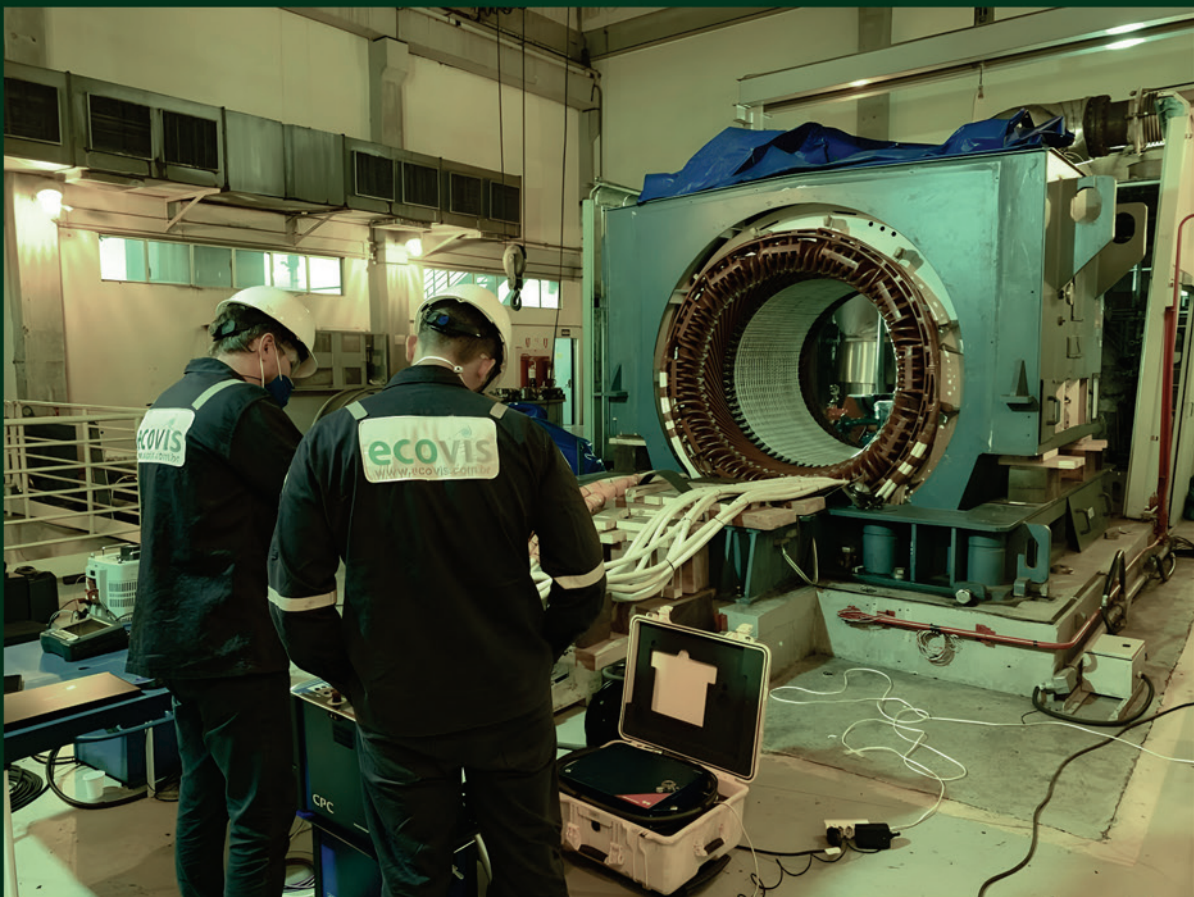


ecovis

Soluções para indústria e geração de energia

MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

CURSO PROFISSIONAL



Grupo Ecovis © 2024

Organizador de Conteúdo

EDILBERTO XXXX

Diagramação

OFICINA BOX

Capa

SAFFDSF

Revisão

ADFADFDSF

Impressão

IMPRESSUL

FICHA CATOGRÁFICA

24-189129

CDD-920.71

Índices para catálogo sistemático:

1. Homens : Histórias de vida : Autobiografia 920.71
Tábata Alves da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9253

DEDICATÓRIA

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de fornecer um conteúdo técnico e detalhado sobre máquinas elétricas rotativas, voltado tanto para profissionais quanto para estudantes da área de engenharia elétrica e eletrotécnica. Nosso intuito é capacitar e atualizar os conhecimentos dos leitores, proporcionando uma compreensão profunda dos fundamentos, características, manutenção e ensaios elétricos dessas máquinas.

Esta obra é fruto do trabalho em conjunto de uma equipe altamente qualificada e com vasta experiência de fábrica e campo no setor. O Grupo ECOVIS é especializado em máquinas elétricas rotativas e possui mais de 10 anos de atuação no mercado de serviços em campo, dedicando-se a oferecer serviços e produtos de alta qualidade, garantindo que nossos conteúdos sejam precisos e relevantes e que acrescentem conhecimento a todos que a ele tenham acesso. Busca-se, ao fim, contribuir para a formação de profissionais competentes, capazes de enfrentar os desafios do mercado com conhecimento sólido e atualizado.

Gostaríamos de agradecer a todos os colaboradores que participaram do desenvolvimento desta apostila. Seus conhecimentos, dedicação e comprometimento foram fundamentais para a realização deste projeto. Em especial, destacamos a contribuição de Bruno Mena, Marcelo Borchardt, Fabiano Ceschin, Izael Bernardo, Edilberto Lee, entre outros, cujas habilidades e expertise foram essenciais para a elaboração deste material.

Esperamos que esta apostila seja uma ferramenta valiosa, capaz de contribuir em sua jornada de aprendizado e desenvolvimento profissional. Que ela sirva não apenas como um guia técnico, mas também como uma fonte de inspiração para alcançar novos patamares em sua carreira profissional. Utilize este material para explorar, aprender e resolver problemas reais, contribuindo assim para um futuro mais inovador e eficiente.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 HISTÓRICO	14
2.1 Nascimento de máquinas elétricas girantes	14
2.2 Evolução de motores e geradores elétricos	15
2.3. Aplicação	16
3 NOÇÕES FUNDAMENTAIS E ASPECTOS CONSTRUTIVOS	18
3.1 Fundamentos da eletromecânica	18
3.2 Lei de Faraday	18
3.3 Lei de Lenz	18
3.4 Circuito de corrente alternada	19
3.5 Tensão nominal	20
3.5.1 Tensão da rede de alimentação em função do motor	20
3.5.2 Distorção harmônica	21
3.5.3 Fator de desvio	21
3.5.4 Modulação de tensão	22
3.5.5 Desbalanceamento de tensão	22
3.5.6. Transiente de tensão	22
3.5.7 Tolerância de Tensão	22
3.5.8 Tensão residual	22
3.6 Frequência nominal	22
3.7 Corrente nominal	23
3.8 Potência elétrica	23
3.8.1 Potência aparente, ativa, reativa e triângulo de potências	23
3.8.1.1 Potência aparente	23
3.8.1.2 Potência ativa	24
3.8.1.3 Potência reativa	24
3.8.1.4 Triângulo de potência	25
3.8.2 Fator de potência	25
3.8.2.1. Importância do Fator de Potência	26
3.8.2.2 Correção do Fator de Potência	26
3.8.3 Potência nominal	26
3.8.4 Potência de gerador elétrico	26
3.8.5 Potência equivalente	27
3.9 Conjugado	28
3.10 Energia e potência mecânica	28
3.11 Relação entre conjugado e potência	29
3.12 Energia e potência elétrica	29
3.13 Velocidade nominal	30
3.14 Velocidade síncrona	30
3.15 Escorregamento	30
3.16 Circuito equivalente	31
3.17 Força eletromotriz e corrente induzida	32
3.18 Conjugado eletromagnético	32

3.19	Conjugado de partida	33
3.20	Distribuição de potências e perdas	34
3.21	Fator de serviço (FS)	35
3.22	Rendimento	35
3.22.1	Importância do rendimento	36
3.23	Características de rede de alimentação	36
3.23.1	Sistema de alimentação alternada trifásica	36
3.23.2	Ligações do sistema trifásico	36
3.23.3	Ligação triângulo	36
3.23.4	Ligação Estrela	37
3.23.5	Ligações para Tensões Nominais Múltiplas	37
3.24	Desequilíbrio angular	38
3.25	Noções fundamentais de motores de indução	38
3.25.1	Vantagens	38
3.25.2	Campo magnético girante	39
3.25.3	Princípio de funcionamento	39
3.25.3.1	Motor de indução de gaiola	39
3.25.3.2	Motor de indução de rotor bobinado	40
3.26	Noções fundamentais de geradores	40
3.26.1	Princípio de funcionamento	40
3.26.2	Comportamento do gerador em vazio e sob carga	41
3.26.2.1	Carga puramente resistiva	42
3.26.2.2	Carga puramente indutiva	42
3.26.2.3	Carga puramente capacitiva	42
3.26.2.4	Cargas intermediárias	43
3.26.3	Excitação e desexcitação	43
3.26.4	Regulador de tensão	43
3.26.4.1	Proteção contra subfrequência	44
3.26.4.2	Potenciômetro de ajuste de valor teórico	44
3.26.5	Reatâncias	44
3.26.5.1	Unidade do conhecimento das reatâncias	45
3.26.5.2	Reatância subtransitória (X_d'')	45
3.26.5.3	Reatância transitória (X_d')	45
3.26.5.4	Reatância síncrona (X_d)	45
3.26.5.5	Conversão de reatâncias	46
3.26.6	Potência em máquinas de polos salientes (DFIG)	46
3.26.7	Queda de tensão	48
3.26.7.1	Cálculo da queda de tensão	48
3.26.7.2	Influência do fator de potência	49
3.26.7.3	Influência da carga inicial	49
3.26.7.4	Limitações na partida	49
3.27	Sobrecarga	50
3.28	Sobrevelocidade	50
3.29	Corrente de curto-circuito	51
3.30	Características construtivas	51
3.30.1	Introdução	51
3.30.2	Nomenclatura de motores	51
3.30.3	Normas aplicáveis	51

3.30.4	Componentes principais de geradores	51
3.30.4.1	Estator da máquina principal	51
3.30.4.2	Rotor da máquina principal	52
3.30.4.3	Estator da excitatriz principal	52
3.30.4.4	Rotor da excitatriz principal e diodos retificadores girantes	52
3.30.4.5	Excitatriz auxiliar	52
3.30.4.6	Enrolamento auxiliar (ou bobina auxiliar)	52
3.30.5	Componentes principais de motores	52
3.30.5.1	Carcaça/Estator	53
3.30.5.2	Rotor	53
3.30.5.2.1	Rotor de gaiola	53
3.30.5.2.2	Rotor bobinado (de anéis)	53
3.30.5.3	Eixo do rotor	54
3.30.6	Bobinagem	55
3.30.6.1	Curto entre espiras	56
3.30.6.2	Uma fase queimada	56
3.30.6.3	Duas fases queimadas	56
3.30.6.4	Três fases queimadas	56
3.30.6.5	Curto entre fases	56
3.30.6.6	Curto contra massa dentro da ranhura	56
3.30.6.7	Fase danificada por desbalanceamento da tensão de rede	56
3.30.6.8	Queima por rotor bloqueado	56
3.30.6.9	Queima por pico de tensão	56
3.30.6.10	Curto contra massa na saída da ranhura	57
3.30.7	Sistemas de refrigeração	57
3.30.7.1	Ventilação Axial	57
3.30.7.2	Ventilação mista	57
3.30.7.3	Ventilação bilateral simétrica	58
3.30.7.4	Ventilador	58
3.30.8	Placa de identificação	58
3.30.9	Terminais de aterramento	59
3.30.10	Caixa de ligação	59
3.30.10.1	Caixa de ligação de força	59
3.30.10.2	Caixa de ligação de acessórios	59
3.30.10.3	Caixa de ligação do rotor –Rotor de anéis	59
3.30.11	Acessórios e especialidades	59
3.30.11.1	Resistor de aquecimento	59
3.30.11.2	Proteção térmica	60
3.30.11.2.1	Classes térmicas	60
3.30.11.2.2	Elevação de temperatura	60
3.30.11.3	Dispositivos de proteção	60
3.30.11.3.1	Termoresistores	60
3.30.11.3.2	Termistores (PTC e NTC)	61
3.30.11.3.3	Termômetros	61
3.30.11.3.4	Termostatos	61
3.30.12	Formas construtivas normalizadas	62
3.30.13	Mancais	62
3.30.13.1	Mancal de Rolamento	62

3.30.13.1.1	Forma construtiva	62
3.30.13.1.2	Tipos de rolamentos	62
3.30.13.2	Mancal de deslize	63
3.30.13.2.1	Forma construtiva	63
3.30.14	Geradores com excitação por escovas	65
3.30.15	Geradores com excitação sem escovas (BRUSHLESS)	65
3.30.16	Máquinas de polos lisos e polos salientes	66
3.30.16.1	Lisos	66
3.30.16.2	Polos Salientes	67
3.30.17	Motores síncronos	67
3.31	Características do ambiente	68
3.31.1	Altitude	69
3.31.2	Temperatura do ambiente	69
3.31.3	Determinação da potência útil	69
3.31.4	Atmosfera ambiente	70
3.31.4.1	Ambientes agressivos	70
3.31.4.2	Ambiente contendo poeiras ou fibras	70
3.31.4.3	Locais em que a ventilação é prejudicada	70
3.31.4.4	Áreas de risco	71
3.31.4.5	Atmosferas explosivas	71
3.31.4.6	Classificação das áreas de risco	71
3.31.4.7	Classes de temperatura	71
3.31.4.8	Máquinas para área de risco	72
3.31.5	Graus de proteção	72
3.31.5.1	Código de identificação	72
3.31.5.2	Tipos usuais de proteção	73
3.31.6	Limites de ruído	73
3.32	Características de desempenho	73
3.32.1	Elevação de temperatura	73
3.32.1.1	Aquecimento do enrolamento	73
3.32.1.2	Vida útil de máquinas elétricas girantes	73
3.32.1.3	Classe de isolamento	74
3.32.1.4	Medida da temperatura do enrolamento	74
3.32.1.5	Temperatura máxima dos enrolamentos	75
3.32.2	Regime de serviço	75
3.32.2.1	Regimes padronizados para motores	76
3.32.2.2	Regimes padronizados para geradores	77
3.32.2.3	Designação do regime tipo	77
3.32.3	Diagrama de carga	78
3.32.4	Análise espectral de correntes	79
3.32.5	Operação em paralelo de geradores	79
3.32.5.1	Divisão de potência ativa (W)	80
3.32.5.2	Divisão de potência reativa (VAR)	80
3.33	Característica de partida	80
3.33.1	Limitação de corrente de partida	80
3.33.2	Chave Estrela-Triângulo	81
3.33.3	Chave compensadora (Autotransformador)	81
3.33.4	Partida Estática ou Soft-Starter	81

3.33.5 Partida com inversor de frequência	82
3.33.6 Partida com Reostato para motor de anéis	86
3.34 Características de aceleração	86
3.34.1 Potência nominal	86
3.34.2 Conjugado resistente da carga	87
3.34.3 Conjugado constante	87
3.34.3.1 Conjugado linear	87
3.34.3.2 Conjugado quadrático	88
3.34.3.3 Conjugado hiperbólico	88
3.34.3.4 Conjugado não definidos	88
3.34.4 Inércia da carga	89
3.34.5 Conjugado médio da carga	89
3.34.6 Conjugado e rotação do motor	89
3.34.7 Categorias – Valores mínimos normalizados	91
3.34.7.1 Categoria N	91
3.34.7.2 Categoria H	91
3.34.7.3 Categoria D	91
3.34.8 Tempo de rotor bloqueado (trb)	91
3.34.9 Conjugado motor médio (CMmed)	92
3.34.10 Tempo de aceleração	93
3.34.11 Potência dinâmica ou de aceleração	94
3.34.12 Regime de partida	94
3.34.13 Corrente de rotor bloqueado	95
3.34.13.1 Valores máximos normalizados	95
3.35 Sistema internacional	95
3.35.1 Generalidades	95
3.35.2 Conversão de unidades	96
4 MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS	98
4.1 Manutenção mecânica	99
4.1.1 Mancais	99
4.1.1.1 Mancal de rolamento	99
4.1.1.1.1 Nomenclatura	99
4.1.1.1.2 Folgas internas	99
4.1.1.1.3 Armazenagem	99
4.1.1.1.4 Troca de rolamentos	100
4.1.1.1.5 Lubrificação com graxa	101
4.1.1.1.6 Relubrificação de rolamentos	101
4.1.1.1.7 Manuseio, saúde e segurança	101
4.1.1.1.8 Defeitos em rolamentos	102
4.1.1.2 Mancal de deslizamento	102
4.1.1.2.1 Inspeção interna dos mancais	102
4.1.1.2.2 Pressão e Vazão do sistema de lubrificação	103
4.1.1.3 Lubrificação forçada	103
4.1.1.3.1 Características e aplicações	104
4.1.1.3.2 Componentes do sistema de lubrificação forçada	104
4.2 Manutenção elétrica	104
4.2.1 Inspeção no conjunto principal	105
4.2.1.1 Estator Principal	105

4.2.1.1.1 Pontos com efeito corona	106
4.2.1.1.2 Recuperação de Pontos com efeito corona	106
4.2.1.2 Rotor Principal	107
4.2.2 Inspeção dos cabos de alimentação do estator e rotor principal	108
4.2.2.1 Substituição dos cabos do estator	108
4.2.2.2 Substituição dos cabos do rotor	109
4.2.3 Sistema de excitação	110
4.3 Limpeza e secagem dos enrolamentos	110
4.4 Manutenção em motores com rotor bobinado	111
4.4.1 Preparação para Manutenção	111
4.4.2 Segurança e Conformidade	111
4.4.3 Processo de Desmontagem	111
4.4.3.1 Desmontagem do Conjunto Anel Coletor	111
4.4.3.2 Desmontagem do Conjunto de Acionamento do Porta-Escovas	111
4.4.3.3 Desmontagem do Conjunto Porta-Escovas	111
4.4.4 Processo de Montagem	112
4.4.4.1 Preparação e Montagem do Conjunto Anel Coletor	112
4.4.4.2 Montagem do Conjunto de Acionamento do Porta-Escovas	112
4.4.4.3 Montagem do Conjunto Porta-Escovas	112
4.4.5 Escovas	113
4.5 Acoplamento	113
4.5.1 Lubrificação de acoplamentos	114
4.6 Vibração	115
4.6.1 Definição	115
4.6.2 Fontes vibratórias	115
4.6.3 Grandezas físicas	115
4.6.4 Níveis de vibração	116
4.6.5 Parâmetros de vibração	116
4.6.6 Sensores	116
4.6.7 Equipamento (Analisador de vibração)	117
4.6.8 Pontos de medição	117
4.6.9 Limites	118
4.6.10 Análise de espectros	118
4.6.11 Envelope de aceleração	119
4.6.12 Monitoramento de Vibração Online	120
4.7 Alinhamento	120
4.7.1 Projeto de alinhamento	120
4.7.2 Alinhamento de eixo	121
4.8 Balanceamento	122
4.9 Plano de manutenção	122
4.10 Armazenamento, transporte e estoque	123
4.10.1 Cuidados com armazenamento	123
4.10.2 Cuidados com transporte	124
4.10.3 Peças sobressalentes	124
5 ENSAIOS ELÉTRICOS	126
5.1 Tipos de ensaios	126
5.2 Verificação dos acessórios	127
5.2.1 Testes e verificação em diodos	127

5.3 Resistência ôhmica	128
5.4 Resistência de isolamento	129
5.4.1 Índice de polarização	130
5.4.2 Índice de absorção	130
5.5 Surge Test	130
5.6 Ensaio de tensão aplicada (HIPOT)	131
5.7 Loop-Test	132
5.8 Ensaio Elétricos Especializados – Diagnose (DIELEC)	132
5.8.1 Ensaio de Polarização e Despolarização (PDCA)	133
5.8.2 Step Voltage	133
5.8.3 Ensaio de Fator de Dissipação (Tangente Delta) e Tip-Up	134
5.8.4 Ensaio de Capacitância e Tip-Up	135
5.8.5 Análise avançada de Descargas Parciais	135
5.8.5.1 Definição	135
5.8.5.2 Separação dos ruídos	136
5.8.5.3 Instrumento de medição	136
5.8.5.4 Técnicas de análise	137
5.8.5.5 Clusters	138
5.8.5.6 Valores limites para resultados PD segundo as normas internacionais	138
5.8.5.7 Localização das atividades PD	139
5.8.5.8 Microbolhas	140
5.8.5.9 Delaminação no interior da isolação	140
5.8.5.10 Descargas dentro da ranhura	140
5.8.5.11 Delaminação entre cobre e isolação principal	140
5.8.5.12 Descargas de superfície nas cabeças de Bobinas	140
5.8.5.13 Descargas espaciais nas cabeças de bobinas	141
5.8.5.14 Descargas na luva anticorona	141
5.8.5.15 Ruídos de excitação estática	141
5.8.5.16 Coleta e Análise dos Dados	141
5.8.6 Laudo técnico	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

1



INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas são dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica, e vice-versa. Essa invenção é considerada uma das mais importantes da história, pois revolucionou o mundo e transformou a vida das pessoas de maneiras inimagináveis desde o final do século XIX. Hoje, as máquinas elétricas são indispensáveis e estão presentes em quase todas as áreas da nossa vida, desde a iluminação em nossas casas até produtos industrializados que consumimos. A demanda por energia elétrica tem aumentado gradativamente ao longo das últimas décadas, impulsionada pelo crescimento populacional, industrialização e avanços tecnológicos.

