste

A corrente que o motor consome lida pelo amperímetro da montagem da figura 5.11 corresponde à corrente de arranque do motor.

Assim mede-se a corrente de arranque I_A , a tensão nominal composta U_C , e a potência trifásica P_T neste ensaio. A potência lida é igual à soma das perdas no ferro e perdas por efeito de joule no estator. As perdas no ferro do estator são constantes e assumem assim o mesmo valor que as perdas do ferro determinadas através do ensaio em vazio. As perdas por efeito de joule podem ser calculadas por:

$$P_{js} = 3 \times R \times I^2 \quad (5.18)$$

As perdas no ferro podem ser calculadas através da expressão:

$$P_{fe} = P_T - P_{js} \quad (5.19)$$

Desta forma é possível calcular-se as perdas mecânicas do motor (em vazio ou em carga) através de:

$$P_{mec} = P_{Constantes} - P_{fe} \quad (5.20)$$

Em que :

$$P_{Constantes} = P_0 - P_{js} \quad (5.21)$$

No ensaio com o rotor travado, pode-se ainda calcular o factor de potência do motor em curto- circuito pela expressão:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_T}{\sqrt{3} \times U_C \times I} \quad (5.22)$$

Neste ensaio, o factor de potência continua a ser bastante inferior ao estipulado (em regime de carga nominal), enquanto o binário motor é cerca de metade do binário motor estipulado. [9]

5.3.5 - Ensaio em carga

O ensaio em carga é realizado aplicando-se ao motor a sua tensão estipulada, com o motor a acionar uma determinada carga. Geralmente este ensaio é feito a $\frac{1}{4}$ de carga, $\frac{1}{2}$ carga e à carga nominal. Como é óbvio a corrente absorvida será proporcional à carga aplicada. No laboratório o ensaio é feito recorrendo-se a um dinamómetro que é ligado ao eixo do motor (através de união de eixos), o dinamómetro alimenta um conjunto de resistências ligadas em paralelo, a potência mecânica do motor é assim convertida em energia elétrica que vai ser dissipada no banco de resistências.

A corrente de arranque I_a de um motor é elevada, sendo igual no ensaio em vazio, no ensaio em curto-circuito e no ensaio em carga, pois a situação de arranque é a mesma nos três casos, o rotor está parado. A corrente só se torna diferente de ensaio para ensaio à medida que o motor ganha velocidade, é evidente que quando o motor atinge o seu ponto de funcionamento a corrente no ensaio em carga seja superior à corrente no ensaio em vazio.

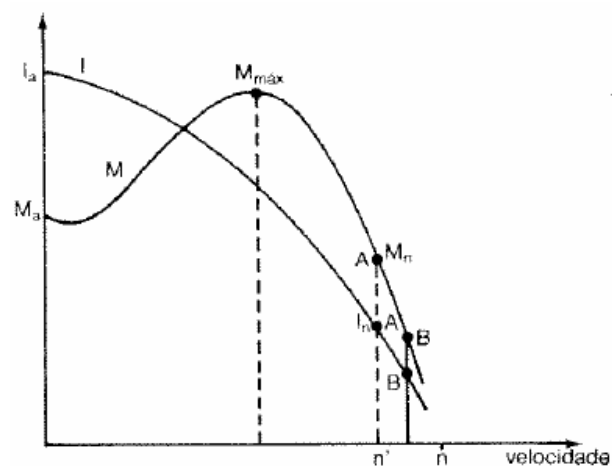


Figura 5.15 - Gráfico Corrente e Binário em função da velocidade do motor

No ensaio em vazio, o ponto de funcionamento B do motor da *figura 5.12*, corresponderá a uma velocidade mais elevada que do ensaio em carga e portanto uma corrente em regime permanente inferior. Se o ensaio for em carga o ponto de funcionamento passará a ser o ponto A, a que corresponderá uma velocidade inferior e uma corrente em regime permanente superior à do ensaio em vazio.

No gráfico da *figura 5.15*, aparecem representadas duas curvas características do motor assíncrono, a curva característica da corrente $I(n)$ e a curva da característica mecânica $M(n)$. As curvas apresentadas são válidas para o regime de funcionamento do motor em vazio e em carga. Analisando-se a curva da característica mecânica $M(n)$ observa-se o seguinte: O binário começa por crescer desde o arranque até um valor máximo $M_{m\acute{a}x}$ (o deslizamento será na casa dos 20 a 30 %), depois deste ponto começa a decrescer até ao ponto de

funcionamento. O ponto de funcionamento vai depender do regime de carga. O binário máximo é de cerca de duas a quatro vezes o binário nominal e cerca de uma a duas vezes o valor do binário de arranque considerando - se um arranque direto do motor.

$$\frac{I_a}{I_n} = \frac{\text{Corrente de Arranque}}{\text{Corrente Estipulada}} \cong 1,5 \text{ a } 8 \quad (5.23)$$

$$\frac{M_{m\acute{a}x}}{M_n} = \frac{\text{Binário Máximo}}{\text{Binário Estipulado}} \cong 2 \quad (5.24)$$

Estes valores são importantes, para se ter um conhecimento adequado do motor em questão. Os catálogos de cada motor indicam estas características e outras em função da sua potência nominal, de forma a escolher-se inclusivamente o tipo de arranque mais adequado para o motor. Neste sentido, o conhecimento dos coeficientes I_a/I_n e $M_{m\acute{a}x}/M_n$ é bastante útil.

Este ensaio em carga permite saber o escorregamento do motor, em que através das características do motor pode-se calcular a sua velocidade de rotação pela expressão:

$$n_s = \frac{60 \times f}{P} \quad (5.25)$$

n_s = Velocidade de sincronismo do campo girante (r.p.m).

f = Frequência (hz)

P = Número de Par de Pólos

Assim ensaiando o motor com uma determinada carga é possível saber-se o escorregamento através da expressão:

$$s = \frac{n_s - n'}{n_s} \times 100 (\%) \quad (5.26)$$

Neste ensaio a potência útil é evidentemente diferente de zero. A potência trifásica absorvida é igual à soma da potência útil mais as perdas.

$$P_t = P_u + \text{perdas totais} \quad (5.27)$$

Já foi visto nos ensaios anteriores que as perdas dividem-se em perdas constantes e perdas variáveis. Foi visto nos ensaios anteriores como se calculam as perdas constantes ($P_{fe} + P_{mec}$), as perdas no ferro do rotor são desprezáveis.

As perdas por efeito de joule (perdas variáveis), no estator e no rotor são calculadas respectivamente pelas seguintes expressões:

$$P_{js} = 3 \times R \times I^2 \quad (5.28)$$

$$P_{jr} = s \times P_t = s \times (P_t - P_{js} - P_{fe}) \quad (5.29)$$

Conclusão:

Nos ensaios em vazio, com o rotor travado e em carga pode-se individualizar as perdas, calcular-se a potência mecânica útil do motor e ainda os rendimentos para cada regime de carga considerado.

O ensaio em carga pode ser realizado para diferentes regimes de carga, a que correspondem diferentes valores para as perdas variáveis e diferentes valores de rendimentos. Se este ensaio for à carga nominal, então as perdas variáveis obtidas são as estipuladas e o rendimento obtido será o rendimento estipulado.

5.4 Outros testes:

5.4.1 - Loop- Test

Este ensaio tem como finalidade testar o núcleo magnético do estator, antes de se rebobinar um motor. Assim determinam-se as perdas magnéticas (W/Kg) e os pontos quentes no pacote de chapas.

Ponto quente:

Caso o isolamento elétrico existente entre as lâminas do estator seja danificado em algum ponto devido a um c.c na ranhura, ocorrerá um aumento grande das correntes parasitas naquele ponto, provocando um sobreaquecimento naquela região. Caso um motor seja rebobinado com um ponto quente no pacote existe um sério risco de este apresentar um aquecimento anormal da carcaça, podendo sobreaquecer rolamentos, ou inclusive deteriorar isolamentos que provoquem nova falha do motor. O cenário mais provável é que o motor

sobreaqueça sem que a corrente aumente significativamente, neste caso os dispositivos de proteção térmica não protegem o motor.

O loop test deve ser realizado sempre que o motor queimado apresente características evidentes de possíveis danos do isolamento entre chapas do estator.

De entre as características evidenciadas podem-se destacar os seguintes casos:

- ✓ Curto - circuito dentro da ranhura ou na saída da mesma, provocada por falha do isolamento.
- ✓ Curto - circuito provocado por arraste do rotor.
- ✓ Marcas de arraste mesmo que o mesmo não tenha provocado c.c dentro da ranhura.
- ✓ Sobrecarga violenta que tenha provocado carbonização do material isolante.

Procedimento:

O Loop - Test consiste em criar um campo magnético por meio de um solenóide no pacote de chapas do estator. Conforme é mostrado na *figura 5.16*. Para a preparação do solenóide a ser aplicado no teste devem ser tomadas algumas considerações nomeadamente deve ser calculado o número de espiras e a bitola do fio para a montagem do solenóide. Estes cálculos são apresentados de seguida.

$$Z = 375000 \times \frac{U}{f \times (2R_2 - D_1) \times L} \text{ (Espiras)} \quad (5.30)$$

$$D_1 = 2R_1 + 2H_{n1} \text{ (mm)} \quad (5.31)$$

$$S = 37500 \times \frac{U \times (2R_2 + D_1)}{f \times Z^2 \times L \times (2R_2 - D_1)} \text{ (mm}^2\text{)} \quad (5.32)$$

Em que:

U = Tensão a ser aplicada no solenóide (V)

H_{n1} = Altura da ranhura (mm)

f = frequência (Hz)

L = Comprimento do pacote de chapas (mm)

$R_2 =$ Raio externo do estator(mm)

$Z =$ Número de espiras necessárias para o solenóide

$R_1 =$ Raio interno do estator (mm)

$S =$ Secção do condutor a ser utilizado no solenóide

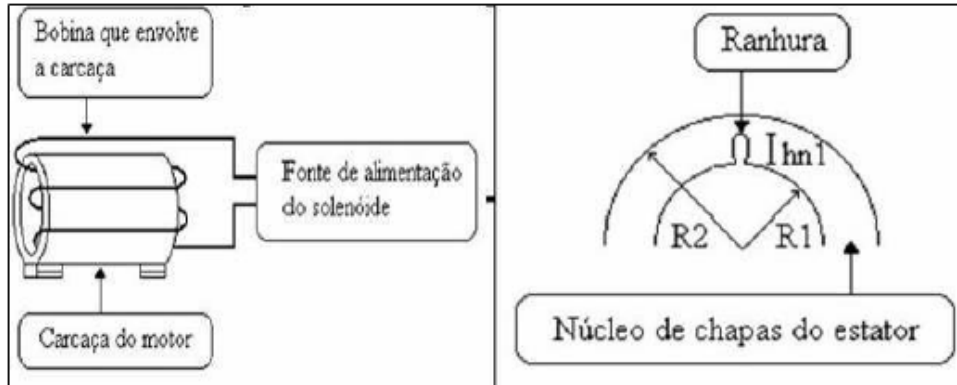


Figura 5.16 - Loop - Test Carcaça Completa (Carcaça + Estator)

Depois de concebido o solenóide, aplica-se uma tensão nos seus terminais como exemplificado no lado esquerdo da *figura 5.16*, assim cria-se um campo magnético que vai ser induzido no pacote de chapas estatório do motor. Este campo vai propiciar o aquecimento do núcleo de chapas, o objectivo deste teste é monitorar a temperatura do motor durante aproximadamente 30 minutos. Caso algum ponto do motor venha a aquecer pelo menos 10 °C acima da temperatura dos outros pontos, deverá ser considerado um ponto quente. Nesta situação o núcleo de chapas ferromagnéticas deve ser substituído ou embaralhado, o embaralhamento consiste em desmontar o pacote e remontá-lo redistribuindo-se ao longo do pacote as chapas onde o(s) ponto(s) quente(s) tinham sido detectados. O loop- test deve ser feito com o estator isento de sujidades e sem as bobinas queimadas.