O cenário industrial, em qualquer setor, move o mundo. Podemos afirmar que a importância das máquinas elétricas para as indústrias é inquestionável. Elas são fundamentais para garantir a eficiência e a produtividade dos processos industriais, além de contribuir para a preservação do meio ambiente e para a redução de custos operacionais.

De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (AIE), as máquinas elétricas utilizadas nas indústrias são responsáveis por cerca de 70% do consumo total de eletricidade no mundo. Esse dado é significativo, uma vez que a indústria é um setor chave da economia global e, portanto, o consumo excessivo de energia por essas máquinas pode ter um impacto significativo no meio ambiente. No entanto, é importante ressaltar que há uma tendência crescente de utilização de tecnologias mais eficientes em termos de energia, como motores elétricos de alta eficiência e sistemas de controle de motor avançados. Essas tecnologias podem reduzir o consumo de energia em até 30%, o que pode resultar em economias significativas de custos e redução de emissões de gases poluentes.

A geração de energia elétrica por meio de máquinas elétricas é um dos pilares da nossa sociedade moderna. Entendendo o conceito de que a eletricidade é essencial para o funcionamento de praticamente todas as atividades humanas, desde o carregamento de celulares até a iluminação de cidades inteiras, em conjunto com a importância de máquinas elétricas para as indústrias, podemos reconhecer que a geração de energia elétrica por geradores elétricos, é o coração da sociedade mo-

derna que não nos permite olhar para um passado sem eletricidade, mas que nos obriga a olhar para o futuro de evolução com maior eficiência energética.

No entanto, essas máquinas, seja para consumo ou geração de energia elétrica, estão sujeitas a diversos problemas, como desgaste, mau funcionamento e falhas, o que pode causar sérios danos à produção e à segurança das pessoas. Nesse cenário, identificamos a atuação das empresas de manutenção, especializadas em garantir que as máquinas elétricas funcionem de forma eficiente e segura. Isso é fundamental para garantir a continuidade da produção e evitar acidentes. Além disso, contribuem para a sustentabilidade do mundo. Máquinas elétricas bem mantidas são mais eficientes em termos de consumo de energia, o que significa menos desperdício e menos impacto ambiental. A manutenção prolonga a vida útil das máquinas, reduzindo a necessidade de substituição e descarte precoce.

É fundamental que os profissionais que trabalham com esses equipamentos tenham um conhecimento sólido sobre seu funcionamento e saibam como realizar a manutenção preventiva, corretiva e preditiva, a fim de evitar falhas. Neste curso, iremos explorar com detalhes as noções fundamentais de funcionamento, formas construtivas, manutenção e ensaios elétricos de motores e geradores de energia elétrica.

2



HISTÓRICO

2 HISTÓRICO

2.1 Nascimento de máquinas elétricas girantes

A história da máquina elétrica girante tem seu início na antiguidade com a descoberta do magnetismo.

No século VI a.C., o filósofo grego Tales de Mileto observou que a pedra magnetita atraía pequenos pedaços de ferro. Esse foi um dos primeiros registros da interação magnética.

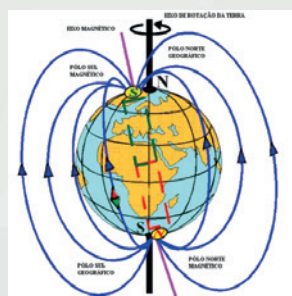


Os chineses, por volta do século IV a.C., descobriram as propriedades magnéticas da agulha de magnetita e começaram a utilizá-la como uma bússola primitiva para navegação.



Durante a Idade Média, os árabes expandiram o conhecimento grego e chinês sobre magnetismo. A palavra "magneto" tem origens árabes. A bússola chegou à Europa por volta do século XII, trazida pelos marinheiros que haviam entrado em contato com a tecnologia chinesa. Sua introdução teve um impacto significativo nas viagens de exploração.

Com a chegada do período do renascimento, o médico e cientista inglês William Gilbert publicou "De Magnete" em 1600. Ele cunhou o termo "eletricidade" e estabeleceu a diferença entre a eletricidade estática e o magnetismo. Gilbert também demonstrou que a Terra age como um ímã.



Isaac Newton, no século XVII, contribuiu para a compreensão do magnetismo, desenvolvendo leis sobre a atração e repulsão magnética. Edmond Halley e Henry Graham, no século XVIII, contribu-

íram para o entendimento da variação magnética ao longo do tempo.

Em paralelo ao marco histórico do magnetismo, temos a história da descoberta da eletricidade, marcada por contribuições de cientistas e inventores que expandiram nosso entendimento desse fenômeno. Desde a Antiguidade, muitas culturas perceberam fenômenos elétricos.

Os gregos antigos, por exemplo, sabiam que ao esfregar âmbar (resina fóssil) em pele de animal, o âmbar adquiria a capacidade de atrair objetos leves, indicando a presença de eletricidade estática.

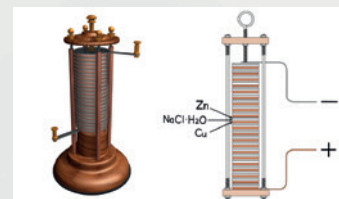


Otto von Guericke, um cientista alemão, construiu a primeira máquina eletrostática em 1660. Ele usou uma esfera de enxofre para gerar eletricidade estática por atrito.

Benjamin Franklin, nos anos 1750, realizou a famosa experiência com uma pipa durante uma tempestade para provar que os raios eram uma forma de eletricidade atmosférica. Ele cunhou os termos "positivo" e "negativo" para descrever as cargas elétricas.

Ewald Georg von Kleist e Pieter van Musschenbroek, em 1745, independentemente inventaram o Leyden Jar, um dispositivo de armazenamento de carga elétrica. Cientistas como Charles-François du Fay contribuíram com a teoria de que existiam dois tipos de eletricidade: "vítrica" (positiva) e "resinosa" (negativa). Luigi Galvani, no final do século XVIII, observou contrações musculares em sapos quando expostos a correntes elétricas.

Alessandro Volta, em resposta, inventou a pilha voltaica em 1800, uma fonte contínua de corrente elétrica.

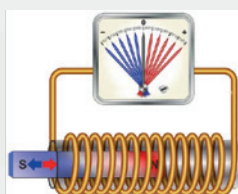


A partir de então, se deu início as experiências com a decomposição da água em um átomo de oxigênio e dois de hidrogênio. Em 1802, Humphry Davy separa eletronicamente o sódio e o potássio. Mesmo com a fama das pilhas de Volta, foram criadas pilhas mais

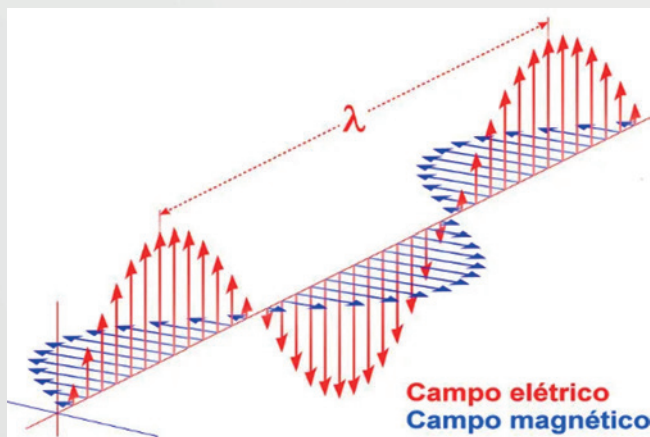
eficientes. John Frederic Daniell inventou-as em 1836 na mesma época das pilhas de Georges Leclanché e a bateria recarregável de Raymond Louis Gaston Planté.

O físico Hans Christian Ørsted, observa que um fio de corrente elétrica age sobre a agulha de uma bússola. Com isso, percebe-se que há uma ligação entre magnetismo e eletricidade, dando início ao estudo do eletromagnetismo. A relação de eletricidade e magnetismo foi um dos maiores marcos da história. Em 1831, Michael Faraday descobre que a variação na intensidade da corrente elétrica que percorre um circuito fechado induz uma corrente em uma bobina próxima. Uma corrente induzida também é observada ao se introduzir um ímã nessa bobina. Essa indução magnética teve uma imediata aplicação na geração de correntes elétricas.

Uma bobina próxima a um ímã que gira é um exemplo de um gerador de corrente elétrica alternada.



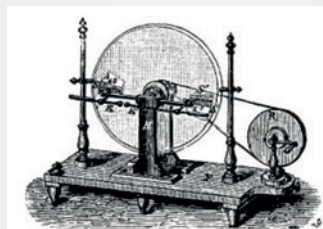
James Clerk Maxwell, no século XIX, unificou as teorias elétricas e magnéticas em suas equações, mostrando que campos elétricos e magnéticos estão inter-relacionados. Maxwell formulou as equações que unificaram as



teorias elétricas e magnéticas, estabelecendo a base para a teoria eletromagnética.

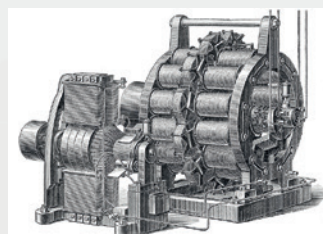
A publicação do tratado sobre eletricidade e magnetismo, de Maxwell, em 1873, representa um enorme avanço no estudo do eletromagnetismo. A luz passa a ser entendida como onda eletromagnética, uma onda que consiste em campos elétricos e magnéticos perpendiculares à direção de sua propagação.

Em 1832, o cientista italiano S. Dal Negro construiu a primeira máquina de corrente alternada com movimento de vaivém.



Já no ano de 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 eletroímã 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.

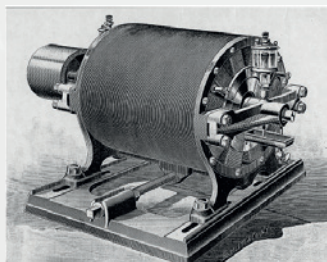
O ano de 1866 pode ser considerado, em termos práticos, como o ano de nascimento da máquina elétrica, pois foi nesta data que o cientista alemão Werner Siemens inventou o primeiro gerador de corrente contínua autoinduzido, sem a utilização de ímã permanente, provando que a tensão necessária para o magnetismo 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 1200rpm. A nova máquina de corrente contínua apresentava alto custo de fabricação e vulnerabilidade em serviço (por causa do comutador) marcaram-na de tal modo que muitos cientistas dirigiram suas atenções para o desenvolvimento de um motor elétrico mais barato, mais robusto e de menor custo de manutenção. Entre os pesquisadores preocupados com esta idéia destacam-se o iugoslavo Nicola Tesla, o italiano Galileu Ferraris e o russo Michael von Dolivo Dobrowolsky. Os esforços não se restringiram somente ao aperfeiçoamento do motor de corrente contínua, mas também se cogitou de sistemas de corrente alternada, cujas vantagens já eram conhecidas desde 1881. Em 1885, o engenheiro eletricista Galileu Ferraris construiu um motor de corrente alternada de duas fases. Ferraris, apesar de ter inventado o motor de campo girante, concluiu erroneamente que motores construídos segundo este

princípio poderiam, no máximo, obter um rendimento de 50% em relação à potência consumida.

E Tesla apresentou, em 1887, um pequeno protótipo de motor de indução bifásico com rotor em curto-circuito. Também este motor apresentou rendimento insatisfatório, mas impressionou de tal modo a firma norte-americana Westinghouse, que está lhe pagou um milhão de dólares pelo privilégio da patente, além de se comprometer ao pagamento de um dólar para cada HP que viesse a produzir no futuro. O baixo rendimento deste motor inviabilizou economicamente sua produção e três anos mais tarde as pesquisas foram abandonadas.

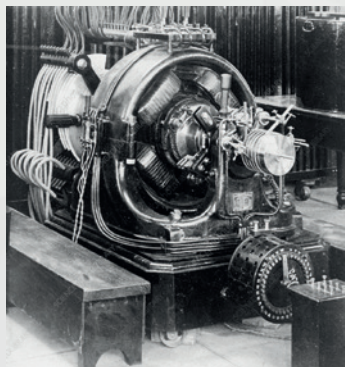


Foi o engenheiro eletricista Dobrowolsky, da firma AEG, de Berlim, que, persistindo na pesquisa do motor de corrente alternada entrou, em 1889, com o pedido de patente de um motor trifásico com rotor de gaiola.



O motor apresentado tinha uma potência de 80 watts, um rendimento aproximado de 80% em relação à potência consumida e um excelente conjugado de partida. As vantagens do motor com rotor de gaiola em relação ao de corrente contínua eram marcantes: construção mais simples, silencioso, menor manutenção e alta segurança em operação. Dobrowolsky desenvolveu, em 1891, a primeira fabricação em série de motores assíncronos, nas potências de 0,4 a 7,5kW.

No final do século XIX, Nikola Tesla desenvolveu o gerador alternador, que produzia corrente alternada (CA). Isso se tornou a base para a geração e distribuição eficiente de eletricidade em larga escala.



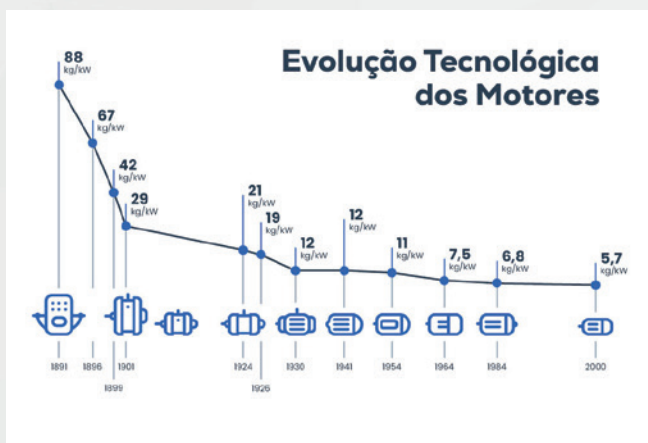
2.2 Evolução de motores e geradores elétricos

A evolução de máquinas elétricas rotativas é uma história rica, marcada por descobertas científicas e avanços tecnológicos. Esta evolução tecnológica é caracterizada principalmente, pelo desenvolvimento de novos materiais isolantes, os quais suportam temperaturas mais elevadas. Durante o século XX, as máquinas elétricas experimentaram avanços significativos em termos de eficiência, controle e materiais. Introdução de ímãs de terras raras, novos materiais de isolamento e avanços eletrônicos contribuíram para melhor desempenho.

Nikola Tesla contribuiu significativamente ao desenvolver o motor de indução em 1888. Esse tipo de motor não requer escovas e é amplamente utilizado na atualidade. A corrente alternada (CA) é essencial para o funcionamento do motor de indução. Charles Proteus Steinmetz, no final do século XIX, contribuiu para o desenvolvimento dos motores síncronos, que operam em sincronia com a frequência da corrente alternada. No final do século XX, surgiram motores de passo e motores brushless, oferecendo maior precisão e eficiência em diversas aplicações, como automação industrial e eletrônicos. Avanços recentes incluem o desenvolvimento de motores lineares, que eliminam a necessidade de componentes mecânicos rotativos, e a pesquisa em motores supercondutores, que prometem eficiências ainda maiores. A evolução dos motores elétricos continua à medida que a tecnologia avança, impulsionando a eficiência, a confiabilidade e a versatilidade desses dispositivos em uma ampla gama de aplicações industriais, comerciais e de consumo. Atualmente os motores elétricos estão presentes em praticamente todas as instalações industriais, comerciais e residenciais.

O desenvolvimento de condutores esmaltados, dos papéis ou filmes isolantes sintéticos, das chapas magnéticas, das ligas de alumínio e dos materiais plásticos contribuíram notoriamente para a redução da relação peso x potência dos motores elétricos.

Observando-se o peso de um motor de mesma potência no decorrer do tempo, podemos verificar que o motor atual tem apenas 8% do peso do seu antecessor em 1891. Confrontando-se os dados de catálogos de diferentes fabricantes, em diferentes épocas, pode-se constatar que houve uma redução de peso e, conseqüentemente, redução do tamanho construtivo do motor (para



uma mesma potência) de aproximadamente 20% a cada década, excetuando as duas últimas, nas quais a redução foi menos acentuada. Isto mostra a necessidade de revisão periódica das normas, para assim adaptar a relação entre potências e cargas aos tamanhos alcançados através do desenvolvimento tecnológico.

Michael Faraday desenvolveu o dínamo, o primeiro gerador elétrico prático, em 1831. Era composto por um disco de cobre rotativo entre os polos de um ímã, gerando corrente contínua por indução eletromagnética. A eficiência inicial era limitada, mas esse conceito pioneiro estabeleceu as bases para futuros desenvolvimentos. Engenheiros como Hippolyte Pixii e Werner von Siemens aprimoraram o design do dínamo, introduzindo a comutação automática para gerar corrente contínua mais estável. A década de 1870 viu o uso crescente de dínamos em iluminação pública e industrial. No final do século XIX, geradores de corrente contínua tornaram-se padrão para sistemas de distribuição de energia elétrica. Thomas Edison e sua equipe contribuíram significativamente para o desenvolvimento desses geradores. Uma disputa entre Thomas Edison (corrente contínua) e Nikola Tesla/George Westinghouse (corrente alternada) ocorreu no final do século XIX. A corrente alternada (CA) venceu devido à sua capacidade de transmissão eficiente a longas distâncias. No início do século XX, os geradores síncronos se tornaram proeminentes em usinas de energia elétrica. O rotor do gerador gira em sincronia com a frequência da corrente alternada. O século XX trouxe inovações como os geradores de corrente contínua sem escovas, aumentando a eficiência e reduzindo a manutenção. No século XXI, pesquisas estão focadas em geradores mais eficientes, usando materiais avançados e tecnologias como supercondutores. Geradores inteligentes e sistemas de armazenamento de energia são áreas de desenvolvimento ativo. A evolução dos geradores elétricos continua

impulsionada pela busca por maior eficiência, confiabilidade e sustentabilidade, refletindo os avanços tecnológicos e as mudanças nas necessidades da sociedade ao longo do tempo.

2.3. Aplicação

Os motores elétricos são amplamente utilizados em diversos segmentos da indústria. Existem diversos tipos de motores elétricos, tais como os motores de corrente contínua, de corrente alternada, monofásicos, trifásicos, com portes e potências diversas, construídos por fabricantes distintos. Cada um desses modelos apresenta características específicas que os tornam mais adequados para determinadas aplicações.



Eles são usados em uma ampla gama de equipamentos, incluindo bombas, ventiladores, compressores, transportadores, máquinas-ferramenta etc. Eles são uma escolha popular para aplicações que exigem velocidades variáveis, pois podem ser controlados com precisão por meio de inversores de frequência, e operação contínua, pois não precisam de tempo de inatividade para reabastecimento ou manutenção, como ocorre no caso de motores a combustão interna. Isso ajuda a aumentar a produtividade e reduzir os custos de manutenção. Vale ressaltar a imensa variedade de aplicações presentes no dia a dia, como em aparelhos eletrodomésticos, por exemplo.

Geradores síncronos são máquinas destinadas a transformar energia mecânica em energia elétrica. Toda a energia consumida nas indústrias, residências, cidades etc., são provenientes destes geradores. Logo, os geradores elétricos têm uma ampla variedade de aplicações em diversos setores, como: usinas hidrelétricas; parques eólicos; usinas solares; usinas de álcool e açúcar; centrais elétricas em geral; usinas termelétricas; petrolífero; mineração; siderúrgico etc. A lista de setores de aplicação é exaustiva.

Cada setor tem necessidades específicas que podem ser atendidas pela geração de energia elétri-

ca, seja para suprir seu consumo próprio (no caso de indústrias, mantendo o funcionamento de máquinas e equipamentos) ou para comercialização (sendo a exportação de energia gerada vendida à consumi-

dores externos através do órgão 'Operador Nacional do Sistema Elétrico' no 'Sistema Interligado Nacional', sob a fiscalização e regulação da 'Agência Nacional de Energia Elétrica'.



3

NOÇÕES FUNDAMENTAIS E ASPECTOS CONSTRUTIVOS

3 NOÇÕES FUNDAMENTAIS E ASPECTOS CONSTRUTIVOS

3.1 Fundamentos da eletromecânica

O advento da conversão eletromagnética de energia, proposta por Michael Faraday em 1831, iniciou uma fase de estudos focados em uma abordagem inovadora para a geração e aplicação de energia elétrica, anteriormente obtida exclusivamente por meio de processos químicos, como os princípios das pilhas e baterias.

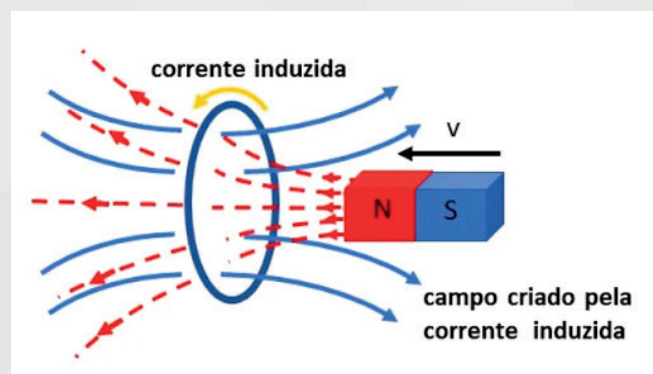
Como desdobramento dessas investigações, surgiu o desenvolvimento da teoria da conversão eletromecânica de energia, que postula a capacidade de transformar energia mecânica em energia elétrica e vice-versa por meio de máquinas elétricas. Dessa forma, ao longo do ciclo de geração até a utilização, a conversão de energia, tanto elétrica quanto mecânica, pode ocorrer em múltiplos estágios.

Portanto, para compreender os princípios fundamentais de operação de uma máquina elétrica, seja ela um motor ou um gerador, torna-se imperativa a compreensão de alguns fenômenos elementares da conversão eletromagnética de energia.

3.2 Lei de Faraday

Com base em experimentos utilizando dispositivos análogos à representação a seguir, Faraday foi capaz de deduzir que:

“A tensão induzida nas extremidades de um condutor imerso em um campo magnético, conforme ilustrado na figura abaixo, é diretamente proporcional à relação entre o fluxo magnético (representado pelas linhas de força que interceptam o condutor) e o intervalo de tempo durante o qual as linhas de força atravessam o referido condutor.”



De modo geral, podemos simplificar o acima exposto na seguinte relação:

$$V_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Onde:

V – Tensão induzida nos terminais do condutor.

Φ – Fluxo magnético, sendo as linhas de forças magnéticas que cortam o condutor.

t – Tempo em segundos em que tais linhas de força cortam o condutor.

f – Frequência em Hertz, sendo o número de vezes em que o sentido do fluxo magnético é invertido a cada segundo.

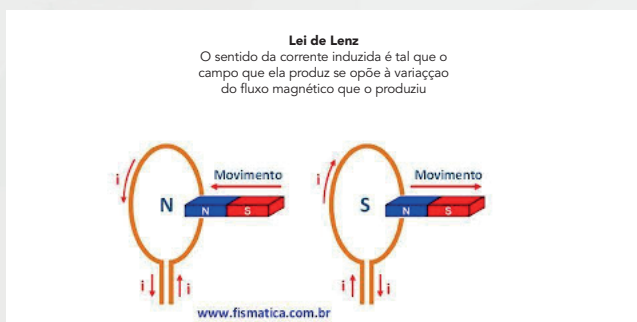
Considerando a conclusão de Faraday e a relação mencionada, é possível compreender que a variação da tensão pode ser alcançada de duas maneiras: alteração do fluxo magnético (aumento/diminuição das linhas de fluxo que cortam o condutor) ou variação na frequência.

Contudo, é imperativo observar que a análise acima se baseia em um cenário ideal, no qual o condutor está completamente perpendicular ao campo magnético. Em máquinas elétricas comerciais, é possível que o condutor não esteja totalmente perpendicular ao campo magnético, e seu movimento também pode não ocorrer de forma perpendicular a ele. Essas variáveis devem ser levadas em consideração, uma vez que impactam diretamente no valor da tensão induzida nos terminais do condutor.

A análise delineada será de considerável utilidade e será retomada posteriormente ao explicar o princípio fundamental de funcionamento de uma máquina elétrica, seja ela atuando como um motor ou gerador.

3.3 Lei de Lenz

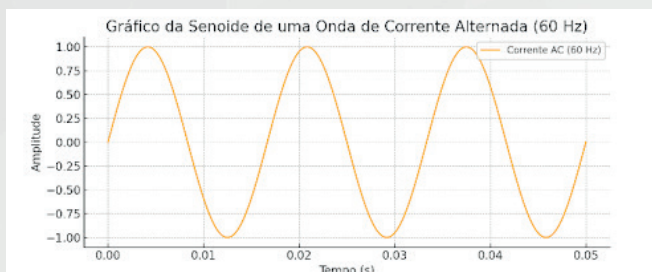
Em acréscimo às descobertas de Faraday, surgiu a Lei de Lenz, formulada pelo físico Heinrich Emil Lenz. Este observou que a corrente elétrica induzida apresenta efeitos contrários às suas causas. De maneira mais específica, Lenz estabeleceu que o sentido da corrente elétrica induzida é tal que o campo magnético por ela gerado contrapõe-se à variação do campo magnético que a originou.



A formulação da Lei de Lenz implica em uma relação de causalidade onde uma causa e um efeito se opõem reciprocamente. A causa em questão é a variação do fluxo que atravessa o condutor. O efeito correspondente é a ocorrência de uma corrente (devido à tensão induzida) cujo campo magnético se contrapõe à causa original. Desse modo, em todos os casos de indução eletromagnética, sempre que ocorre uma alteração no fluxo magnético concatenado, uma tensão é induzida, a qual busca estabelecer uma corrente em uma direção que produza um campo magnético em oposição à variação do fluxo que percorre as espiras do circuito.

3.4 Circuito de corrente alternada

O circuito de corrente alternada (CA) refere-se a um arranjo elétrico no qual a direção da corrente elétrica oscila periodicamente. Esta variação ocorre em relação ao tempo, contrastando com os circuitos de corrente contínua (CC), nos quais a direção da corrente permanece constante. A corrente alternada é caracterizada por uma fonte de alimentação que proporciona uma voltagem que oscila de forma periódica, frequentemente seguindo uma forma de onda senoidal.



A implantação de circuitos de corrente alternada (CA) em máquinas elétricas é uma prática essencial em diversas aplicações industriais e comerciais, englobando motores e geradores. O uso de corrente alternada nesses dispositivos oferece uma série de vantagens, incluindo eficiência na transmis-

são de energia e facilidade na regulação do torque e da tensão.

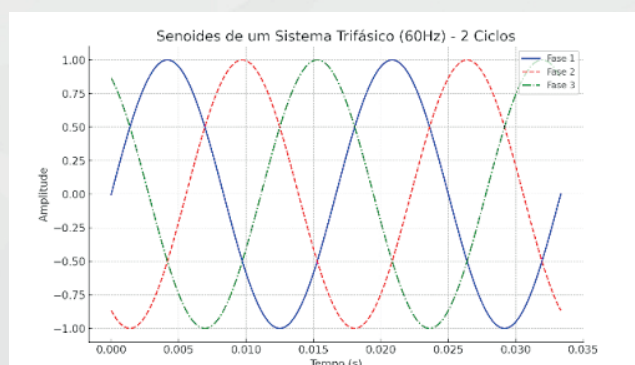
Em motores elétricos CA, a corrente alternada é empregada para criar um campo magnético rotativo no estator. Esse campo interage com o rotor, gerando um torque que impulsiona o movimento mecânico do motor. A sincronização entre a frequência da corrente alternada e a velocidade do motor é crucial para garantir o desempenho eficiente.

Nos geradores, a máquina converte energia mecânica em corrente alternada. O rotor, em rotação, induz uma corrente no estator. A regulação exata da tensão gerada é essencial para manter a estabilidade do sistema elétrico.

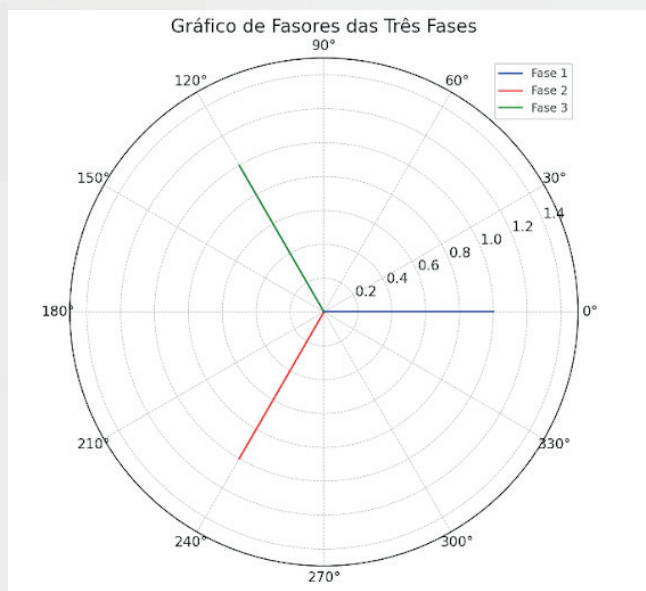
A análise de circuitos CA em máquinas elétricas envolve a consideração de impedância e reatância, que representam a resistência e a reação capacitiva ou indutiva ao fluxo de corrente alternada.

A implantação de circuitos de corrente alternada em motores elétricos permite um controle preciso da velocidade, ajustando a frequência da corrente.

Em muitas aplicações industriais, a implantação de sistemas trifásicos é preferencial. Nestes sistemas, três correntes alternadas defasadas em 120 graus uma em relação à outra são geradas. Isso proporciona um fluxo de potência constante, suavizando a operação de máquinas elétricas e reduzindo as oscilações de torque. A configuração trifásica oferece eficiência superior, redução de perdas de energia e melhor desempenho em comparação com sistemas monofásicos.



A representação vetorial conhecida como fasores é frequentemente utilizada para simplificar a análise de grandezas alternadas em máquinas elétricas, permitindo uma abordagem mais eficiente em relação às grandezas complexas.



É crucial monitorar o equilíbrio entre as fases em sistemas trifásicos para evitar problemas como desbalanceamento de corrente e tensão, que podem resultar em perdas de eficiência e degradação do desempenho.

Nos motores trifásicos, o controle de velocidade é alcançado manipulando a frequência ou a amplitude das correntes alternadas, proporcionando flexibilidade através de sistemas de controle avançados, como inversores de frequência.

A maioria das redes de distribuição de energia elétrica utiliza sistemas trifásicos devido à eficiência na transmissão e à capacidade de lidar com cargas pesadas.

3.5 Tensão nominal

Já discutimos a tensão até o momento; contudo, neste tópico, analisaremos essa grandeza essencial com maior profundidade.

A tensão nominal de máquinas elétricas é um parâmetro essencial que caracteriza o nível de tensão para o qual um equipamento elétrico foi projetado para operar de forma segura e eficiente. Este valor é definido durante o processo de design e fabricação da máquina, levando em consideração as condições normais de operação e as tolerâncias associadas.

A tensão nominal é expressa em volts (V) e representa a magnitude eficaz da tensão para a qual a máquina é otimizada. É crucial que a tensão de operação real da máquina esteja dentro de uma faixa

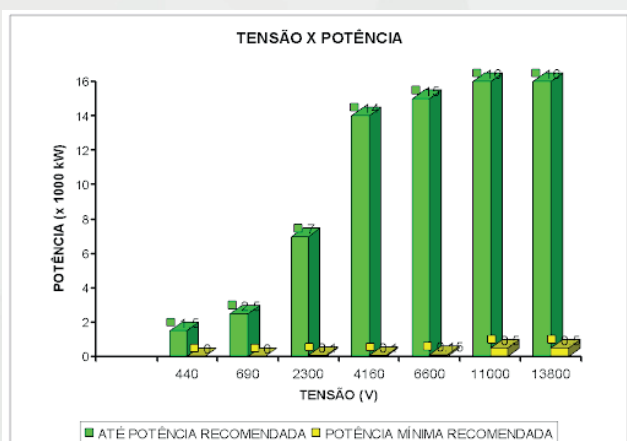
próxima da tensão nominal para garantir o desempenho adequado.

A escolha da tensão nominal é influenciada por diversos fatores, como a aplicação específica da máquina, requisitos de potência, normas e regulamentos locais, e características do sistema elétrico ao qual a máquina será conectada. Erros na especificação da tensão nominal podem resultar em mau funcionamento, perda de eficiência, ou até mesmo danos à máquina.

Além disso, a tensão nominal é um parâmetro fundamental na determinação da configuração do sistema de isolamento da máquina, influenciando diretamente na escolha dos materiais isolantes e nas distâncias de isolamento necessárias para garantir a segurança elétrica.

3.5.1 Tensão da rede de alimentação em função do motor

Atualmente, não existe uma norma internacional uniforme para a determinação da tensão de alimentação em relação à potência do motor. Porém, temos referências baseadas em tensão e potência, como exemplificado na figura abaixo:



Dentre os fatores preponderantes a serem considerados, destacam-se:

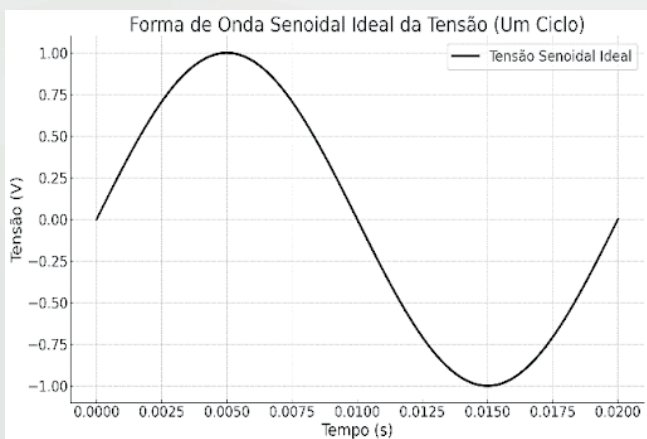
- A disponibilidade do nível de tensão no local;
- Restrições impostas pela infraestrutura de alimentação, especialmente em relação à corrente de partida;

- A extensão física entre a fonte de tensão (subestação) e a carga;
- Considerações econômicas, envolvendo os custos associados a sistemas de baixa e alta tensão para potências situadas na faixa de 150 a 450 kW.

Estes parâmetros influenciam significativamente na seleção da tensão de alimentação apropriada para o motor, visando otimizar a eficiência operacional e o investimento envolvido, de forma a conciliar as necessidades técnicas e econômicas do sistema elétrico em questão.

3.5.2 Distorção harmônica

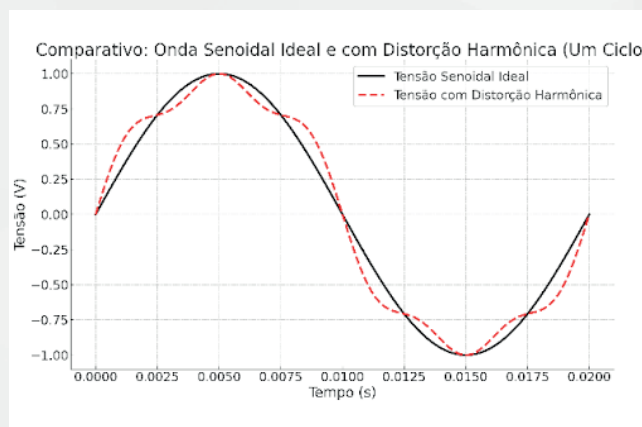
A configuração ótima da onda de tensão proveniente de uma fonte de energia de corrente alternada (CA) é senoidal, conforme a representação a seguir.



Qualquer variação na forma de onda de tensão que incorpore determinada distorção harmônica pode ser representada como equivalente à soma da componente fundamental e uma série de componentes de tensão de corrente alternada com amplitudes específicas, relacionadas de maneira harmônica.

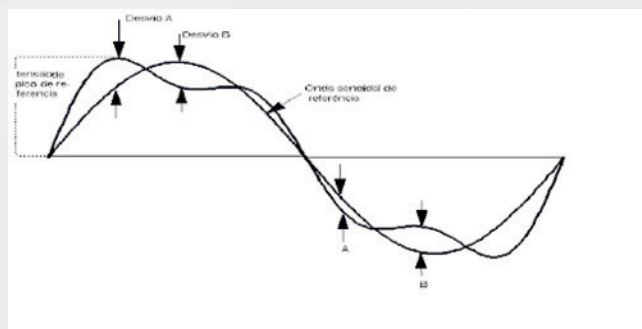
A distorção pode ser caracterizada para cada harmônica em relação à sua amplitude, expressando-a como uma porcentagem da componente fundamental.

Na figura a seguir, podemos identificar um comparativo de uma onda senoidal ideal e outra com distorção harmônica.

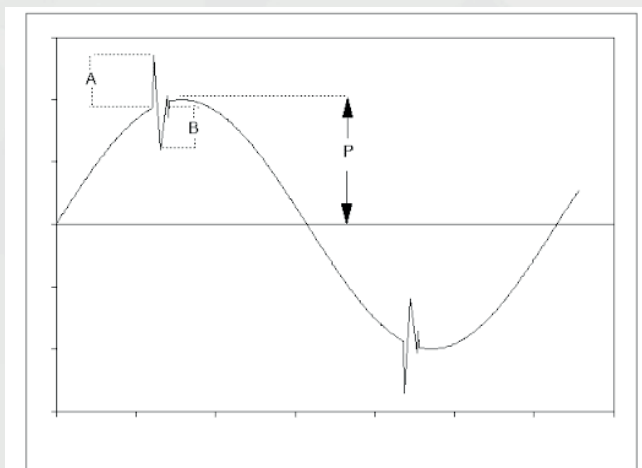


3.5.3 Fator de desvio

Alterações ou variações na configuração senoidal da onda podem manifestar-se em qualquer ponto da forma de onda: positiva, negativa ou durante o ponto de cruzamento por zero, conforme ilustrado na figura abaixo.



A extensão da flutuação, representada na figura a seguir, manifesta-se como uma porcentagem relativa ao valor máximo de uma onda senoidal de referência, sendo denominada como o 'Coeficiente de Desvio'.