Tabela 5.4 - Tipo de Chapas utilizadas na fabricação de motores elétricos WEG

LINHA	TENSÃO	CARCAÇA	CHAPA ROTOR	CHAPA ESTATOR	Observação
M	Média e Alta	Todas	E170	E170	Rotor acompanha estator.
	Baixa	Todas	1006/1008T	1006/1008T	
H	Média e Alta	Todas	E170	E170	Rotor acompanha estator.
	Baixa	Até 355	1006/1008T	1006/1008T	
A	Todas	Todas	1006/1008T	1006/1008T	-
D (CC)	Todas	• 112	E170	E170	-
		• 132	E170	1006/1008T	
G	Todas	Todas	1006/1008T	1006/1008T	-
S	Todas	• 560	E170	E170	-
		• 630	1006/1008N COSAR 60 LNE 600	E170 E125 E110	De acordo com a velocidade de disparo da máquina.

E170 – perdas 1,15 a 1,7 W/kg 1006/1008 – perdas 11,5 W/Kg E125 – perdas 0,9 W/Kg

5.4.2 - Ensaio dimensional:

O ensaio dimensional tem por objectivo garantir que as dimensões do produto estejam de acordo com o especificado no documento (desenhos) de acordo com o pretendido pelo cliente.

Avaliação da qualidade do produto:

A avaliação da qualidade do produto é realizada durante todo o processo produtivo.

As características analisadas e o local onde é feita essa avaliação estão ilustrados na tabela 5.2. A frequência de amostragem para a avaliação de uma característica é determinada pelo analista ou inspector da qualidade, levando em consideração solicitações de clientes, relatórios de defeitos internos e externos.

Avaliação especial:

Pode a qualquer altura do processo de fabricação de motores ser realizada uma avaliação da qualidade do produto. A inspecção pode ocorrer por meio de documentos complementares como o plano de inspecção de clientes e/ou planos de inspecção de produtos certificados. Nestes documentos, estão presentes todas as informações necessárias para a avaliação como: características, instrumentos utilizados e frequência de medição.

Tabela 5.5 - Rotina para avaliação da qualidade do produto

Actividade	Dimensão/característica	Forma de Avaliação/Instrumento	Critério de aceitação
Acabamento	Verificar acabamento do motor	Visual	Isento de batidas, rebarbas, aletas quebradas.
Forma construtiva	Verificar a forma construtiva do produto	Visual	Desenho do produto, Nota de operação
Dimensional	Verificar todas as dimensões especificadas no desenho do produto montado	Instrumentos aplicáveis (Paquímetro, Micrómetro, Calibradores, Relógio comparador)	Valores devem estar de acordo com as Normas Aplicáveis
Acessórios	Verificar todos os acessórios especificados	Visual	Desenho do produto, Lista de materiais

Capítulo 6

Conclusão e perspectivas de trabalhos futuros

Com este trabalho, foi possível perceber-se as etapas para a realização da bobinagem de um motor elétrico. Concluiu-se que cada etapa tem um papel importante para a qualidade do produto final.

Tendo-se em conta as áreas de intervenção da engenharia de processos, foi dada especial atenção à questão do refugo de cobre identificando-se as áreas das bobinadeiras como a principal fonte causadora. Concluiu-se que actualmente a WEG consegue uma boa recuperação do valor gasto em refugo de cobre, no entanto as metas da empresa é reduzir esse refugo ao mínimo possível, para isso existem planos de ação em curso para esse fim. O estudo de refugo de cobre apresentado permite concluir que caso as pontas fossem dimensionadas com o valor da nota de operação, era possível reduzir-se o refugo de cobre contribuindo-se assim para que os valores fossem mantidos dentro das metas exigidas. Como perspectivas de trabalhos futuros poder-se-ia continuar o estudo apresentado, fazendo-se uma análise detalhada por especialidade de motor tendo em conta as suas características, aprimorar os dados do valor realmente gasto em pontas sobrantes e fazer-se uma análise económica para apurar a viabilidade do sistema proposto.

No trabalho foi feito um levantamento dos principais defeitos e abordadas as suas causas. Foi concluído que os defeitos que apresentam um valor mais expressivo na Fábrica III, são ligações erradas e bobinas trocadas. Essas etapas do processo de bobinagem, portanto, são possíveis área para ações de melhoria de processos.

A questão da qualidade deve estar sempre presente ao longo de todo o processo produtivo, dado isso, existe a necessidade de se garantir a qualidade dos produtos produzidos através da realização de diversos testes certificados. Conclui-se que por serem o ponto mais vulnerável de uma máquina a maior parte dos testes realizados incidem sobre a qualidade de isolamento dos materiais utilizados. Os ensaios realizados têm como finalidade detetar problemas que tenham ocorrido em todo o processo.

Referências

- [1] Guilherme Filippo Filho, "Motor de Indução", vol. 1. São Paulo, 2002
- [2] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valéria Hrabovcová, "Design of rotating electrical Machines", first edition, Chichester, 2008.
- [3] Catálogos WEG, "Motores Elétricos assíncronos de Alta Tensão", Jaraguá do Sul, 2010.
- [4] Manuel Vaz Guedes, "O Motor de Indução Trifásico", DEEC, FEUP, 1994.
- [5] Apontamentos disciplina de Máquinas Elétricas, "Máquinas de Indução Trifásicas", DEEC, FEUP, 2009.
- [6] Catálogos WEG "Materiais de bobinagem", Jaraguá do Sul, 2009
- [7] Catálogos WEG, "Motores de indução alimentados por inversor de Frequência", Jaraguá do Sul, 2011
- [8] Vitor Marcon, "Sistema de teste em estatores bobinados", artigo científico, 2008
- [9] José Vagos Carreiras Matias, "Máquinas elétricas Corrente Alternada", 1ª edição, 2003.
- [10] Catálogos WEG, " Manuais de instalação e Manutenção", Jaraguá do Sul, 2007.
- [11] Catálogos WEG " Materiais de bobinagem, Esquemas de bobinagem, Processos de bobinagem de estatores", Jaraguá do Sul, 2007
- [12] Joao G.Souza M. de oliveira " Materiais Usados na Construção de Motores eletricos", Seminário técnico, Porto Alegre, 2009.
- [13] Manuel Vaz Guedes " Perdas de energia em vazio", DEEC, FEUP, 2003/2004.
- [14] Eduardo Cardoso Telles " Análise de operação de um motor de indução com enrolamento Dahlander" Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rio Janeiro, 2010.
- [15] Edson Bim " Máquinas Elétricas e Acionamentos", UNICAMP, 2010.
- [16] Ana Lisa Martins Rodrigues " Estudo Comparativo de Sistemas de isolamento em Motores MT", Dissertação de Mestrado, FEUP, 2010
- [17] Normas WEG " Test Procedure" 1º Edition, January, 2009.
- [18] Waldiberto pires, Hugo Mello "Minimização de perdas em motores de indução alimentados por conversores de frequência " Artigo científico WEG, submetido a publicação.

Anexo A

Desenho de Esquemas Trifásicos

Exemplo:

Especificações do Motor:

- 36 Ranhuras
- 4 Polos
- Passo das bobinas 1:8:10:12
- 3 B/G - 2G/F
- Camada única

O 1º Passo - Consiste em desenhar o primeiro grupo de bobina da Fase R, geralmente por uma questão de simplicidade começa-se na ranhura nº1:

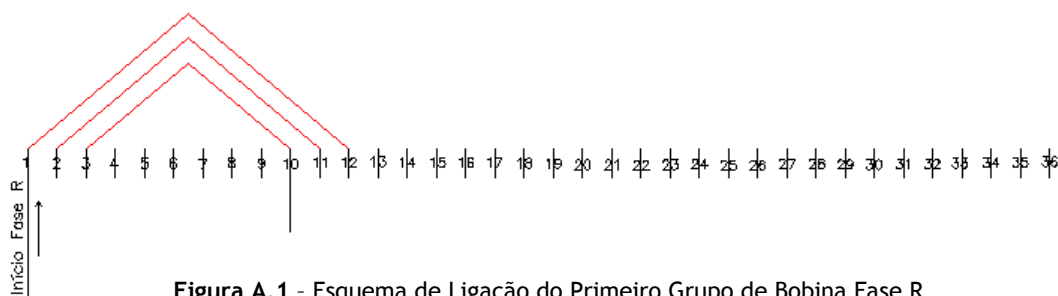


Figura A.1 - Esquema de Ligação do Primeiro Grupo de Bobina Fase R

- O 2º Passo - Consiste em posicionar o segundo grupo da Fase R, para isso é necessário calcular-se a distribuição:

$$D = \frac{NR}{N^{\circ} G/F} = \frac{36}{2} = 18 \quad (6.2)$$

(18 ranhuras apartir do início do 1º grupo Figura A. 2)

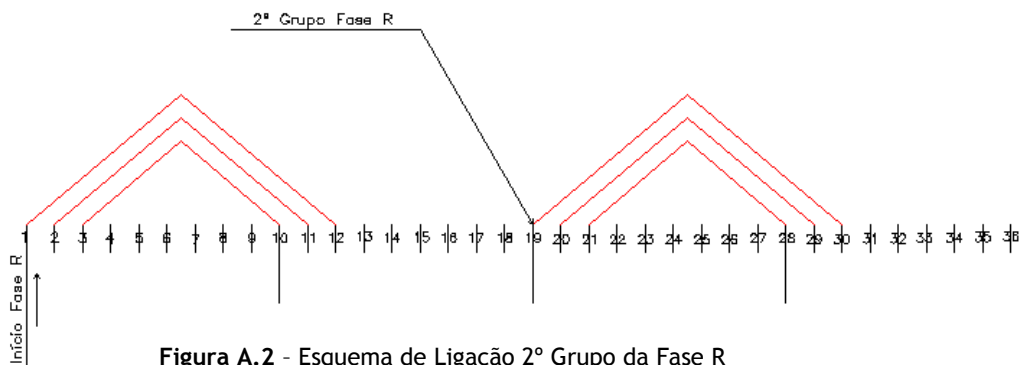


Figura A.2 - Esquema de Ligação 2º Grupo da Fase R

- O 3º Passo - Cálculo de defasagem: Permite estabelecer a distância medida em ranhuras à qual se inicia a fase seguinte.

$$\theta = \frac{2 \times NR}{3 \times N^{\circ} P} = \frac{2 \times 36}{3 \times 4} = \frac{72}{12} = 6 \quad (6.2)$$

(A Fase S terá o seu início 6 ranhuras depois da Fase R)

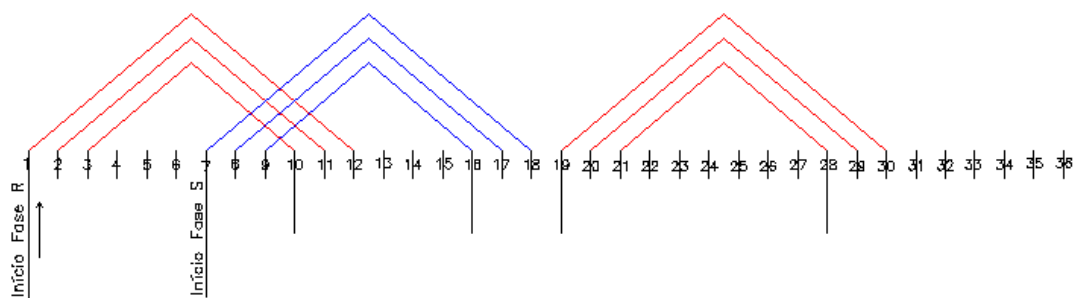


Figura A.3 - Esquema de Ligação 1º Grupo Fase S

- O 4º Passo - Consiste em desenhar-se os restantes grupos da Fase S considerando-se a mesma distribuição.

O segundo grupo da Fase S iniciará a uma distância de 18 ranhuras do início da Fase S.

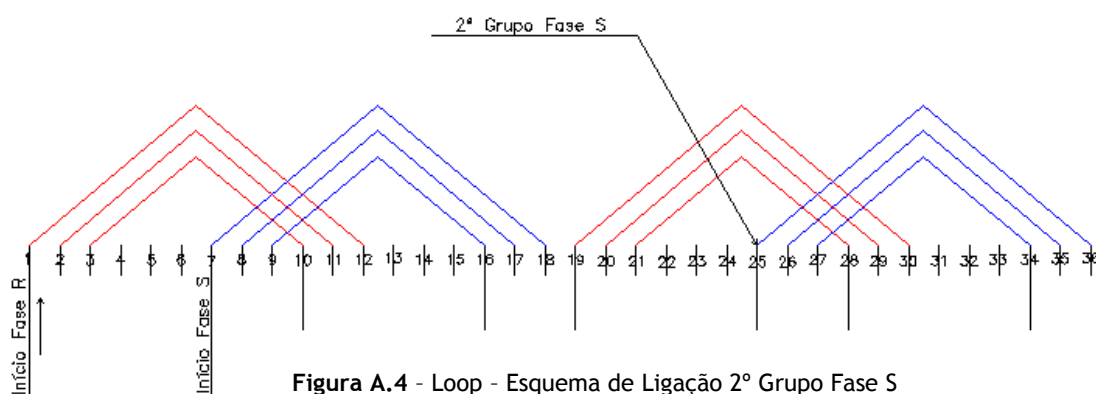


Figura A.4 - Loop - Esquema de Ligação 2º Grupo Fase S

- O 5º Passo - Consiste em desenhar-se o primeiro grupo da fase T considerando-se os mesmos cálculos referidos em cima. Considera-se por isso a mesma defasagem.