O fator de desvio pode ser calculado como:

$$\frac{\text{Desvio}}{V_{\text{pico}}}$$

3.5.4 Modulação de tensão

A modulação de tensão em máquinas síncronas refere-se ao processo de controle e ajuste da magnitude da tensão gerada por esses dispositivos elétricos. Essa técnica envolve a manipulação da amplitude da onda de tensão produzida, possibilitando a regulação precisa da saída de potência elétrica. Esse controle permite a adaptação às demandas variáveis da carga e garante a estabilidade do sistema.

3.5.5 Desbalanceamento de tensão

O desequilíbrio de tensão refere-se à disparidade entre as tensões de linha máxima e mínima, podendo ser quantificado como uma porcentagem da média da tensão de fase.

Ex.:

Fase U e V = 208V (1.6% acima da média)

V e W = 204V (0.33% abaixo da média)

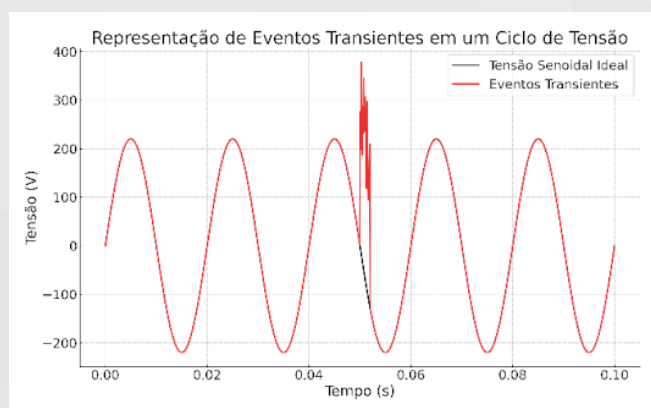
W e U = 202V (1.3% abaixo da média)

Média: 204.67V

Variação: 6V (2.9%)

3.5.6. Transiente de tensão

São eventos transientes de alta magnitude e curta duração, manifestando-se de maneira intermitente, com potencial para alcançar centenas de volts, conforme ilustrado na figura abaixo, considerando que o pico desse evento é apenas representativo.



3.5.7 Tolerância de Tensão

Os desvios máximos aceitáveis na tensão são comumente quantificados como porcentagens da tensão nominal. Por exemplo:

- A variação positiva de até 5%, representando 105% da tensão nominal, é a máxima aceitável de maneira contínua.
- A variação negativa de até 7,5%, representando 92,5% da tensão nominal, é a mínima considerada aceitável de forma contínua.

3.5.8 Tensão residual

Quando operando em vazio, em rotação nominal e sem tensão de excitação, o gerador síncrono manifestará, nos seus terminais, uma tensão residual decorrente do magnetismo remanescente no núcleo magnético da excitatriz. Tais níveis de tensão podem ocasionar incidentes graves, inclusive com potencial risco de óbito. Recomenda-se veementemente que se evite a manipulação da máquina enquanto o rotor estiver em movimento. Geradores com uma tensão nominal de 440V geralmente exibem uma tensão residual de aproximadamente 180V, enquanto geradores com uma tensão nominal de 13800V podem apresentar facilmente uma tensão residual de 1000V.

3.6 Frequência nominal

A frequência nominal de uma máquina elétrica refere-se à taxa de repetição de ciclos completos de variação de corrente elétrica ou tensão em um sistema de energia. Essa grandeza é expressa em hertz (Hz) e representa a quantidade de ciclos por segundo.

Em sistemas elétricos de potência, a frequência nominal é padronizada para garantir a compatibilidade e o funcionamento eficiente de dispositivos conectados à rede elétrica. O valor padrão da frequência nominal varia em diferentes regiões do mundo, sendo comumente 60 Hz em países como o Brasil e 50 Hz em grande parte da Europa e Ásia.

No contexto de máquinas elétricas, como geradores e motores, a frequência nominal está intrinsecamente relacionada à velocidade de rotação do rotor. Para um gerador síncrono, por exemplo,

a frequência de saída é diretamente proporcional à velocidade angular do rotor. Portanto, a frequência nominal é uma especificação crítica para o correto funcionamento desses equipamentos, influenciando diretamente a geração ou consumo de energia elétrica.

É importante observar que variações significativas na frequência em relação ao valor nominal podem afetar negativamente o desempenho e a estabilidade do sistema elétrico, podendo levar a falhas e danos nos equipamentos conectados.

3.7 Corrente nominal

Trata-se da corrente que um motor absorve da fonte de alimentação durante sua operação em potência nominal, sob tensão e frequência nominais. O valor da corrente nominal é contingente ao rendimento (η) e ao fator de potência ($\cos\phi$) do motor, dado pela expressão:

$$I = \frac{P(kW) \times 1000}{\sqrt{3} \times U \times \eta \times \cos\phi} = \frac{736 \times P(c.v)}{\sqrt{3} \times U \times \eta \times \cos\phi} (A)$$

Os valores típicos de corrente, rendimento e fator de potência, estão sempre disponíveis nos catálogos dos fabricantes.

3.8 Potência elétrica

A potência elétrica é uma medida essencial no contexto de sistemas elétricos, denotando a taxa na qual a energia elétrica é transferida, convertida ou consumida em um determinado circuito ou dispositivo. Expressa em watts (W), a potência elétrica é uma grandeza vetorial que incorpora tanto a magnitude quanto a direção da corrente elétrica.

A potência elétrica (P) é calculada pela multiplicação da tensão (V) pela corrente (I), seguindo a relação $P = VI$. Esta formulação básica é derivada da lei de Joule, que estabelece que a potência dissipada na forma de calor em um resistor é proporcional ao quadrado da corrente multiplicado pela resistência.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a potência elétrica é expressa em watts, onde 1 watt é equivalente a 1 joule por segundo. Para potências mais expressivas, utiliza-se a escala dos quilowatts (kW) e megawatts (MW), tornando-se comuns em sistemas de geração e transmissão de energia.

Em sistemas trifásicos, a potência elétrica é frequentemente tratada como potência aparente trifásica (S), envolvendo três componentes espacialmente defasados. A potência ativa total em um sistema trifásico é a soma das potências ativas individuais em cada fase. Mas adiante veremos os tipos de potência elétrica, bem com a relação entre elas.

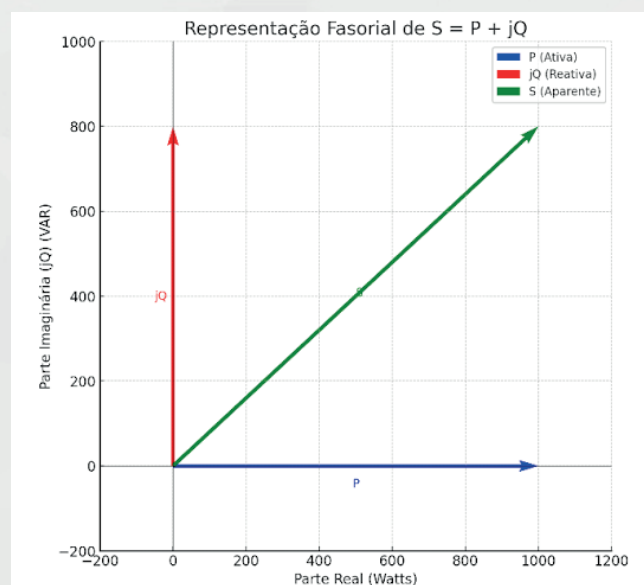
3.8.1 Potência aparente, ativa, reativa e triângulo de potências

A potência elétrica pode ser decomposta em três componentes distintos: potência ativa (P), que representa a real transferência de energia; potência reativa (Q), responsável pelo suporte magnético e elétrico nos sistemas; e potência aparente (S), representando a magnitude total da potência complexa, sendo a raiz quadrada da soma dos quadrados de P e Q.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

3.8.1.1 Potência aparente

A potência aparente (S) em máquinas elétricas trifásicas é representada como um número complexo, envolvendo a componente real (potência ativa 'P') e a componente imaginária (potência reativa 'Q'). A expressão, utiliza a unidade imaginária 'j' para denotar a parte reativa. Podemos identificar essa fórmula expressa abaixo em uma representação fasorial.

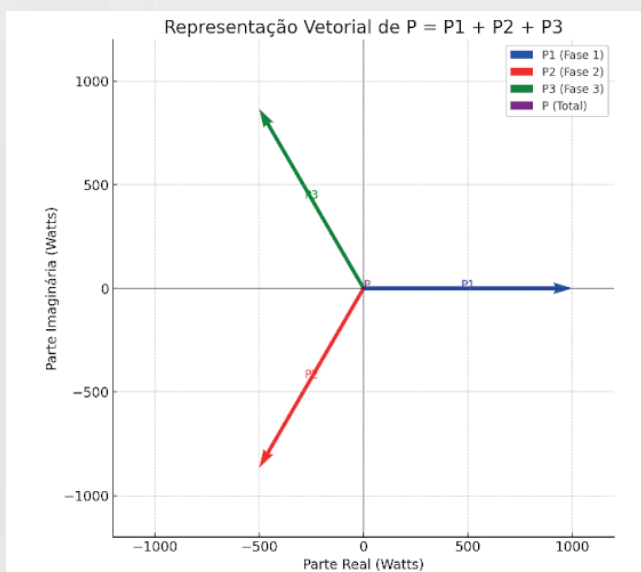


A análise da potência aparente é crucial para avaliar o desempenho efetivo das máquinas elétricas. Ela permite entender a carga total imposta ao sistema, considerando não apenas a energia ativa que realiza trabalho mecânico (em motores) ou é convertida em eletricidade (em geradores), mas também a energia reativa associada aos campos elétricos e magnéticos.

A unidade de medidas para potência aparente é o volt-ampère (VA) ou seu múltiplo, o quilovolt-ampère (kVA).

3.8.1.2 Potência ativa

A potência ativa (P) em sistemas trifásicos de máquinas elétricas é uma medida crucial que quantifica a real transferência líquida de energia no sistema, diretamente influenciando o desempenho operacional, a capacidade de carga e a eficácia na realização de tarefas específicas. Em um contexto trifásico, a potência ativa é calculada como a soma vetorial das potências ativas individuais em cada fase, seguindo a relação $P = P_1 + P_2 + P_3$, onde P_1 , P_2 , P_3 são as potências ativas nas fases individuais.



O controle da potência ativa em motores trifásicos é um elemento crítico para ajustar a velocidade do motor. Em aplicações industriais, onde as demandas de carga variam, a capacidade de modular a potência ativa oferece flexibilidade operacional e eficiência energética.

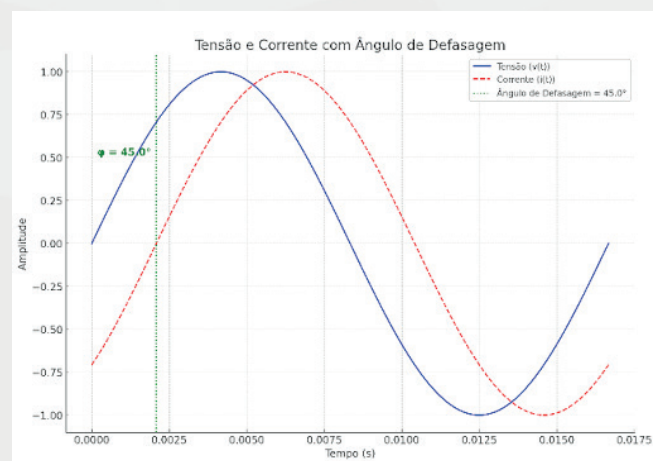
Em geradores elétricos, a potência ativa é uma medida crítica para avaliar a capacidade real de geração de energia. Assegurar uma potência ativa

adequada é essencial para manter a estabilidade do sistema elétrico, atender às demandas de carga e garantir um fornecimento confiável de energia.

3.8.1.3 Potência reativa

Em circuitos trifásicos, a presença de potência reativa é inevitável devido à natureza defasada das grandezas elétricas, como correntes e tensões, resultantes da alimentação de máquinas elétricas.

Em uma máquina elétrica, como um motor ou gerador, as correntes e tensões envolvidas estão sujeitas a defasagens devido às características indutivas e capacitivas dos enrolamentos e circuitos associados. Essa defasagem é representada pelo ângulo de defasagem, geralmente denominado fator de potência angular (ϕ), que reflete a diferença de fase entre a corrente e a tensão.



A potência reativa (Q) em máquinas elétricas trifásicas é expressa como:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \text{Sen}\phi$$

Onde:

- Q é a potência reativa em volt-ampere reativo (VAR);
- $\sqrt{3}$ é o fator de correção para sistemas trifásicos;
- V é a magnitude da tensão de linha;
- I é a magnitude da corrente de linha;
- $\text{Sen}\phi$ é o fator de potência angular.

A unidade de medida para expressar a potência reativa é o volt-ampère-Reativo (VAR)

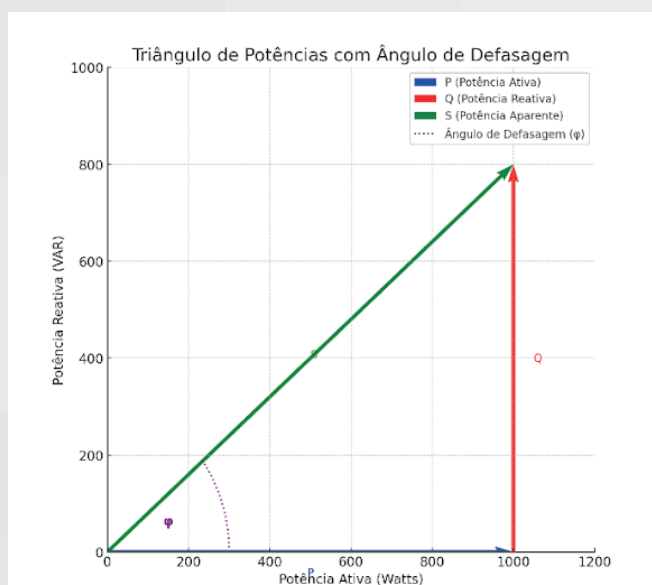
A potência reativa é essencial para manter os campos magnéticos nos enrolamentos das máquinas elétricas, garantindo seu funcionamento adequado. No entanto, o excesso de potência reativa pode resultar em problemas, como a queda do fator de potência, aumentando as perdas de energia e diminuindo a eficiência do sistema.

Para otimizar o desempenho do sistema de potência, é comum utilizar bancos de capacitores para compensar a potência reativa indutiva, melhorando o fator de potência e reduzindo as perdas. A análise e correção da potência reativa de máquinas elétricas em sistemas trifásicos são cruciais para garantir a estabilidade, eficiência e confiabilidade do sistema de potência como um todo.

3.8.1.4 Triângulo de potência

O triângulo de potências é uma representação gráfica no domínio fasorial usado para analisar as relações entre as potências ativa, reativa e aparente em sistemas elétricos trifásicos. Ele é particularmente útil na análise de máquinas elétricas em circuitos trifásicos, onde as grandezas são representadas por vetores complexos.

O triângulo de potências é formado pelos vetores das potências ativa (P), reativa (Q), e aparente (S). Cada vetor é representado como um segmento no plano complexo, onde a potência ativa é a componente horizontal, a potência reativa é a componente vertical, e a potência aparente é a hipotenusa do triângulo, conforme a ilustração abaixo, com destaque ao ângulo de defasagem entre P e S (Fator de potência).



O ângulo entre o vetor de potência aparente e o vetor de potência ativa no triângulo é o fator de potência (cos), onde φ é o ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão. O cosseno desse ângulo é igual à razão entre a potência ativa e a potência aparente.

$$\cos\phi = \frac{P}{S}$$

Matematicamente, as relações no triângulo de potências podem ser expressas pelo teorema de Pitágoras:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

O triângulo de potências fornece uma ferramenta gráfica eficaz para entender as relações entre as diferentes componentes de potência em sistemas trifásicos. Em motores e geradores, a análise do triângulo de potências é crucial para dimensionar corretamente os dispositivos de correção do fator de potência, como bancos de capacitores ou reatores, buscando melhor eficiência.

Além disso, o triângulo de potências é valioso na determinação da carga aparente de um sistema elétrico trifásico, auxiliando na seleção adequada de equipamentos.

3.8.2 Fator de potência

O fator de potência (FP) é a razão entre a potência ativa e a potência aparente ($FP = P/S$), conforme vimos anteriormente. Um FP próximo a 1 indica uma utilização eficiente da potência, enquanto valores inferiores sugerem uma presença significativa de potência reativa no sistema.

Matematicamente, podemos expressar por:

$$\cos\phi = \frac{P}{S} = \frac{P(W)}{\sqrt{3 \times U \times I}}$$

Assim,

Carga Resistiva: $\cos\phi = 1$;

Carga Indutiva: $\cos\phi$ atrasado;

Carga Capacitiva: $\cos\phi$ adiantado.

Os termos, atrasado e adiantado, referem-se à fase da corrente em relação à fase da tensão.

Um motor não apenas absorve potência ativa, que é posteriormente convertida em trabalho mecânico, mas também requer potência reativa para o processo de magnetização do núcleo, a qual não contribui para a realização de trabalho útil.

As normas internacionais admitem tolerância inferiores do valor de fator de potência obtido em ensaio.

3.8.2.1. Importância do Fator de Potência

Com o objetivo de otimizar a eficiência do sistema elétrico brasileiro e minimizar o tráfego de energia reativa nas linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição, a regulamentação em vigor estabelece como padrão para o fator de potência das cargas o valor de 0,92.

O aumento do fator de potência resulta em uma maior disponibilidade de potência ativa no sistema, visto que a presença de energia reativa impõe limitações à capacidade de transporte de energia útil.

O motor elétrico desempenha um papel crucial, representando mais de 60% do consumo total de energia nas indústrias. Portanto, é essencial empregar motores com potência e características adequadamente alinhadas às suas funções específicas. Importante notar que o fator de potência varia conforme a carga aplicada ao motor.

3.8.2.2 Correção do Fator de Potência

Existem duas abordagens para incrementar o fator de potência de um motor: por meio da aplicação de bancos de capacitores (prática mais comum) ou mediante modificações no projeto do motor elétrico. A última alternativa é menos empregada devido ao substancial aumento no custo do motor, resultando em um retorno de investimento considerado insatisfatório.

O aprimoramento do fator de potência é geralmente alcançado por meio da conexão de uma carga capacitiva, comumente implementada por meio de um capacitor ou um motor síncrono superexcitado, disposto em paralelo com a carga principal.

3.8.3 Potência nominal

A potência fornecida pela máquina em condições contínuas, conforme suas especificações nominais, é definida como potência nominal.

É correto afirmar que geradores e motores tem a capacidade de alimentar cargas com potências significativamente superior à sua potência nominal, quase atingindo o conjugado máximo. No entanto, é crucial observar que se essa sobrecarga for excessiva, ou seja, se for demandada do gerador uma potência muito superior àquela para a qual foi projetado, a elevação térmica considerada como "normal", será excedida, resultando na redução da vida útil da máquina e, em casos extremos, em sua rápida deterioração ou queima.

3.8.4 Potência de gerador elétrico

A potência do gerador é determinada em consonância com a potência das fontes consumidoras ou em conformidade com a potência do motor de acionamento. A fixação da potência é realizada de acordo com as características de potência das fontes consumidoras.

Ao conectar um gerador a cargas com diferentes fatores de potência, é imperativo investigar previamente os componentes de potência ativa e reativa das cargas. Posteriormente, deve-se determinar a potência aparente total, bem como o fator de potência global, para assegurar o correto dimensionamento e funcionamento do sistema.

$$S = \sqrt{(P_1 + P_2 + \dots + P_n)^2 + (Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n)^2}$$

Onde:

S - Potência aparente total (VA)

P1...n - Componentes de potência ativa de cada fonte consumidora (W)

Q1...n - Componentes de potência reativa de cada fonte consumidora (VAr)

$$\frac{\sum}{PS}$$

A determinação da potência do gerador é realizada com base na potência do motor de aciona-

mento. Em muitas situações, é impraticável conhecer a potência exata das cargas consumidoras. Nestes casos, a potência do gerador é calculada a partir da potência de acionamento, utilizando um fator de potência padrão de 0,8, desde que os fatores individuais estejam dentro dessa faixa.