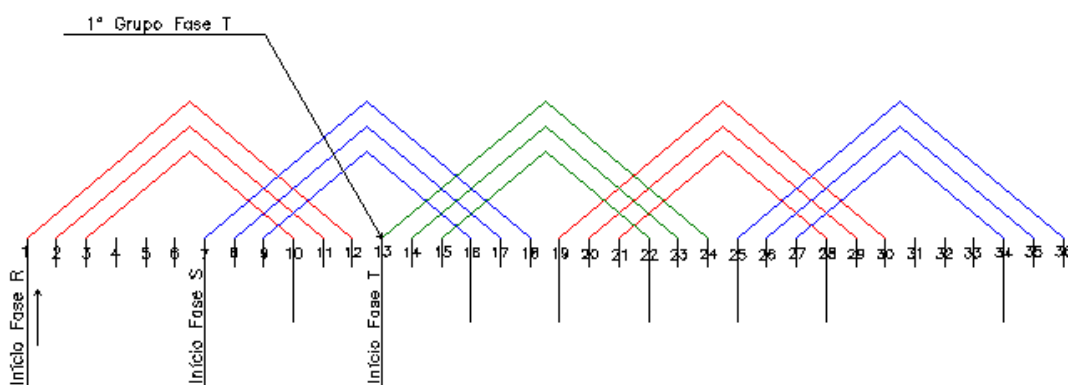


Figura A.5 - Esquema de Ligação 1º Grupo Fase T

- O 6º Passo - Consiste em desenhar-se os restantes grupos da fase T considerando-se os cálculos apresentados em cima. Considera-se a mesma distribuição.

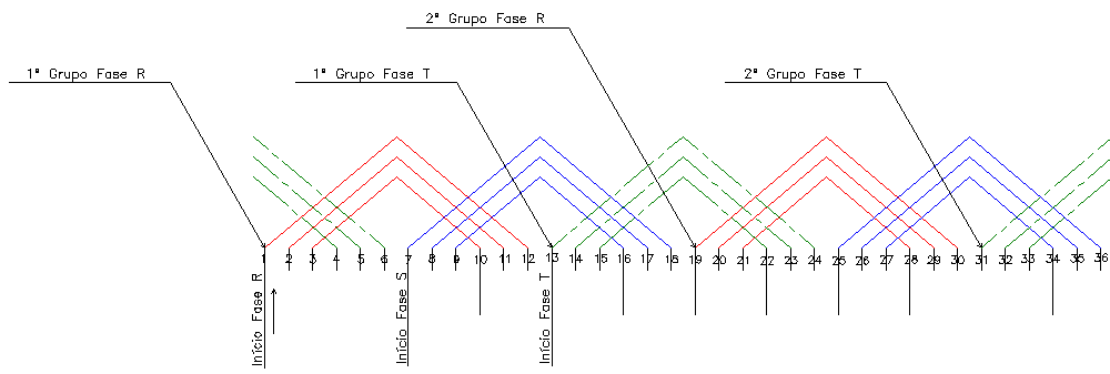
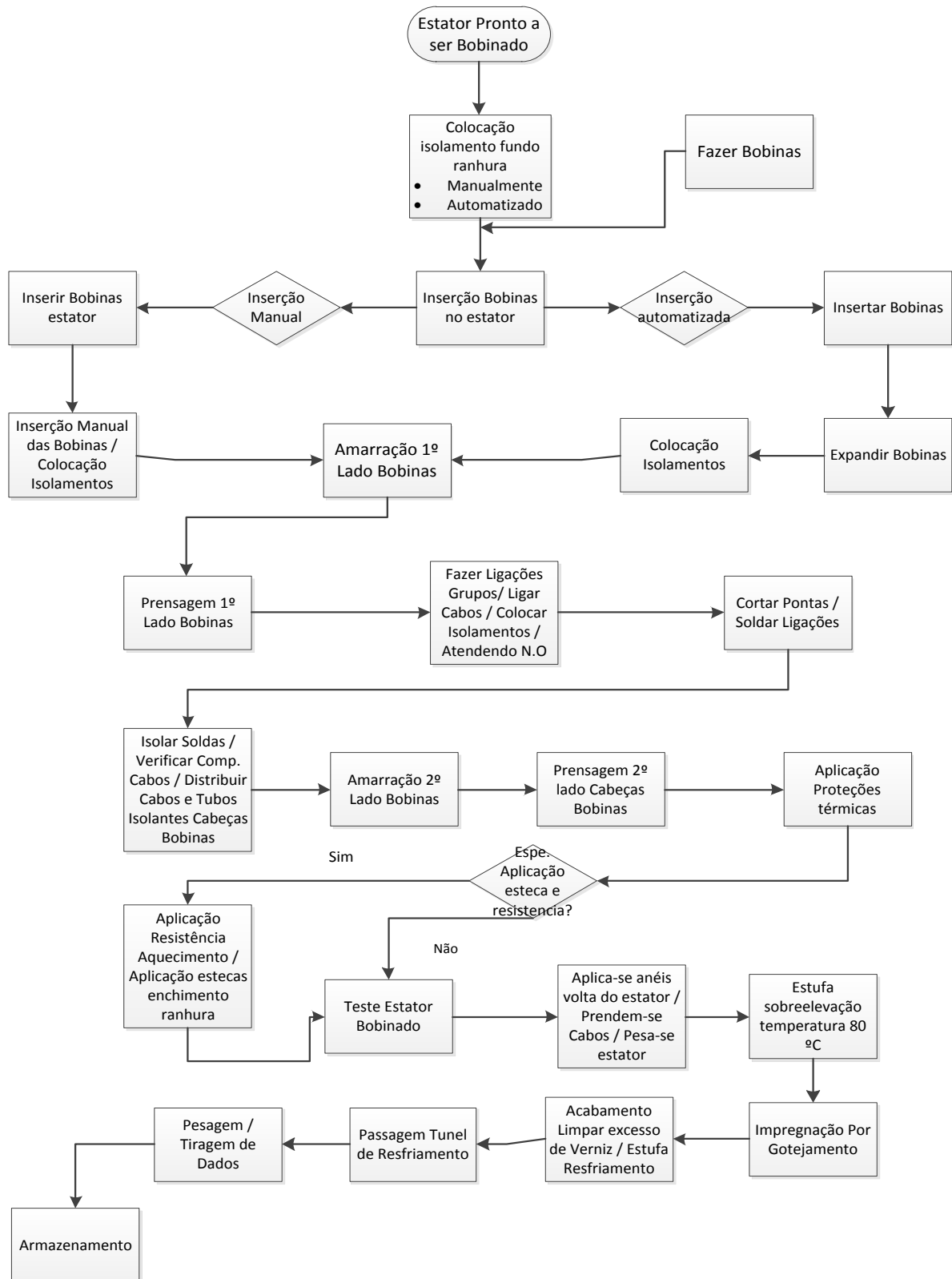


Figura A.6 - Esquema de Ligação 2º Grupo Fase T

Anexo A

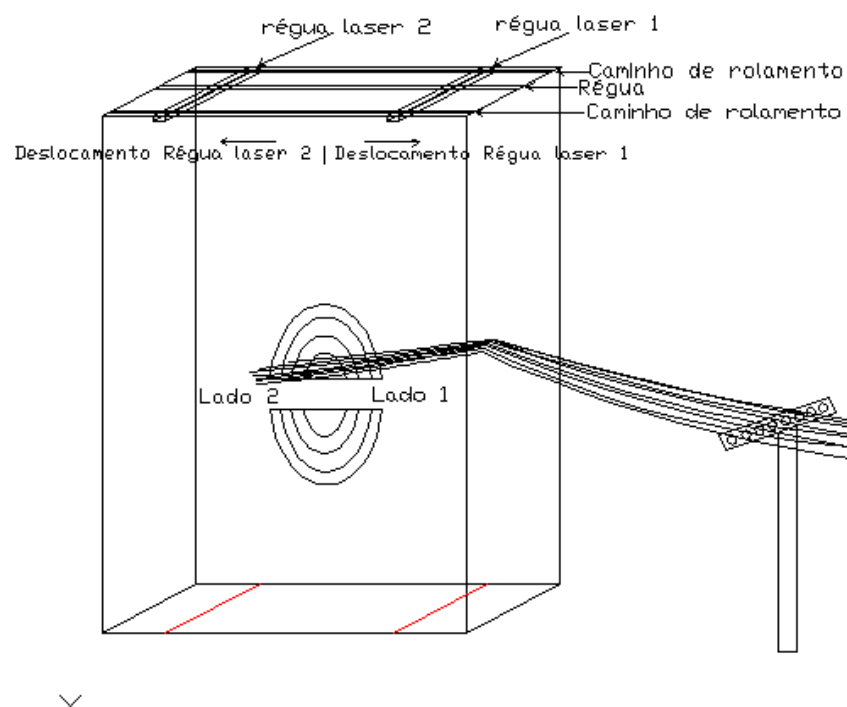
Fluxograma Processo de Bobinagem



Anexo B

Método Proposto Redução Refugo de Cobre nas Bobinadeiras.

Procedimento operação

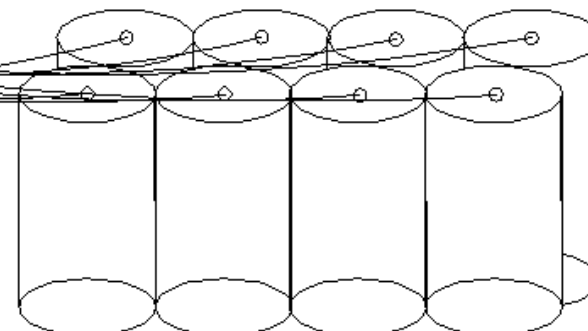


Réguas laser 1

- Deslocamento pelo operador da régua laser até ao ponto de referência (início ponta bobina junto ao molde lado 1) variável com o molde.
- Deslocar a régua laser 1 no sentido indicado, desde o ponto de referência adicionando o valor indicado na N.D.

Réguas laser 2

- Deslocamento pelo operador da régua laser até ao ponto de referência (início ponta bobina junto ao molde lado 2), variável com o molde.
- Deslocar a régua laser 2 no sentido indicado, desde o ponto de referência adicionando o valor indicado na N.D.



Anexo C

Motor Dahlander

D.1 - Introdução:

Um motor dahlander é um motor de indução trifásico com características especiais. Este motor possui duas velocidades de rotação. Pela fórmula da velocidade síncrona $N_s = (120 \times f)/p$ vê-se que ela depende do número de polos e da frequência. O tipo de motor apresentado permite uma alteração do número de polos do motor alterando-se assim a sua velocidade de rotação.

Para isso é necessário que as conexões do motor estejam preparadas para que o motor permita a operação em duas velocidades distintas.

Ao alterar-se a velocidade do campo girante do estator, altera-se a velocidade do eixo do motor, se a frequência do estator é constante, deve-se mudar o número de pólos pela modificação das conexões das bobinas dos enrolamentos. No caso do motor com rotor em gaiola de esquilo, basta alterar as conexões do estator. Geralmente, os enrolamentos do estator é projetado para ter dois conjuntos iguais de bobinas por fase, que podem ser conetadas em série ou em paralelo [14]

Como as ligações das bobinas da mesma fase e também as ligações entre as fases podem ser alteradas, as características dos enrolamentos finais também se alteram, o que resulta em diferentes condições de funcionamento. Por exemplo enrolamentos do estator em estrela série e paralelo, alimentados pela mesma tensão de linha, resultam, respetivamente, tensões sobre os enrolamentos de cada fase - pólo iguais a $V_L/2\sqrt{3}$ e $V_L/\sqrt{3}$, o que significa que o fluxo do entreferro por pólo gerado pela estrela série é aproximadamente 50 % daquele gerado pela estrela paralela. Por outro lado, o estator conetado em estrela série e alterado para triângulo série, alimentados pela mesma tensão de linha, tem o seu fluxo do entreferro por polo multiplicado por $\sqrt{3}$. Sendo assim ao fazer-se o controlo da velocidade, é necessário definir-se com que valor de fluxo de controlo será realizado o controlo de velocidade.