A potência útil do motor de acionamento é utilizada como ponto de partida, sendo necessário subtrair as perdas do gerador para obter a potência ativa efetiva disponível nos terminais do gerador. Este procedimento visa garantir uma fixação apropriada da potência em conformidade com a capacidade do motor e as características das cargas alimentadas.

$$\frac{P_n \times \eta_g}{100} [kW]$$

Onde:

P_g - potência do gerador (kW).

P_n - potência do motor de acionamento (kW).

η_g - rendimento do gerador (%).

A fim de converter a potência do motor de acionamento de cavalos-vapor (cv) para quilowatts (kW), é necessário multiplicar o valor dado por 0,736.

$$P_n (KW) = P_n (cv) \times 0.736$$

A fim de calcular a potência aparente do gerador, é necessário considerar o rendimento conforme especificado nos catálogos dos geradores, considerando fatores de potência no intervalo de 0,8 a 1,0. Portanto, levando em conta o fator de potência, a potência aparente é determinada da seguinte forma:

$$\frac{P_g}{\cos\phi} = \frac{P_n \times \eta}{100 \times \cos\phi}$$

No caso de motores, é imperativo destacar que a potência demandada pelo motor é determinada pelas características da carga, independentemente da potência nominal do motor. Por exemplo, se uma carga de 800 cv for requerida para um motor, a potência exigida será de 800 cv, independentemente de o motor em questão ser classificado como 600 cv ou 1000 cv.

3.8.5 Potência equivalente

A noção de potência equivalente é aplicável tanto a motores elétricos quanto a geradores. Em ambos os casos, esse conceito é utilizado para com-

parar o desempenho entre diferentes equipamentos, levando em conta fatores como eficiência, perdas e outras características relevantes.

No contexto de motores elétricos, a potência equivalente possibilita uma análise equitativa da capacidade de realizar trabalho entre motores distintos, facilitando a escolha ou avaliação de sistemas elétricos com propósitos semelhantes. Isso implica considerar a eficiência energética e outros elementos que impactam o desempenho do motor.

Da mesma forma, em geradores elétricos, a potência equivalente é uma métrica valiosa para comparar o desempenho entre diferentes geradores. Esse conceito leva em consideração variáveis como eficiência, perdas e características específicas de geração de energia. Assim, ao aplicar a potência equivalente a geradores, busca-se uma análise equitativa da capacidade de geração de energia entre dispositivos diversos, auxiliando na escolha ou avaliação de sistemas elétricos com propósitos similares.

Claramente, um motor elétrico deve fornecer à máquina acionada a potência necessária, sendo aconselhável a incorporação de uma margem de folga, geralmente entre 5% e 10%, devido à possibilidade de ocorrência de pequenas sobrecargas. Além disso, dependendo do regime de serviço, é possível que o motor ocasionalmente forneça mais ou menos potência. Apesar da existência de várias formas padronizadas para descrever as condições de operação de um motor, na prática, é frequentemente necessário avaliar a demanda imposta ao motor por um regime mais complexo do que aqueles delineados nas normas convencionais. Uma abordagem comum é a determinação da potência equivalente por meio da seguinte fórmula:

$$P_m^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T P(t)^2 \cdot dt$$

Onde:

P_m é a potência equivalente solicitada ao motor;

P(t) é a potência, variável com o tempo, solicitada ao motor;

T é a duração total do ciclo (período).

O procedimento adota como premissa a suposição de que a carga efetivamente imposta ao motor resultará em uma demanda térmica corres-

pondente àquela de uma carga fictícia equivalente, que constantemente requisita a potência P_m . Além disso, fundamenta-se na premissa de que há uma variação nas perdas proporcional ao quadrado da carga, e que o aumento da temperatura está diretamente relacionado às perdas. Esta consideração é válida para motores em operação contínua, mas sujeitos a solicitações intermitentes. Dessa forma, temos:

$$P_m = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + P_4^2 \cdot t_4 + P_5^2 \cdot t_5 + P_6^2 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}}$$

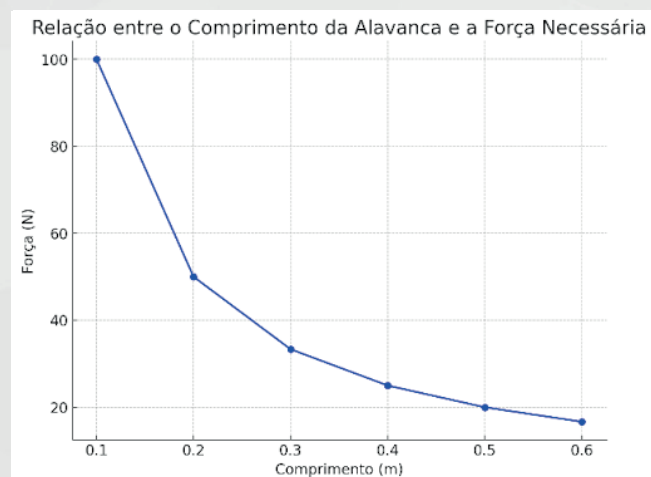
3.9 Conjugado

O conjugado, conhecido também como torque ou binário, representa a medida do esforço exigido para promover a rotação de um eixo. Ao mensurar o esforço requerido para induzir a rotação do eixo, não é suficiente especificar a força aplicada, é imprescindível também indicar a distância do ponto de aplicação da força em relação ao eixo. O esforço é quantificado pelo conjugado, resultante do produto entre a força aplicada e a distância ao eixo.

$$C = F \times l$$

A unidade utilizada para o conjugado no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Newton.metro (N.m).

A força necessária para levantar um peso usando uma alavanca, por exemplo, é inversamente proporcional ao comprimento da alavanca. Portanto, quanto maior o comprimento da alavanca, menor a força necessária. Se a força necessária for de 10N para um comprimento de 0,20m, ao dobrar o comprimento para 0,40m, a força será reduzida pela metade, resultando em 5N.



3.10 Energia e potência mecânica

A potência é uma medida da rapidez com que a energia é aplicada ou consumida. No contexto de máquinas elétricas rotativas, como motores e geradores, a energia despendida ou o trabalho realizado para gerar movimento permanece constante. No entanto, a potência reflete a velocidade com que essa energia é aplicada para gerar o movimento no eixo da máquina. Ou seja, a potência é definida como a razão entre a energia total ou trabalho realizado e o tempo total necessário para sua execução.

A unidade padrão para a potência mecânica no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Watt (W). Entretanto, uma unidade comum para a potência mecânica é o cavalo-vapor (c.v.), que é equivalente a 736 W.

A energia mecânica (W_{mec}) é o trabalho realizado por um motor ou gerador e pode ser calculada pela fórmula:

$$W_{mec} = F \times d \quad (N.m)$$

Onde:

- W_{mec} é o trabalho mecânico em Newton-metros (N.m).
- F é a força aplicada em Newtons (N).
- d é a distância em metros (m) ao longo da qual a força é aplicada.

Para calcular a potência mecânica (P_{mec}), que reflete a rapidez com que essa energia é aplicada, utilizamos a fórmula:

$$P_{mec} = \frac{F \times d}{t} \quad (W)$$

Onde:

- P_{mec} é a potência mecânica em Watts (W).
- t é o tempo em segundos (s).

Também podemos expressar a potência mecânica em cavalos-vapor (cv):

$$P_{mec} = \frac{F \times d}{736t} \quad (cv)$$

Lembrando que 1 Newton-metro (N.m) é igual a 1 Joule (J), que também é igual a 1 Watt-segundo (W.s). Para movimentos circulares, o torque (C) é uma grandeza fundamental e é calculado da seguinte forma:

$$C = F \times r \quad (N.m)$$

Onde:

- C é o torque em Newton-metros (N.m),
- r é o raio da rotação em metros (m).

A velocidade linear (v) de um ponto na periferia de um eixo rotativo pode ser calculada como:

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad (m/s)$$

Onde:

- v é a velocidade linear em metros por segundo (m/s),
- d é o diâmetro do eixo em metros (m),
- n é a velocidade de rotação em rotações por minuto (rpm).

Para ajustar a potência mecânica considerando o movimento rotativo, podemos usar a fórmula em cavalos-vapor:

$$P_{mec} = \frac{F \times d}{736} \quad (cv)$$

Essas fórmulas são fundamentais para entender o funcionamento de motores e geradores. O torque (C) representa a força de rotação que o eixo do motor ou gerador pode aplicar. A velocidade linear (v) indica a rapidez com que um ponto no eixo se move. Juntas, essas medidas ajudam a determinar a potência (P_{mec}) necessária para operar a máquina.

No contexto de motores elétricos, compreender esses conceitos é vital para projetar e dimensionar sistemas que possam fornecer o desempenho necessário sem sobrecarregar os componentes. Para geradores, essas fórmulas ajudam a determinar a eficiência com que a energia mecânica é convertida em energia elétrica, permitindo otimizações que podem levar a economias de energia e aumento da vida útil do equipamento.

Por exemplo, ao calcular o torque necessário para um motor que deve operar a uma certa velocidade, podemos garantir que o motor selecionado seja capaz de fornecer essa força sem falhas. Da mesma forma, entender a potência mecânica nos ajuda a avaliar o consumo energético e a capacidade de geração, garantindo que os geradores sejam adequados para a demanda de energia prevista.

3.11 Relação entre conjugado e potência

Quando a energia mecânica é aplicada sob a forma de movimento rotativo, a potência desenvolvida depende do conjugado 'C' e da velocidade de rotação 'n'. As relações são:

$$P(c.v) = \frac{C(kgfm) \times n(rpm)}{716} = \frac{C(Nm) \times n(rpm)}{7024}$$

$$P(c.v) = \frac{C(kgfm) \times n(rpm)}{974} = \frac{C(Nm) \times n(rpm)}{9555}$$

Inversamente:

$$P(kgfm) = \frac{716 \times P(c.v)}{n(rpm)} = \frac{974 \times P(kW)}{n(rpm)}$$

$$C(Nm) = \frac{724 \times P(c.v)}{n(rpm)} = \frac{9555 \times P(kW)}{n(rpm)}$$

Relação entre Unidades de Potência:

$$P(kW) = 0,736 \cdot P(c.v)$$

$$P(c.v) = 1,359 \cdot P(kW)$$

3.12 Energia e potência elétrica

Apesar de ser uma entidade única, a energia pode ser adquirida por meio de diversas modalidades. Quando uma resistência é conectada a uma rede elétrica com uma diferença de potencial, uma corrente elétrica flui, ocasionando o aquecimento da resistência. Nesse contexto, a resistência absorve

energia elétrica, convertendo-a em calor, sendo uma forma adicional de energia.

Um motor elétrico absorve energia elétrica da rede e a converte em energia mecânica disponível na extremidade do eixo. Por outro lado, um gerador opera de forma inversa, convertendo energia mecânica, proveniente do movimento do eixo, em energia elétrica.

3.13 Velocidade nominal

Refere-se à velocidade operacional, expressa em rotações por minuto (rpm), da máquina quando operando sob a potência nominal, em conformidade com a tensão e frequência nominais. A velocidade nominal está intrinsecamente relacionada ao escorregamento e à velocidade síncrona, pela fórmula:

$$n = n_s \times \left(1 - \frac{s\%}{100}\right) \quad (rpm)$$

Onde:

n é a velocidade nominal;
n_S é a velocidade síncrona;
s% é o escorregamento.

3.14 Velocidade síncrona

A velocidade síncrona (n_S) é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de polos (Ex.: 2P) e da frequência (f) da rede, em hertz.

Os enrolamentos podem ser elaborados com um ou vários pares de polos, distribuídos de maneira alternada (um "norte" e um "sul") ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante atravessa um par de polos (p) em cada ciclo. Conseqüentemente, devido ao enrolamento possuir um ou mais pares de polos, a velocidade do campo é determinada pela seguinte fórmula:

$$n_s = \frac{60 \times f}{p} = \frac{120 \times f}{2p} \quad (rpm)$$

Exemplo: Qual a rotação síncrona de um motor de 6 polos, 50Hz?

$$n_s = \frac{120 \times f}{2p} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$$

Note que o número de polos do motor terá que ser sempre par, para formar os pares de polos. Para as frequências e "polaridades" usuais, as velocidades síncronas são:

Nº de Polos	Rotação Síncrona por minuto	
	60 Hz	50 Hz
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750

Em motores de "dois polos", o campo realiza uma volta completa a cada ciclo, resultando em uma equivalência direta entre os graus elétricos e os graus mecânicos. No caso de motores com mais de dois polos, observa-se um giro "geométrico" menor, sendo inversamente proporcional ao número de polos, conforme estabelecido pela relação de 360° em dois polos.

Por exemplo: Para um motor de seis polos tem-se, em um ciclo completo, um giro do campo de:

$$\frac{360^\circ \times 2}{6} = 120^\circ \text{ geométricos}$$

Isto equivale, logicamente, a 1/3 da velocidade em dois polos. Conclui-se, assim, que:

$$\text{Graus geométricos} = \text{Graus mecânicos} \times p$$

3.15 Escorregamento

Em um motor elétrico assíncrono, o rotor está intrinsecamente predisposto a girar com uma rotação inferior à do campo girante. Conseqüentemente, ocorrerá a indução de corrente e torque (conjugado eletromecânico). A discrepância relativa entre as velocidades do rotor e do fluxo do estator (síncrona) é formalmente designada como "escorregamento" e é representada por:

$$s\% = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100$$

Onde:

n_s = Velocidade síncrona (rpm);

n = Velocidade rotórica (rpm);

$s_{\%}$ = Escorregamento.

Caso o motor opere a uma velocidade distinta da velocidade síncrona (rotação do campo girante), o enrolamento do rotor efetua o corte das linhas de força magnéticas do campo girante. Em conformidade com os princípios do eletromagnetismo, esse processo resulta na indução de correntes no rotor. À medida que a carga aumenta, o conjugado necessário para acionar o motor também cresce. Para obter um conjugado mais elevado, proporcionalmente deve-se aumentar a diferença de velocidades entre o rotor e o campo girante no estator, o que amplifica as correntes induzidas e os campos produzidos. Portanto, à medida que a carga aumenta, a rotação do motor diminui. Em condição de carga zero (motor em vazio), o rotor gira praticamente à rotação síncrona.

A frequência da corrente induzida no rotor é igual ao escorregamento vezes a frequência do estator. Ou seja:

$$f_2 = s \times f_1$$

Onde:

f_1 = Frequência da corrente estatórica (Hz);

f_2 = Frequência da corrente rotórica (Hz).

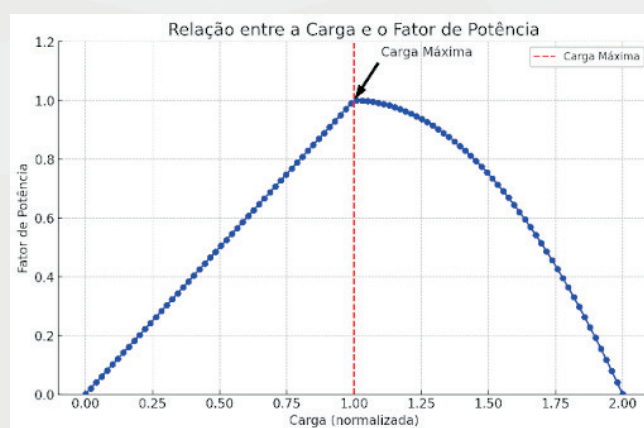
Em condição de vazio, o escorregamento apresenta-se insignificante. Nesse contexto, tanto a reatância quanto a f.e.m. (força eletromotriz) induzida no rotor são notavelmente reduzidas. Como resultado, a corrente no rotor é minimizada, sendo apenas suficiente para gerar o torque necessário em condição de vazio.

O fator de potência associado a esse estado operacional é extremamente baixo e apresenta um componente de defasagem considerável, com um valor de \cos inferior a 0,3. Isso se deve ao fato de que a corrente circulante no motor é direcionada exclusivamente para o processo de magnetização.

Quando uma carga mecânica é imposta ao rotor, ocorre uma leve diminuição na velocidade. Esse pequeno decréscimo na velocidade resulta em um aumento no escorregamento, na frequência da corrente rotórica, na reatância e na força eletromotriz induzida. O aumento da corrente induzida no rotor reflete-se em um acréscimo na corrente primária do

estator, que é a componente responsável pela produção de potência. Esse aumento na corrente estatórica, caracterizada por um fator de potência melhorado, propende a gerar maior potência mecânica e a demandar mais potência da fonte de alimentação. Em carga máxima, o motor de indução opera a um escorregamento que estabelece um equilíbrio entre o torque desenvolvido pelo motor e o torque resistente da carga.

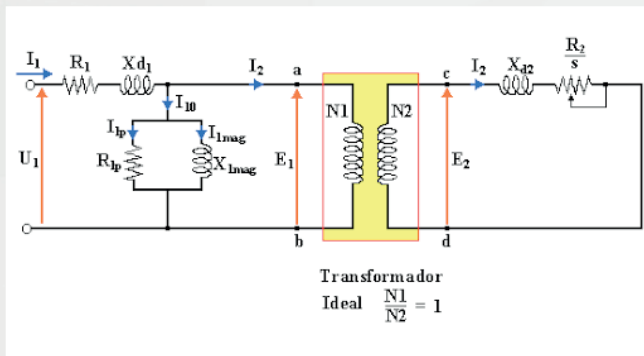
O fator de potência, em condição de carga máxima, varia de 0,8 em motores de menor porte, aproximadamente 1 cv, a cerca de 0,95 em motores de grande porte, superiores a 150 cv. A primeira impressão poderia sugerir que incrementos além da carga máxima resultariam em melhorias no fator de potência, acompanhados de um aumento na corrente de fase do estator. Entretanto, como podemos ver no gráfico abaixo, em cargas superiores à carga máxima, o fator de potência atinge uma aproximação máxima e, posteriormente, declina rapidamente.



Isso ocorre já que à medida em que a carga e o escorregamento aumentam, a frequência da corrente rotórica continua a crescer, e o aumento na reatância do rotor provoca uma redução no seu fator de potência.

3.16 Circuito equivalente

Em circunstâncias em que o coeficiente de escorregamento assume valores distintos de zero e um, ocorrerá a indução de força eletromotriz (f.e.m.) no enrolamento secundário. Em decorrência, será estabelecida uma conversão eletromecânica, envolvendo a presença de potência, originando assim um circuito equivalente composto por parâmetros e variáveis associadas tanto ao enrolamento primário quanto ao secundário.



Analisando a figura acima, temos o circuito equivalente por fase de uma máquina assíncrona com escorregamento 's', com secundário (rotor) não referido ao primário (estator). Onde:

R_1	= Resistência estatórica;
U_1	= Tensão estatórica;
X_{d1}	= Reatância estatórica;
I_1	= Corrente estatórica;
R_2	= Resistência rotórica;
I_{1p}	= Corrente de perdas;
X_{d2}	= Reatância rotórica;
I_{1mag}	= Corrente de magnetização;
X_{1mag}	= Reatância de magnetização;
I_2	= Corrente rotórica;
R_{1p}	= Resistência de perdas;
E_1	= f.c.e.m. estatórica;
E_2	= f.e.m. rotórica.

O circuito equivalente entre o estator e o rotor de um motor elétrico assíncrono representa uma forma simplificada e analítica de entender e modelar o comportamento eletromagnético e eletromecânico da máquina. Esse circuito permite a visualização e o cálculo de como a energia elétrica fornecida ao estator é convertida em energia mecânica no rotor, levando em conta as perdas e impedâncias associadas ao processo.