É possível concluir-se que:

$$\frac{B_{p1}}{B_{p2}} = \frac{E_{p1}}{E_{p2}} \frac{p_1 N_{p2}}{p_2 N_{p1}} \quad (D.1)$$

Em que:

B_{p1} = Fluxo do campo Magnético referente ao menor número de Polos.

B_{p2} = Fluxo do campo magnético referente ao maior número de Polos.

E_{p1} = FEM do entreferro referente ao menor número de Polos

E_{p2} = FEM do entreferro referente ao maior número de Polos

p_1 = Menor número de Polos

p_2 = Maior número de Polos

N_{p1} = Número efetivo de espiras em série por Fase

N_{p2} = Número efetivo de espiras em série por Fase

Considerando-se a ligação em estrela série (Y) dos enrolamentos de estator alimentados por uma fonte de tensão de linha V_L e que consome da linha a corrente I_n , neste caso a potência de entrada é $3 \times \left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right) \times I_n \times \cos \varphi_s$ e o torque desenvolvido se consideradas desprezáveis as perdas nas resistências do rotor e as perdas mecânicas é dado por:

$$T_Y = \frac{3}{\omega_{sm}} \frac{V_L}{\sqrt{3}} I_n \cos \varphi_s \quad (D.2)$$

Se a ligação for alterada para estrela paralelo (YY), com cada bobina fase- polo sendo percorrida pela corrente nominal, a potência torna-se $3 \times \frac{2 \times V_L \times I_n}{\sqrt{3}} \cos \varphi'_s$. Como o número de polos diminuiu para metade, a nova velocidade síncrona é $2\omega_{sm}$, o torque é dado pela relação

$$T_{YY} = \frac{3}{2\omega_{sm}} \frac{V_L}{\sqrt{3}} I_n \cos \varphi'_s \quad (D.3)$$

Se considerarmos por simplicidade, a indutância de magnetização muito maior que a indutância de dispersão do estator, para um dado escorregamento, pode-se admitir que $\cos \varphi_s = \cos \varphi'_s$ e portanto o torque desenvolvido nos dois casos é igual. [15]

Uma das desvantagens deste método é que a velocidade não varia continuamente e sim a passos discretos, geralmente na proporção 2:1.

Na elaboração deste tipo de enrolamento devem ser consideradas algumas características.

O enrolamento de camada única não é indicado para este tipo de enrolamento porque com o menor número de polos aparecem intensos campos harmônicos superiores ao normal que prejudicam a partida do motor. Por isso os enrolamentos devem possuir as seguintes características:

- ✓ Enrolamento em camada dupla.
- ✓ Características do projeto baseadas no menor número de polos (passo das bobinas, passo polar, número de bobinas por grupo...).
- ✓ Cada uma das três fases desfasadas entre si de 120° elétricos.
- ✓ Passo encurtado de 50 % de forma a ser melhorada a curva do campo magnético.

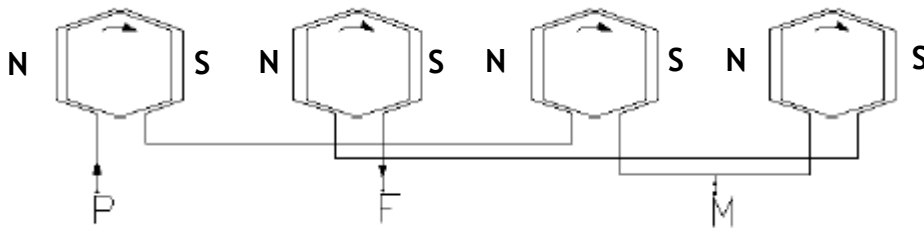


Figura D.1 - Ligação das bobinas com formação do maior número de polos

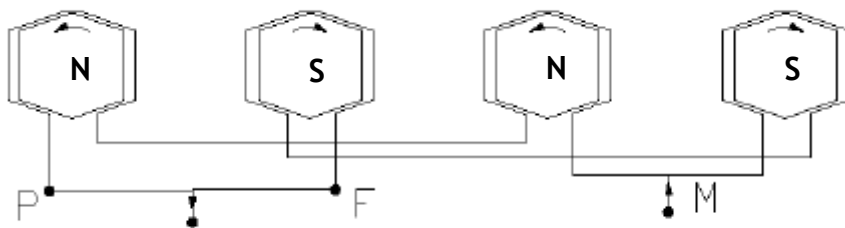


Figura D.2 - Ligação das bobinas com formação do menor número de polos

D.1.1 - Mudança do número de Polos:

Nos enrolamentos com as características enunciadas anteriormente, podem ser obtidas duas velocidades com uma relação de 1:2 variando o número de polos pela simples modificação das ligações dos enrolamentos, para isso utiliza-se o método de formação de polos por polos consequentes ou por polos.

A formação de polos consequentes representada na figura D.1, forma 8 polos, 4 polos Norte e 4 Polos sul, neste caso de formação de polos cada grupo de bobina forma 2 Polos totalizando -se assim 8 Polos. A formação dos polos deve-se à inversão do sentido da corrente nas bobinas se se observar a figura D.1, a corrente inverte o sentido 8 vezes.

Na formação de polos pela interligação por Polos situação representada na figura D.2, cada grupo de bobinas forma 1 único polo, apenas existe inversão do sentido da corrente em cada bobina. Forma-se assim apenas 4 polos.

D.1.2 - Ligação das fases na ligação dahlander

As três fases de um enrolamento em ligação dahlander podem ser agrupadas em estrela ou triângulo, e as duas metades de cada fase podem por sua vez serem ligadas em série ou em paralelo. As combinações mais usadas são: estrela, dupla estrela; triângulo, dupla estrela; isto é estrela em série, estrela em paralelo; triângulo em série e estrela paralelo.

Ligação Estrela, Dupla Estrela:

Agrupam-se internamente unindo-se os fins das três fases num nó único formando uma estrela simples, conduz-se até a caixa de terminais 6 terminais independentes, três dos quais são os princípios das três fases (U8,V8,W8) e os outros três correspondem às tomadas centrais de cada fase (U4,V4,W4) como pode ser visto na figura D.4.

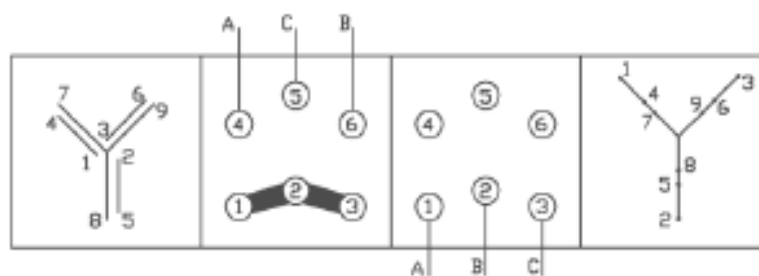


Figura D.3 - Ligações na caixa de ligação para configuração de dupla velocidade.

É possível efectuar-se a ligação do motor de duas formas distintas alterando-se a sua velocidade de operação:

1. Deixa-se livre os terminais U4, V4, W4 das ligações dos meio- enrolamentos e ligam-se as fases de alimentação aos terminais U8,V8,W8, obtendo-se assim a ligação em estrela série para o maior número de pólos (menor rotação).
2. Unindo-se os terminais U8,V8 e W8 forma-se uma estrela em paralelo ou dupla estrela, a alimentação das três fases será feita agora pelos terminais U4,V4 e W4, obtem-se assim o menor número de polos (maior velocidade).

A figura que se segue mostra estes dois tipos de configurações:

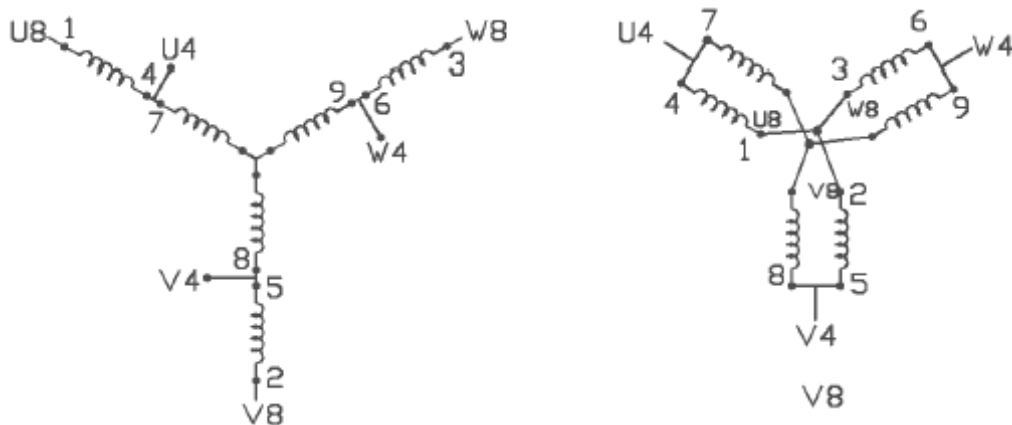


Figura D.4 - Configurações possíveis de ligação para dupla velocidade

Ligação Triângulo , Estrela Paralelo:

Neste tipo de ligação agrupam-se internamente em triângulo as três fases do enrolamento. São levados até à caixa de terminais 6 cabos, três correspondem aos vértices do triângulo U8,V8 e W8 e os outros três correspondem às tomadas das metades das fases U4,V4 e W4 como é indicado na figura D.6.

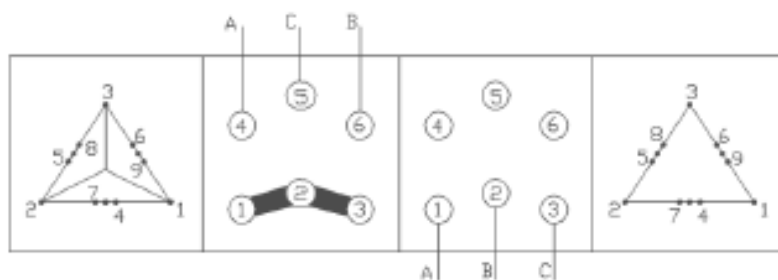


Figura D.5 - Ligações na caixa de ligação para configuração de dupla velocidade.

É possível efectuar-se a ligação do motor de duas formas distintas alterando-se a sua velocidade de operação:

1. Deixam-se abertos os terminais U4, V4, W4 do meio dos enrolamentos e ligam-se as fases de alimentação da rede aos terminais U8, V8 e W8, isto é, a ligação triângulo série para o maior número de pólos (menor velocidade).
2. Unem-se os vértices do triângulo U8, V8 e W8 num único nó, o enrolamento assumirá assim a configuração estrela paralelo. As três fases da rede serão conectadas aos terminais U4, V4 e W4, os seis meios enrolamentos passam a ser alimentados em paralelo. Com isto temos o menor número de pólos (maior velocidade).

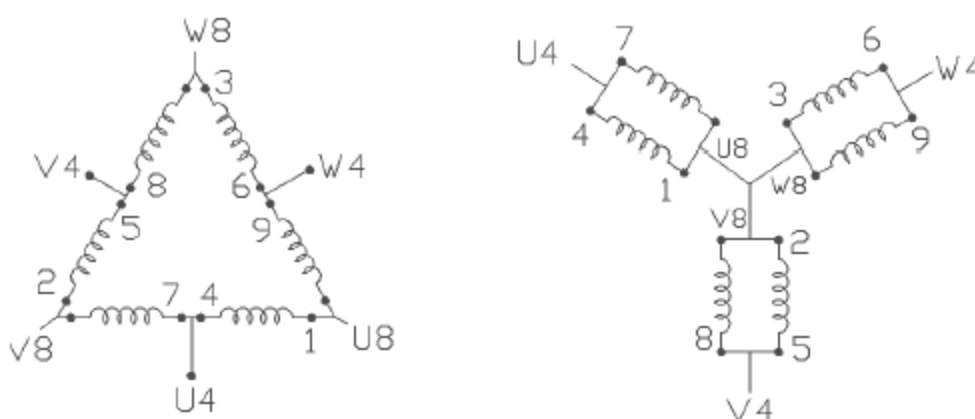


Figura D.6 - Configurações possíveis de ligação para dupla velocidade