3.17 Força eletromotriz e corrente induzida

Considere-se o caso de uma máquina com um escorregamento não nulo. Nesse cenário, ocorrerá a indução de uma força eletromotriz (f.e.m.) no rotor, sendo possível definir tal f.e.m. em relação ao escorregamento. Quando o rotor está inativo, o campo rotativo estatórico gira à mesma velocidade em

relação aos enrolamentos do rotor e do estator, resultando na indução de f.e.m. no rotor proporcional à frequência f_1 (frequência da corrente estatórica).

De acordo com a teoria, para um motor com o rotor bloqueado (rotor fisicamente impedido de se mover), as tensões induzidas no rotor (f.e.m.) e no estator (f.c.e.m.) são expressas, respectivamente, por:

$$E_1 = 4,44.f_1.N_1.\Phi_m.k_{e1}$$

$$E_2 = 4,44.f_2.N_2.\Phi_m.k_{e2}$$

Onde:

E_1 = Força contra eletromotriz induzida no estator;

E_2 = Força eletromotriz induzida no rotor;

k_{e1} e k_{e2} = Fator de enrolamento do estator e rotor, respectivamente;

N_1 e N_2 = Número de espiras do estator e rotor, respectivamente;

Φ_m = Fluxo de magnetização;

$f_2 = f_1$ para rotor bloqueado.

Na presença de escorregamento tem-se:

$$f_2 = s \times f_1$$

Portanto:

$$E_{2s} = 4,44.s.f_1.N_2.\Phi_m.k_{e2} \cong s.E_2$$

Esta equação pode ser simplificada, para um estudo mais aproximado da máquina, por:

$$\Phi_m \cong \frac{E_1}{f_1}$$

Este documento brevemente delinea a correlação entre o fluxo de magnetização presente nos componentes do rotor e estator de uma máquina elétrica com a tensão e frequência aplicadas. A mencionada frequência está intrinsecamente ligada à rotação do eixo da máquina, desconsiderando o escorregamento que possa existir entre o rotor e o estator.

3.18 Conjugado eletromagnético

A interação entre a corrente do rotor e o fluxo gerado por cada polo unitário do campo magnético

rotativo que envolve o condutor do rotor dá origem ao conjugado motor, expresso por:

$$C = k \cdot \Phi_m \cdot I_{2s} \cdot \cos \Phi_{2s}$$

Onde:

k = Constante de conjugado para o número de pólos, o enrolamento, as unidades empregadas, etc.;

$\cos \Phi_{2s}$ = Fator de potência do circuito rotórico;

Φ_m = Fluxo de magnetização;

I_{2s} = Corrente rotórica.

Da mesma forma, para um estudo mais aproximado da máquina, esta equação poderá ser simplificada por:

$$C \approx \Phi_m \cdot I_{2s}$$

A determinação da correlação entre o torque gerado (demandado) pela máquina, o fluxo de magnetização entre o rotor e o estator, e a corrente induzida rotórica é estabelecida por meio da seguinte expressão:

$$I_{2s} = \frac{s \times E_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_{d2}^2}} = \frac{s \times E_2}{Z_{2s}}$$

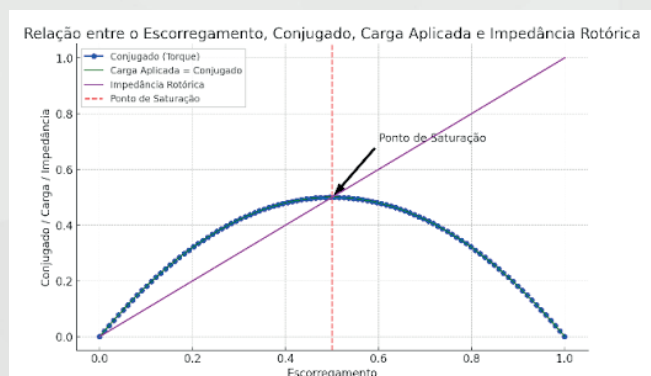
Onde:

Z_{2s} = Impedância rotórica;

E_2 = Força eletromotriz induzida no rotor;

s = Escorregamento.

Observa-se, portanto, que o conjugado gerado é uma função do escorregamento; ou seja, à medida que a carga aplicada à máquina aumenta, o escorregamento aumenta, resultando no aumento do torque desenvolvido. Essa relação demonstra um ponto de saturação no qual é possível obter o conjugado máximo, conforme podemos ver no gráfico a seguir.



Além desse ponto, podemos observar que ao aumentar o escorregamento, ocorre um aumento na impedância rotórica, levando a uma diminuição no conjugado, conforme será detalhado na seção subsequente.

3.19 Conjugado de partida

A partir da formulação do modelo matemático da máquina assíncrona, evidencia-se que o conjugado é representado por:

$$C_p = k \cdot E_1^2 \cdot \left(\frac{R_2}{R_2^2 + X_{d2}^2} \right)$$

Onde:

C_p = Conjugado de partida;

k = Constante de conjugado para o número de pólos, o enrolamento, as unidades empregadas etc.;

E_1 = Tensão estatórica;

R_2 = Resistência rotórica;

X_{d2} = Reatância rotórica.

Da equação acima pode-se fazer as seguintes considerações:

- No instante da partida, o conjugado não é afetado pela natureza da carga aplicada;
- Considerando um motor de indução tipo gaiola, é possível expressar a equação, desde que a resistência efetiva do rotor e a reatância de rotor bloqueado se mantenham constantes. Conforme a fórmula:

$$C_p = k' \times E_1^2$$

Em outras palavras, o torque inicial é exclusivamente determinado pela tensão aplicada ao enrolamento do estator. A redução da tensão nominal resultará na diminuição tanto da corrente primária quanto da corrente secundária. Este procedimento de atenuação da corrente de partida é amplamente empregado em motores de médio e grande porte, particularmente em motores de gaiola, quando a considerável redução do torque de partida não prejudica o acionamento eficaz da carga.

3.20 Distribuição de potências e perdas

Em instâncias onde ocorre um acionamento no qual a potência demandada ao motor se mantém constante ao longo do tempo, a avaliação da potência é relativamente direta. Dados o torque resistente da carga e a rotação de operação conhecidos, obtém-se o seguinte:

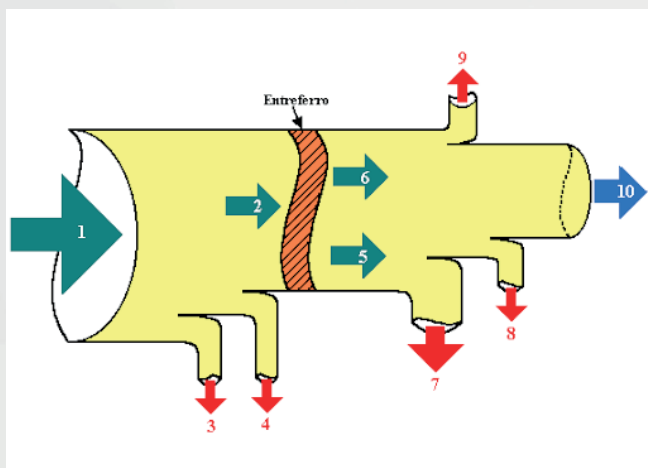
$$P = \frac{C \times n}{k}$$

É imperativo considerar que a potência demandada pelo motor é determinada pelas propriedades intrínsecas da carga, desvinculada da potência nominal do motor.

A potência transmitida à carga através do eixo do motor é inferior à potência absorvida da rede, em virtude das perdas inerentes ao motor. Tais perdas podem ser categorizadas como:

- Perdas joule no enrolamento estático (perdas no cobre);
- Perdas joule no enrolamento (ou gaiola) rotórico;
- Perdas por atrito e ventilação;
- Perdas magnéticas no núcleo (perdas no ferro).

A figura a seguir, representa a distribuição destas perdas:



Onde:

- 1 - Potência aparente elétrica da rede. Sendo, $1 = 2 + 3 + 4$;
- 2 - Potência aparente elétrica do estator a ser transferida ao rotor. Sendo, $E_1 \cdot I_2' = E_2 \cdot I_2$;
- 3 - Perdas primárias (estator) no ferro;
- 4 - Perdas primárias (estator) no cobre;

5 - Potência aparente elétrica no rotor. Onde, o resultado de $sE_2 \cdot I_2$, são as perdas devido ao escorregamento;

6 - Potência mecânica no eixo. Sendo, $(1-s) \cdot E_2 \cdot I_2$;

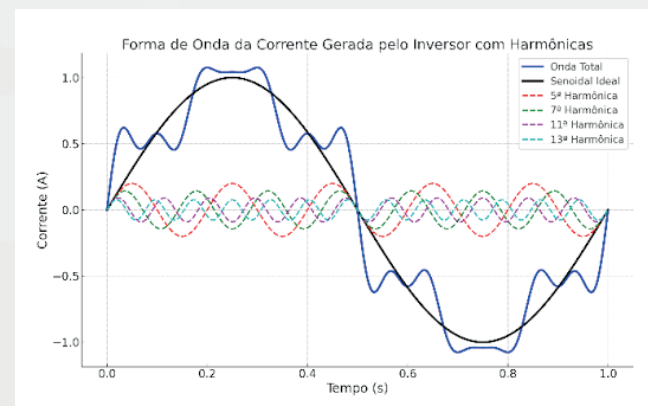
7 - Potência elétrica no rotor que pode ser recuperável, no caso do rotor estar ligado a uma rede externa por meio de anéis;

8 - Perdas elétricas dissipadas no rotor;

9 - Perdas por atrito e ventilação;

10 - Potência resultante no eixo, que é resultado da potência mecânica (6) - perdas por atrito e ventilação (9).

No contexto do acionamento de um motor de indução por meio de um inversor de frequência, é observado que a forma de onda da corrente gerada pelo inversor não segue uma distribuição senoidal ideal, apresentando harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem, conforme podemos ver no gráfico a seguir.



Analisando o gráfico, podemos identificar a distribuição senoidal ideal como uma forma de onda senoidal pura, sem distorções ou harmônicas. A onda total, no contexto do gráfico, é a soma da onda senoidal ideal e das harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem. As harmônicas são componentes de frequência múltipla da frequência fundamental, que distorcem a forma de onda ideal. A presença dessas harmônicas faz com que a forma de onda total se desvie da senoidal ideal, resultando em uma corrente que não é uma senóide perfeita. Essa não conformidade resulta em um aumento das perdas nos motores. Adicionalmente, em operações além da frequência nominal (50 ou 60 Hz), verifica-se uma diminuição adicional do conjugado, ocasionada pelo incremento das perdas no núcleo de ferro do motor.

Ao considerar a utilização de motores em frequências superiores à nominal, torna-se imperativo contemplar tanto o aumento das perdas no ferro quanto as limitações de velocidade. Estas últimas es-

tão relacionadas à influência da força centrífuga nos enrolamentos rotóricos e em outros componentes mecânicos, como, por exemplo, o esforço adicional nos rolamentos decorrente do desbalanceamento do rotor, além da própria velocidade limite deste.

3.21 Fator de serviço (FS)

O Fator de Serviço (FS) é um parâmetro aplicado à potência nominal, indicando a carga sustentável que pode ser continuamente aplicada ao motor em condições especificadas. Importante ressaltar que esse é um indicador de capacidade de sobrecarga contínua, representando uma reserva de potência que possibilita ao motor operar de forma mais robusta em situações adversas. É válido observar que, conforme as normas aplicáveis, há permissão para um aumento de 10°C na elevação de temperatura da classe durante a consideração do fator de serviço.

Cabe destacar que o fator de serviço não deve ser confundido com a capacidade de suportar sobrecargas momentâneas em curtos intervalos de tempo. No caso dos motores do fabricante WEG, por exemplo, eles são capazes de tolerar sobrecargas de até 60% da carga nominal por 15 segundos. Quando FS=1.0, isso indica que o motor não foi projetado para operar continuamente acima de sua potência nominal nas condições normais de operação. Entretanto, essa especificação não impacta a capacidade do motor de lidar com sobrecargas momentâneas.

Em aplicações que demandam uma capacidade de sobrecarga, é recomendável o uso de um motor com potência nominal superior à padronizada, visando evitar que a elevação de temperatura atinja valores superiores à classificação térmica utilizada e para assegurar o torque adequado. É importante ressaltar que a utilização do fator de serviço resulta em uma vida útil inferior em comparação com um motor operando sob carga nominal.

3.22 Rendimento

O motor elétrico se apropria de energia elétrica proveniente da fonte de alimentação e a converte em energia mecânica disponível no eixo. A eficiência dessa transformação é determinada pelo rendimento. Denominada como potência útil (Pu), a quantidade de potência mecânica disponível no eixo é contrastada com a potência absorvida (Pa), representando a potência elétrica retirada pelo motor da

rede. O rendimento é, portanto, caracterizado como a relação entre essas duas grandezas, conforme segue:

$$\eta\% = \frac{P_u(W)}{P_a(W)} \times 100 = \frac{P_a(W)}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \Phi} \times 100 = \frac{736 \cdot P(c.v)}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos}$$

O desempenho está condicionado ao projeto e ao tipo do motor, com seu valor sendo influenciado pela fração de energia elétrica convertida em energia mecânica. Portanto, o rendimento é impactado pelas perdas, tanto elétricas quanto mecânicas, que se manifestam e são determinadas pela diferença entre a potência fornecida e a recebida.

Existem dois métodos principais para a determinação do rendimento: o método direto e o método através de circuito equivalente.

O método direto é uma abordagem prática e simples para determinar o rendimento de um motor elétrico. Nesse método, mede-se diretamente a potência elétrica de entrada e a potência mecânica de saída do motor. A fórmula para calcular o rendimento é a razão entre a potência de saída e a potência de entrada, multiplicado por 100%. Esse método é vantajoso por sua simplicidade e por fornecer uma medição direta e rápida do rendimento do motor. No entanto, sua precisão depende da exatidão dos instrumentos de medição utilizados para determinar a potência de entrada e saída.

O método do circuito equivalente é uma abordagem mais analítica e detalhada para determinar o rendimento de um motor elétrico. Nesse método, utiliza-se um modelo matemático do motor, representado por um circuito equivalente que considera as diversas perdas internas do motor, conforme vimos anteriormente. Para aplicar esse método, são realizados testes específicos, como o teste de rotor bloqueado e o teste em vazio, que permitem determinar os parâmetros do circuito equivalente. A partir desses parâmetros, calcula-se o rendimento considerando todas as perdas internas. Esse método é mais preciso e permite uma análise detalhada das diversas contribuições para as perdas no motor. No entanto, é mais complexo e requer uma compreensão aprofundada do comportamento elétrico e mecânico do motor, além de equipamentos de medição sofisticados.

Ambos os métodos mencionados levam em consideração valores assumidos de perdas suplementares correspondentes a 0,5% da potência nominal.

3.22.1 Importância do rendimento

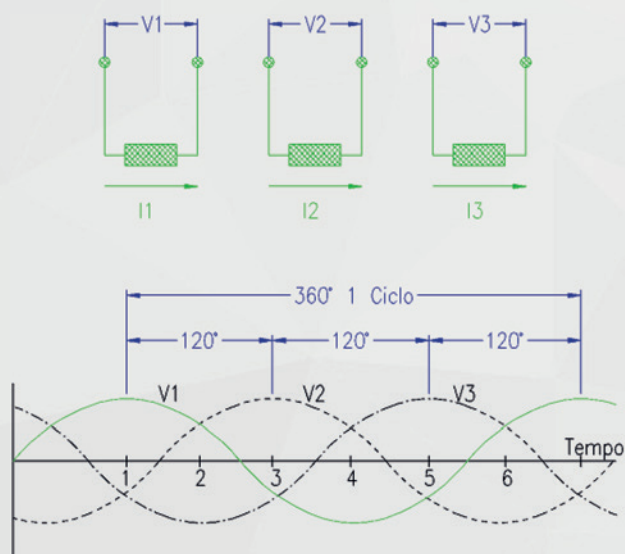
A eficiência do motor assume uma importância primordial, fundamentada em dois imperativos. Em primeiro lugar, a elevada eficiência implica em perdas diminutas, resultando, por conseguinte, em uma menor geração de calor no motor. Em segundo lugar, à medida que o rendimento cresce, a potência absorvida da rede diminui, culminando em um custo reduzido na fatura de energia elétrica.

A eficiência do motor é variável em consonância com a carga imposta.

3.23 Características de rede de alimentação

3.23.1 Sistema de alimentação alternada trifásica

O sistema trifásico é configurado mediante a interligação de três sistemas monofásicos de tensões, designados como V_1 , V_2 e V_3 , de modo que a defasagem angular entre eles seja de 120° , conforme representado na figura abaixo. O enrolamento desse tipo de motor é composto por três conjuntos de bobinas distribuídas simetricamente no espaço, configurando entre elas um ângulo de 120° . Para assegurar a condição de equilíbrio no sistema, ou seja, $V_1=V_2=V_3$, é imperativo que o número de espiras em cada bobina seja uniforme.



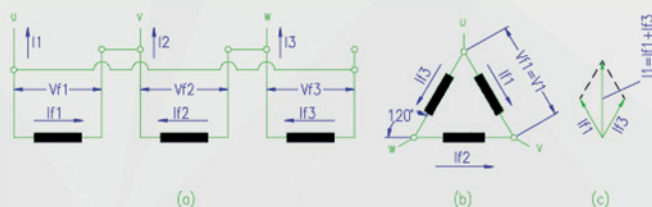
A interconexão dos três sistemas monofásicos visando a obtenção do sistema trifásico é comumente realizada por meio de duas modalidades, conforme exemplificado a seguir.

3.23.2 Ligações do sistema trifásico

Existem dois tipos principais de ligações em sistemas trifásicos em máquinas elétricas: estrela (Y) e triângulo (Δ). A conexão em estrela envolve a interligação dos terminais de cada fase ao ponto neutro, enquanto a conexão em triângulo consiste em conectar os terminais de fase consecutivos, formando um circuito fechado. Essas configurações influenciam características operacionais e a distribuição em cada enrolamento de tensão e corrente nas máquinas elétricas trifásicas. A escolha entre esses arranjos depende das necessidades específicas da aplicação.

3.23.3 Ligação triângulo

Denominamos "tensões/correntes de fase" às tensões e correntes correspondentes a cada um dos três sistemas monofásicos considerados, identificados como V_f e I_f . Caso os três sistemas monofásicos sejam interconectados conforme representado na figura 'a' a seguir, torna-se possível eliminar três condutores, resultando na retenção de apenas um em cada ponto de interligação. O sistema trifásico resultante é composto pelos condutores U, V e W. A tensão existente entre quaisquer dois desses três condutores é denominada "tensão de linha" (V_L), representando a tensão nominal do sistema trifásico. Da mesma forma, a corrente fluindo através de qualquer um dos condutores é referida como "corrente de linha" (I_L).



Examinando o esquema 'b' da figura acima, podemos identificar que:

I - Em cada instância de carga, é exercida a tensão de linha (V_L), representativa da tensão intrín-

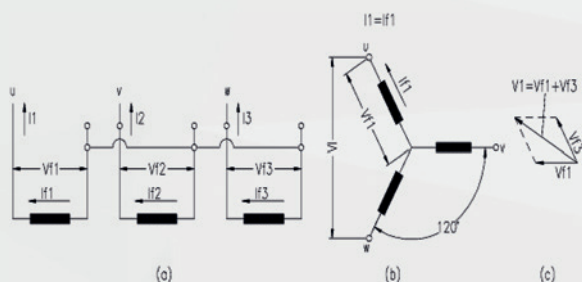
seca ao sistema monofásico correspondente, isto é, tensão de linha (VL) é igual a tensão de fase (Vf).

II - A corrente circulante em cada condutor de linha, ou seja, a corrente de linha (IL), consiste na agregação das correntes associadas às duas fases conectadas a esse condutor, ou seja, $IL = I_{f1} + I_{f3}$. Dado o desfasamento entre as correntes, a soma deve ser realizada graficamente, conforme ilustrado na figura 'C' acima.

Pode-se mostrar que: $IL = I_f \cdot \sqrt{3}$

3.23.4 Ligação Estrela

Conectando um dos condutores de cada sistema monofásico a um ponto compartilhado entre os três, os três condutores restantes configuram um sistema trifásico em estrela, conforme ilustrado na figura 'a' abaixo.



O sistema trifásico em estrela é ocasionalmente denominado "quatro fios" ou "com neutro acessível".

O quarto condutor é vinculado ao ponto comum entre as três fases. A tensão de linha, ou tensão nominal do sistema trifásico, e a corrente de linha são definidas da mesma maneira que na configuração em triângulo.

Analisando o diagrama apresentado acima, observa-se que:

I - A corrente em cada condutor da linha, denominada corrente de linha (I_L ou IL), corresponde à corrente da fase à qual o condutor está conectado, ou seja, $IL = I_f$.

II - A tensão entre dois condutores quaisquer do sistema trifásico é a soma gráfica, conforme ilustrado na figura 'C', das tensões das duas fases às quais os condutores considerados estão conectados, ou seja:

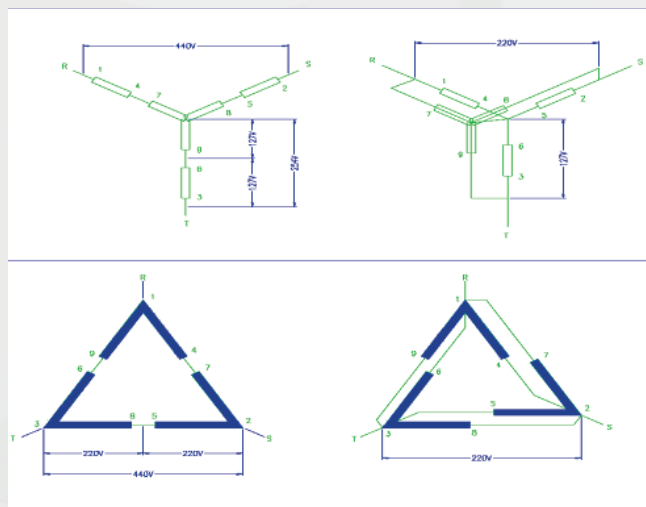
$$V_L = V_f \cdot \sqrt{3}$$

3.23.5 Ligações para Tensões Nominais Múltiplas

A preponderância substancial de alguns modelos de máquinas elétricas rotativas é equipada com terminais de enrolamento de armadura que são reconfiguráveis, possibilitando a emissão de pelo menos duas tensões distintas. As modalidades preeminentes de reconfiguração de terminais em geradores ou motores assíncronos, destinadas a operação em múltiplas tensões, incluem:

a) Ligação série-paralela

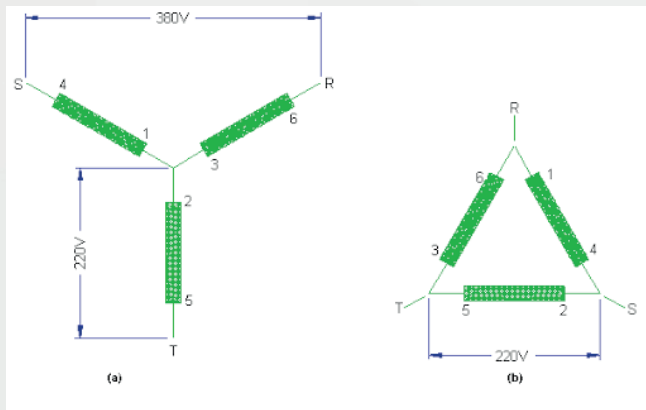
O enrolamento de cada fase é subdividido em duas seções, destacando-se que o número de polos é sempre par, assegurando a viabilidade dessa conexão. Ao conectar as duas metades em série, cada seção resultante adquire a metade da tensão nominal de fase da máquina. Por outro lado, ao interligar as duas metades em paralelo, a máquina gera uma tensão equivalente à metade da tensão anterior, sem afetar a tensão aplicada a cada bobina individualmente.



b) Ligação estrela-triângulo

A aplicação da configuração estrela-triângulo é uma prática convencional na inicialização de motores assíncronos. Nesse arranjo específico, as extremidades de cada fase do enrolamento são externamente acessíveis no motor. Quando as três fases são conectadas em um arranjo triangular, cada fase é submetida à tensão da linha de alimentação, por exemplo, 220V na figura 'B' abaixo. Alternativamente, ao conectar as três fases em um arranjo estrela, o

motor pode ser conectado a uma linha com tensão de alimentação igual a $220 \times \sqrt{3} = 380V$, sem afetar a tensão em cada fase do enrolamento, que permanece em 220V, conforme a figura 'A' abaixo.



Essa metodologia de conexão requer a disponibilidade de 6 terminais acessíveis na caixa de junção do motor, sendo aplicável a diversas combinações de tensões nominais duplas, desde que a segunda seja equivalente à primeira multiplicada por $\sqrt{3}$, devido ao ângulo de defasagem no fechamento no caso do fechamento estrela. Exemplificando, configurações como 220/380V, 380/660V e 440/760V são compatíveis com essa técnica. Ressalta-se que, quando a tensão ultrapassa 600 Volts, ela não é categorizada como baixa tensão, sendo inserida na faixa de média tensão, sujeita a normativas distintas. Nas instâncias de 380/660V e 440/760V, a indicação da maior tensão especificada serve unicamente para sinalizar a viabilidade de religar o motor utilizando o arranjo estrela-triângulo, uma vez que não existem linhas de alimentação operando nessas faixas de tensão.

3.24 Desequilíbrio angular

O desequilíbrio angular em máquinas síncronas refere-se à disparidade entre as posições angulares das bobinas ou fases elétricas da máquina. Esse fenômeno pode resultar em variações indesejadas na distribuição de fluxo magnético, impactando negativamente no desempenho e na eficiência da máquina síncrona.

A análise e o controle precisos do desequilíbrio angular são essenciais para garantir o funcionamento estável e eficiente desses dispositivos. As fases de um sistema trifásico apresentam uma defasagem angular de 120 graus. Caso a defasagem seja

distinta de 120 graus, tal valor configurará um estado de desequilíbrio no sistema.

3.25 Noções fundamentais de motores de indução

À análise inicial, as máquinas de indução podem ser categorizadas como máquinas de excitação única, uma vez que recebem apenas tensões alternadas polifásicas em seu estator. Entretanto, é importante observar que uma tensão alternada de frequência variável é induzida em seu rotor, de maneira análoga à indução de uma tensão alternada em um secundário de um transformador por meio de ação transformadora. Conseqüentemente, a máquina de indução é caracterizada como uma máquina de dupla excitação, na qual uma tensão alternada CA é aplicada tanto ao enrolamento do estator (armadura) quanto ao enrolamento do rotor.

A tensão aplicada ao enrolamento da armadura é uma tensão de excitação com frequência geralmente constante e potencial também geralmente constante. Essa tensão é fornecida por um barramento polifásico ou monofásico, de maneira similar às máquinas síncronas. Por outro lado, a tensão aplicada ao rotor é uma tensão induzida, caracterizada por frequência e potencial variáveis, resultantes da velocidade do rotor em relação à velocidade síncrona.

3.25.1 Vantagens

Dentre as principais vantagens, destacamos:

- Eficiência e clareza operacional;
- Implementação simplificada e custo otimizado;
- Adaptabilidade significativa a diversos tipos de cargas.

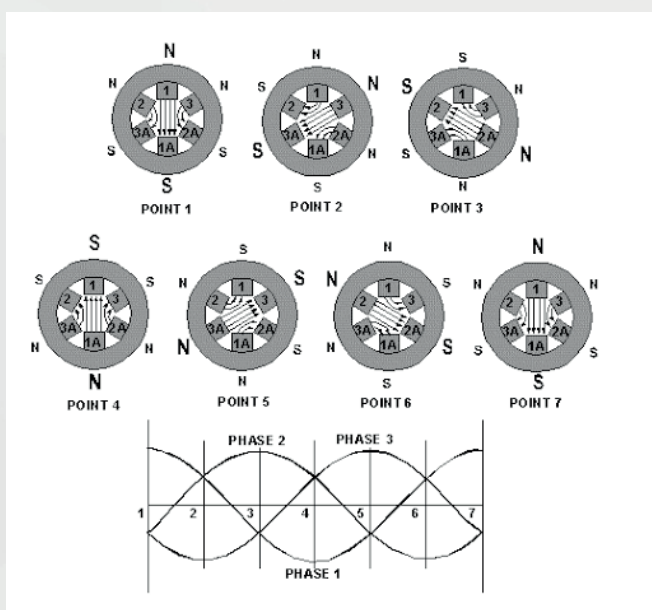
O motor de indução trifásico é notável por operar com uma velocidade praticamente constante, com variação mínima em resposta à carga mecânica imposta ao eixo. Em virtude de sua simplicidade e robustez inerentes, este motor é extensivamente empregado, demonstrando-se apropriado para uma ampla gama de máquinas acionadas encontradas na prática.

A superioridade do rotor em relação ao rotor bobinado reside na sua capacidade de possibilitar a construção do induzido de maneira mais eficiente, prática e econômica. Este motor é caracterizado

por sua robustez, custo acessível, rápida fabricação, dispensando a necessidade de um coletor (componente sensível e dispendioso), e rápida integração à rede elétrica.

3.25.2 Campo magnético girante

Este princípio do eletromagnetismo clássico assume grande relevância, sendo sua descoberta um marco fundamental para o avanço tecnológico dos modernos motores de corrente alternada, notadamente os motores de indução. De forma concisa, sua formulação é a seguinte: "O estabelecimento de três correntes alternadas senoidais, com amplitudes idênticas e defasagem de 120° entre si, percorrendo três bobinas fixas cujos eixos magnéticos estão espaçados angularmente em 120° , resulta na geração de um campo magnético rotativo de intensidade constante." A concepção desta engenhosa metodologia para criar tal campo é creditada ao engenheiro de origem croata, Nikola Tesla (1856-1943). A figura abaixo, ilustra de maneira elucidativa o funcionamento do mencionado campo girante.



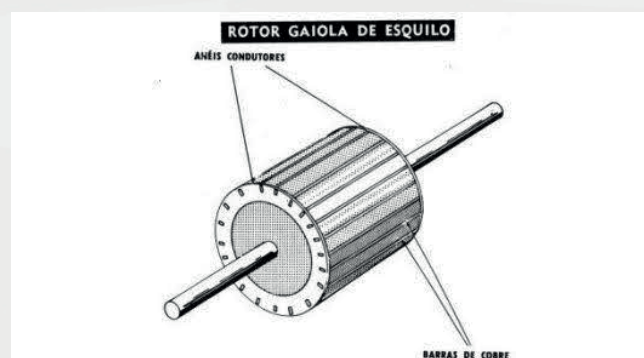
Na figura acima, é possível observar a orientação do "campo resultante", assim como as formas de onda das tensões alternadas, todas apresentando um defasamento de 120° . Em dois momentos distintos, verifica-se a alteração na orientação resultante do campo, evidenciando, assim, o movimento correspondente.

3.25.3 Princípio de funcionamento

Um aspecto essencial consiste na compreensão do mecanismo de geração de torque eletromecânico no rotor de um motor de indução. A origem desse torque no rotor fundamenta-se nas postulações da lei de indução de Faraday e da lei de Lenz, já citadas anteriormente.

3.25.3.1 Motor de indução de gaiola

Primeiramente, é imprescindível adquirir compreensão acerca da configuração dos componentes primordiais que integram os fundamentos operacionais do motor de indução. A seguir, apresenta-se uma representação gráfica elucidativa referente ao rotor tipo gaiola de esquilos.



Observe-se que a gaiola possui anéis metálicos na tampa e na base, a fim de efetuar o curto-circuito nas barras, permitindo assim a circulação de correntes por meio delas.

O rotor em gaiola de esquila é composto por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são dispostas barras condutoras metálicas de alumínio, colocadas paralelamente e conectadas nas extremidades por dois anéis condutores, que realizam o curto-circuito nas barras. As barras do rotor tipo gaiola de esquila não necessariamente seguem uma disposição paralela ao eixo do rotor, podendo ser deslocadas ou posicionadas sob um pequeno ângulo em relação a ele, com o objetivo de gerar um torque mais uniforme e reduzir o ruído magnético durante a operação do motor.

O estator do motor é igualmente constituído por um núcleo ferromagnético laminado, onde são

inseridos os enrolamentos alimentados pela rede de corrente alternada trifásica.

Retornando aos princípios de Faraday, quando há uma variação do fluxo magnético com o tempo em uma bobina, surge uma tensão na mesma, originando, conseqüentemente, uma corrente circulante por ela. Essa corrente segue o sentido definido pela Lei de Lenz (resumida como: "O fluxo criado pela corrente induzida deve opor-se à variação de fluxo que a gerou"). Assim, surge uma polaridade na bobina oposta à do fluxo.

Em um motor de indução, esse fluxo variável é gerado pelo campo girante mencionado anteriormente. Esse fluxo atravessa o rotor tipo gaiola também previamente apresentado.

Ao atravessar as barras do rotor gaiola, o fluxo girante induz correntes que, por sua vez, geram fluxos (como se fossem eletroímãs com polaridade oposta ao fluxo) que buscam resistir ao movimento do fluxo girante (Lei de Lenz).

Como resultado, o rotor de gaiola gira no mesmo sentido do fluxo girante, procurando alcançá-lo para reduzir a intensidade da indução, a qual, como conhecido, é proporcional à variação do fluxo (Lei de Faraday). Dessa forma, é estabelecido o torque (conjugado) que faz o rotor gaiola girar. Este conjugado pode ser expresso pela seguinte equação:

$$C = \frac{P_s}{\omega_s}$$

Onde:

C = conjugado nominal (Nm);

P_s = potência saída nominal (kW);

ω_s = velocidade angular (radianos por segundo).

3.25.3.2 Motor de indução de rotor bobinado

O motor de rotor bobinado diverge do motor de rotor em gaiola de esquilo exclusivamente em relação ao rotor. O rotor é composto por um núcleo ferromagnético laminado, no qual estão instaladas as espiras que compõem o enrolamento trifásico, geral-

mente disposto em configuração estrela. Os três terminais livres de cada bobina no enrolamento trifásico são conectados a três anéis coletores. Esses anéis, por sua vez, se conectam externamente a um reostato de partida, composto por resistências variáveis também ligadas em estrela. Assim, os enrolamentos do rotor também são mantidos em circuito fechado.

Destacamos o uso de reostato que é um dispositivo elétrico utilizado para controlar a resistência em um circuito. Ele possui uma resistência ajustável que pode ser modificada para regular o fluxo de corrente elétrica. A finalidade do reostato de partida, conectado aos enrolamentos do rotor, consiste em atenuar as correntes de arranque substanciais, particularmente em motores de considerável potência.

Conforme o motor aumenta sua velocidade, as resistências são gradualmente removidas do circuito, sendo curto-circuitadas quando o motor atinge o regime nominal. Desse modo, o motor de rotor bobinado opera com os elementos do rotor em curto-circuito, assemelhando-se ao funcionamento do motor de rotor em gaiola de esquilo quando atinge seu regime nominal.

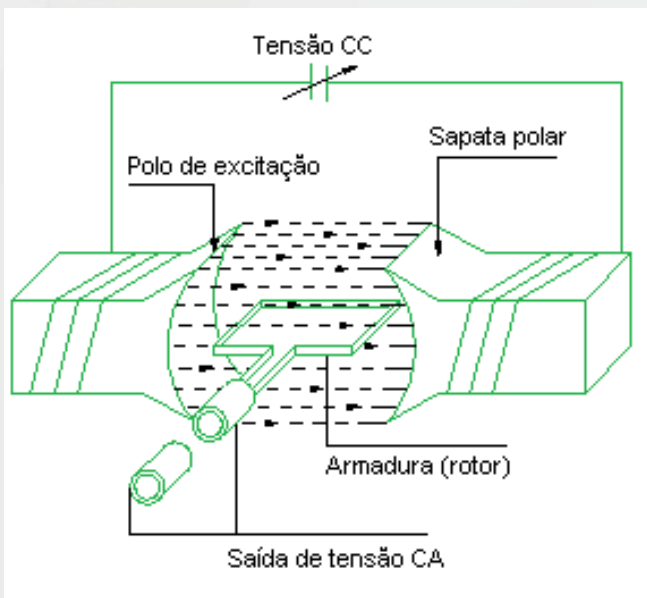
O motor de indução de rotor bobinado é empregado em substituição ao motor de rotor em gaiola de esquilo em aplicações de potência considerável devido à redução da corrente de arranque possibilitada pela configuração do rotor.

Embora seja comumente utilizado em situações com velocidades de serviço constantes, conforme mencionado no parágrafo anterior, sua aplicação também se estende a situações com velocidades variáveis.

3.26 Noções fundamentais de geradores

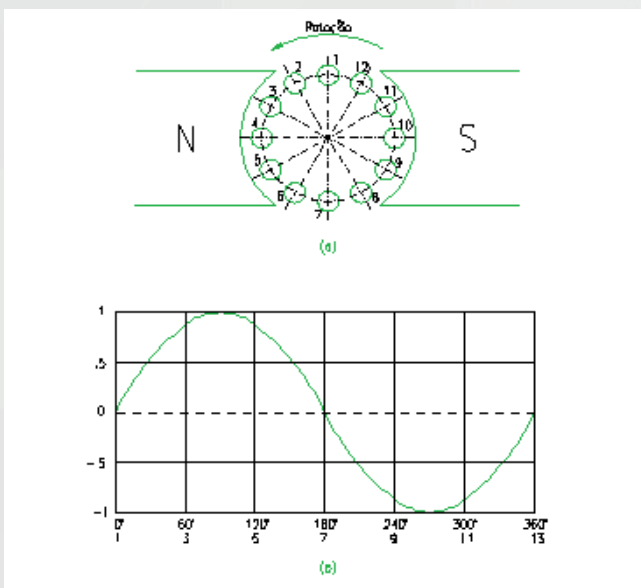
3.26.1 Princípio de funcionamento

A principal característica inerente a um gerador elétrico reside na sua capacidade de converter energia mecânica em energia elétrica. Com o intuito de elucidar o princípio de funcionamento subjacente, procederemos, inicialmente, considerando uma espira imersa em um campo magnético gerado por um ímã permanente, conforme a figura a seguir.



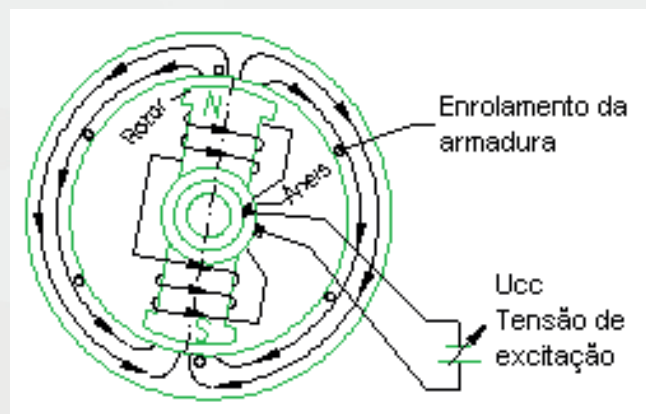
O fundamento essencial desse processo está ancorado no movimento relativo entre a espira e o campo magnético. Os terminais da espira são interligados a dois anéis, os quais, por sua vez, conectam-se ao circuito externo por meio de escovas. Esse tipo específico de gerador é comumente referido como "armadura giratória".

A variação temporal da força eletromotriz (f.e.m.) em um condutor é determinada pela aplicação da lei da distribuição da indução magnética sob um polo. Essa distribuição apresenta um caráter complexo, influenciado pela configuração da sapata polar. Mediante um desenho apropriado da sapata, é possível alcançar uma distribuição senoidal de induções. Nesse cenário, a f.e.m. induzida no condutor também segue uma variação temporal em conformidade com uma lei senoidal.



Na figura 'A' acima, é apresentado apenas um lado da bobina imersa no campo magnético, ilustrado em 12 posições distintas, com cada posição separada por um intervalo angular de 30 graus. A figura 'B' exibe as correspondentes tensões associadas a cada uma dessas posições.

Nos geradores de campo giratório, representados na figura abaixo, a extração da tensão de armadura ocorre diretamente a partir do enrolamento de armadura, neste contexto, o estator, sem transitar pelas escovas. A magnitude da potência de excitação desses geradores geralmente se mantém abaixo de 5% da potência nominal. Em virtude dessa consideração, a preferência recai sobre o emprego do tipo de armadura fixa, também conhecido como campo girante, dada a sua predominância e aplicabilidade.

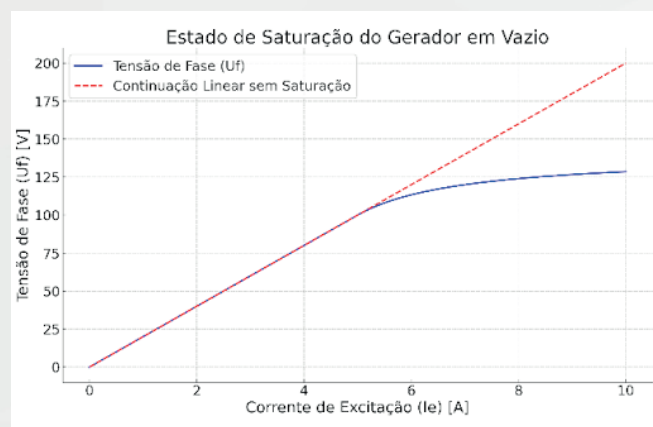


Em um sistema composto por uma máquina de um par de polos, a cada revolução das espiras, ocorre um ciclo completo da tensão gerada. É possível projetar enrolamentos com um número superior de pares de polos, distribuídos de maneira alternada entre polo norte e sul. Nesse contexto, um ciclo é completado a cada par de polos. A conclusão desse contexto está expressa no tópico de "velocidade síncrona", visto anteriormente.

3.26.2 Comportamento do gerador em vazio e sob carga

Em condição de vazio, caracterizada por rotação constante, a tensão na armadura está diretamente relacionada ao fluxo magnético originado pelos polos de excitação ou à corrente que percorre o enrolamento de campo (rotor). Isso se deve ao fato de que o estator não é atravessado por corrente, resultando na ausência de reação da armadura. O efeito

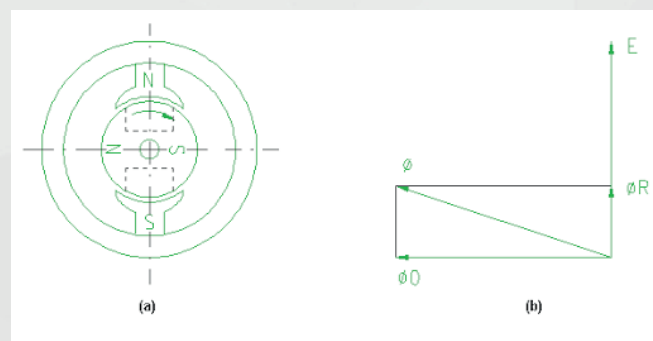
dessa condição é a alteração do fluxo total. A relação entre a tensão gerada e a corrente de excitação é denominada característica a vazio, conforme ilustrado na figura abaixo. Nesse contexto, é possível observar o estado de saturação da máquina.



Sob carga, a corrente que percorre os condutores da armadura induz a formação de um campo magnético, resultando em modificações na intensidade e distribuição do campo magnético primário. Essa variação está condicionada à corrente, ao $\cos\Phi$ e às especificidades da carga, conforme delineado a seguir.

3.26.2.1 Carga puramente resistiva

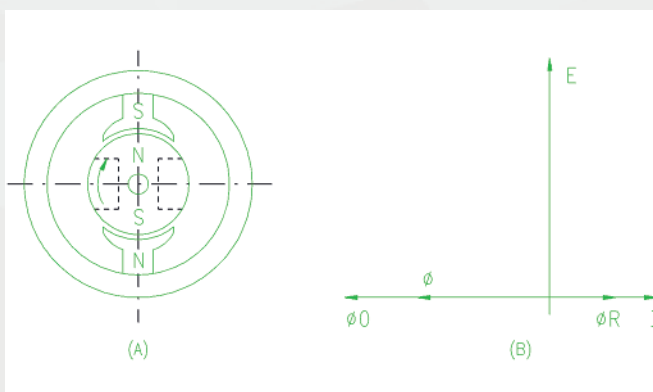
Quando o gerador alimenta um circuito exclusivamente resistivo, a corrente de carga resulta na geração de um campo magnético intrínseco. Este campo magnético induzido origina dois polos (configurando um gerador bipolar, conforme representado na figura 'a' abaixo), os quais estão defasados em 90° atrasados em relação aos polos principais. Esses polos induzidos exercem uma força contrária ao movimento sobre os polos principais, exigindo o consumo de potência mecânica para manter o rotor em rotação.



O esquema representado na figura 'b' acima ilustra a modificação do fluxo magnético principal em vazio (Φ_0) em relação ao fluxo resultante da reação da armadura (Φ_R). A variação de Φ_0 é de magnitude reduzida, resultando em uma alteração insignificante no fluxo global Φ . Em virtude da diminuição da tensão nos enrolamentos da armadura, é imperativo aumentar a corrente de excitação para preservar a tensão nominal.

3.26.2.2. Carga puramente indutiva

Nesta situação, a corrente de carga (I) apresenta um atraso de 90° em relação à tensão (E), resultando no campo de reação da armadura (Φ_R) alinhado na mesma direção do campo principal (Φ_0), porém com polaridade oposta. A influência da carga indutiva é caracterizada como desmagnetizante, conforme a figura a seguir.



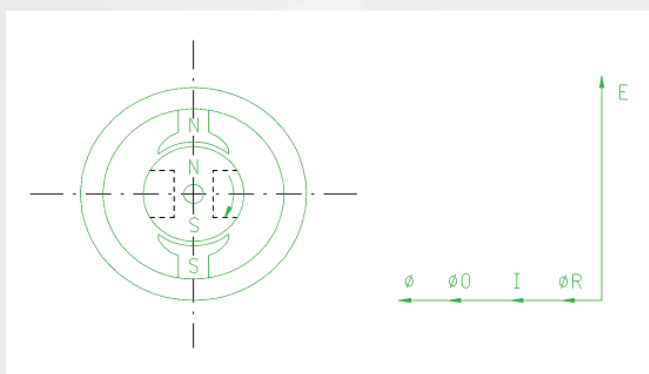
As cargas indutivas armazenam energia em seus campos indutores e a restituem integralmente ao gerador, sem exercer qualquer torque de frenagem sobre o induzido (rotor). Nesse cenário, apenas a energia mecânica necessária para compensar as perdas é requerida.

Devido ao efeito desmagnetizante, é imprescindível um considerável aumento na corrente de excitação para manter a tensão nominal.

3.26.2.3 Carga puramente capacitiva

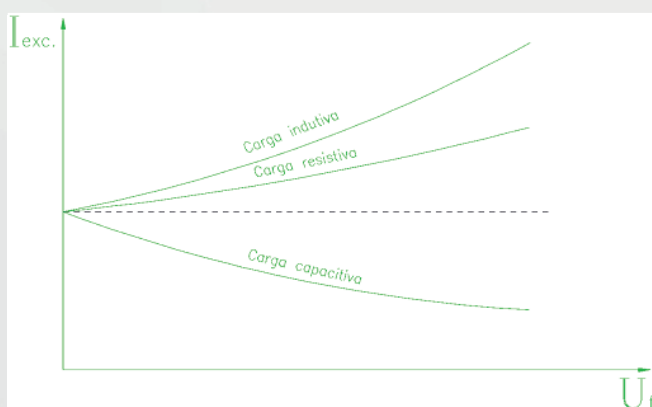
A corrente de armadura (I) em uma carga puramente capacitiva está defasada em 90° , adiantada em relação à tensão (E). Consequentemente, o campo de reação da armadura (Φ_R) estará alinhado com o campo principal (Φ) e terá a mesma polaridade.

Neste contexto, o campo induzido apresenta um efeito magnetizante, conforme ilustrado na figura a seguir.



Cargas capacitivas armazenam energia em seus campos elétricos e a devolvem integralmente ao gerador. Ao contrário das cargas indutivas, elas não exercem nenhum conjugado frenante sobre o induzido (rotor). Devido ao efeito magnetizante, torna-se necessário reduzir a corrente de excitação para manter a tensão nominal.

A seguir, podemos ver um comparativo quanto a característica a ser adotada na relação entre a corrente de excitação (I_{exc}) e a tensão de fase (U_f) para os três tipos de cargas citados anteriormente.



3.26.2.4 Cargas intermediárias

Na aplicação prática, deparamo-nos com cargas caracterizadas por uma defasagem intermediária entre completamente indutivas, capacitivas e resistivas. Nestas instâncias, o campo induzido pode ser decomposto em dois componentes: um transversal e outro desmagnetizante (indutivo) ou magnetizante (capacitivo). Apenas o componente transversal exerce um efeito de frenagem, resultando assim na dissipação de potência mecânica proveniente da máquina de acionamento. O efeito magnetizante ou desmagnetizante é compensado mediante a modificação da corrente de excitação.

3.26.3 Excitação e desexcitação

A autoexcitação é iniciada pela tensão residual da máquina ou por uma pré-excitação fornecida pelo banco de baterias. Durante os procedimentos de manutenção, é imperativo que as máquinas estejam inativas, uma vez que apenas a desexcitação não é suficiente. A desexcitação pode ser realizada pela interrupção do gerador ou desligamento do regulador, se presente no painel.

Para máquinas brushless, é possível incorporar um circuito de roda livre no estator da excitatriz, em paralelo com o regulador. Ao retirar energia do regulador, a corrente de excitação é direcionada através de uma resistência de descarga, resultando em uma desexcitação mais rápida da máquina principal.

No caso de máquinas de anéis, o processo de desexcitação segue os mesmos princípios descritos anteriormente. Contudo, neste contexto, a desexcitação é projetada para dissipar a energia do campo.

Cabe ressaltar a existência do circuito "Crow-Bar," que tem a função de proteger o rotor contra a perda de sincronismo da máquina principal.

3.26.4 Regulador de tensão

O Regulador Automático de Tensão (AVR - Automatic Voltage Regulator) constitui um elemento eletrônico de suma importância, projetado para manter a tensão de saída de uma máquina síncrona (geradores) dentro de limites predeterminados, independentemente das flutuações na carga demandada. Este dispositivo efetua o monitoramento contínuo da tensão terminal da máquina, procedendo ao ajuste da corrente no enrolamento de campo da excitatriz principal para assegurar a estabilidade da tensão. A correção é realizada mediante a retificação de uma tensão trifásica, que pode ser oriunda de diversas fontes, como a bobina auxiliar, a excitatriz auxiliar, TAPs na armadura da máquina principal ou diretamente da rede elétrica. Esta tensão é então direcionada ao enrolamento de campo por intermédio de um transistor de potência.

Incorporando circuitos de ajuste avançados e mecanismos de proteção, o AVR visa proporcionar um controle preciso e confiável sobre a operação do gerador, mitigando o risco de flutuações indesejáveis

na tensão de saída e na velocidade de operação da máquina. Dentre as proteções integradas, destacam-se as destinadas à prevenção de sobretensões, sub-tensões, sobrecargas e outras condições potencialmente danosas.

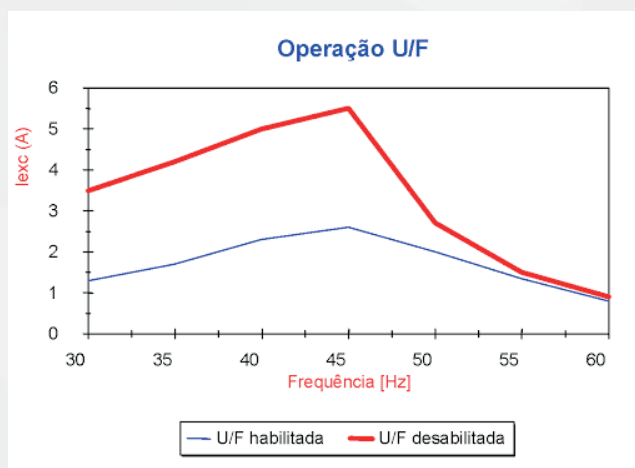
Os AVR's podem ser classificados em dois tipos principais: os reguladores estáticos e os excitatriz rotativa. Os primeiros empregam componentes eletrônicos sólidos, como transistores e diodos, para o controle da corrente de excitação, destacando-se por sua compactação, eficiência energética e facilidade de manutenção. Por outro lado, os reguladores do tipo excitatriz rotativa utilizam um gerador de excitação acoplado ao eixo da máquina síncrona, fornecendo robustez e confiabilidade, embora com maior complexidade e dimensões.

Ao selecionar um modelo, diversos fatores devem ser cuidadosamente analisados, incluindo a potência nominal da máquina síncrona, a precisão requerida na regulação de tensão, a velocidade de resposta do sistema frente a alterações de carga ou velocidade, e a confiabilidade e robustez do dispositivo em ambientes industriais. Ademais, a presença de interfaces de comunicação para monitoramento e controle remoto constitui um diferencial relevante, facilitando a operação e manutenção.

A implementação de um Regulador Automático de Tensão adequado é fundamental para assegurar a operação estável e eficiente de máquinas síncronas, contribuindo significativamente para a qualidade da energia fornecida e a proteção de equipamentos conectados à rede. A escolha de um AVR apropriado demanda uma análise detalhada das características específicas da aplicação e dos requisitos operacionais, considerando-se os aspectos técnicos mencionados.

3.26.4.1 Proteção contra subfrequência

Para iniciar a operação do gerador, é necessário ajustar a proteção contra sub-frequência para 90% da frequência nominal (configuração padrão de fábrica) ou manter o regulador de tensão desativado até que o grupo atinja a rotação nominal. Essa prática visa prevenir correntes excessivas nos enrolamentos de excitação do gerador.

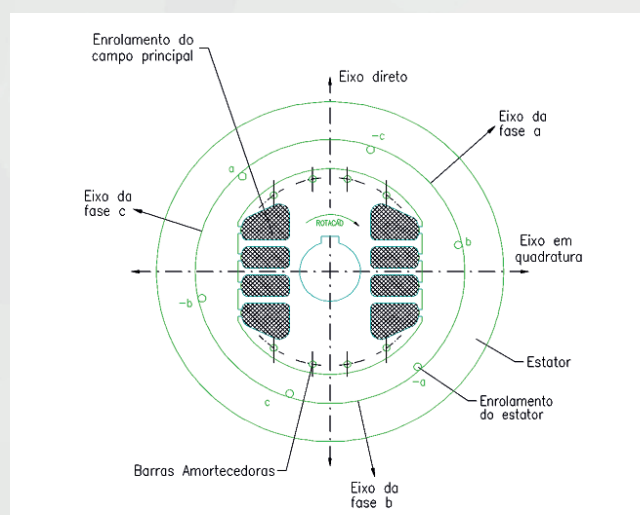


3.26.4.2 Potenciômetro de ajuste de valor teórico

Cada máquina tem a possibilidade de incorporar um potenciômetro para ajuste do valor teórico, o qual é opcional. Esse potenciômetro permite uma variação na regulação de tensão, geralmente da ordem de 15% em relação ao valor nominal. Essa amplitude é adequada mesmo durante a operação em paralelo com a rede de regulação de potência reativa. Para obter informações adicionais, recomenda-se a consulta ao Manual do Regulador de Tensão.

3.26.5 Reatâncias

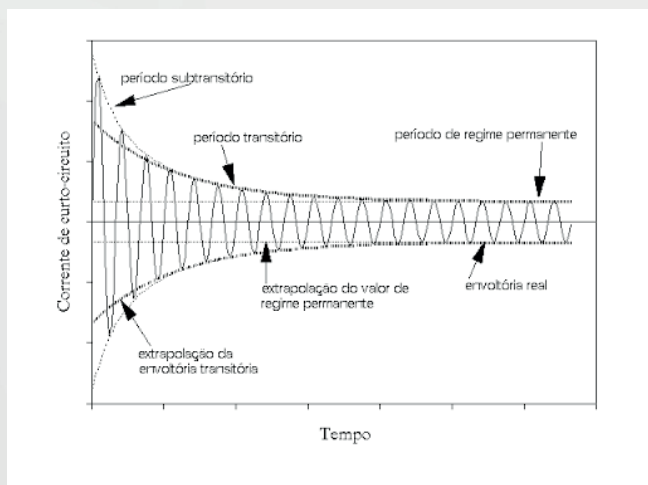
A análise do desempenho transitório de máquinas síncronas é simplificada por meio de uma transformação linear de variáveis. Nessa abordagem, as três correntes de fase do estator (i_a , i_b e i_c) são substituídas por três componentes: a componente de eixo direto (i_d), a componente de eixo em quadratura (i_q) e uma componente monofásica (i_o), conhecida como componente de sequência zero (eixo zero).



Na operação equilibrada em regime permanente, a componente i_o é nula e, portanto, não é discutida. As componentes de eixo direto e em quadratura possuem significado físico relevante: a máquina de polos salientes (veremos mais detalhes sobre esse modelo no tópico de características construtivas) apresenta uma direção preferencial de magnetização determinada pela saliência dos polos de campo. A permeância ao longo do eixo polar ou direto é consideravelmente maior do que ao longo do eixo interpolar ou quadratura.

3.26.5.1 Unidade do conhecimento das reatâncias

Um circuito rotor eficaz, no eixo direto, complementar ao enrolamento principal de campo, é constituído pelas barras amortecedoras. Ao considerarmos o funcionamento inicial da máquina em condição de vazio e a ocorrência súbita de um curto-circuito trifásico em seus terminais, a figura abaixo apresenta uma representação da onda de corrente de estator em curto-circuito, como observável por meio de um osciloscópio.



3.26.5.2 Reatância subtransitória (X_d'')

A reatância da máquina referente à corrente que flui na armadura durante os ciclos iniciais, conhecida como reatância transiente, pode ser determinada dividindo-se a tensão na armadura antes da ocorrência de uma falha pela corrente no início da falha. Esse cálculo é aplicável em cenários de carga

abrupta e à frequência nominal, conforme ilustrado na figura anterior do período subtransitário.

$$x_d'' = \frac{E}{I''}$$

Onde:

E = Valor eficaz da tensão fase-neutro nos terminais do gerador síncrono, antes do curto-circuito.

I'' = Valor eficaz da corrente de curto-circuito do período subtransitário em regime permanente. Seu valor é dado por:

$$I'' = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}$$

3.26.5.3 Reatância transitória (X_d')

É a magnitude associada à corrente que percorre a armadura após o período subtransitário de um curto-circuito, persistindo por um maior número de ciclos (período prolongado).

Seu cálculo envolve a divisão da tensão na armadura, registrada no início do período transitório, pela corrente correspondente, sob condições de carga similares.

$$x_d' = \frac{E}{I'}$$

Onde:

E = Valor eficaz da tensão fase-neutro nos terminais do gerador síncrono, antes do curto-circuito.

I' = Valor eficaz da corrente de curto-circuito do período transitório considerado em regime permanente. Seu valor é dado por:

3.26.5.4 Reatância síncrona (X_d)

A reatância de curto-circuito representa numericamente a oposição oferecida pela máquina elétrica à corrente em estado estacionário durante o evento de curto-circuito.

Em termos mais específicos, refere-se à reatância associada à corrente permanente que prevalece após a conclusão do período transitório do cur-

to-circuito. A obtenção desse valor é realizada pela divisão da tensão nos terminais da armadura no final do período transitório do curto pela corrente correspondente.

$$x_d = \frac{E}{I}$$

Onde:

E = Valor eficaz da tensão fase-neutro nos terminais do gerador síncrono, antes do curto-circuito.

I = Valor eficaz da corrente de curto-circuito em regime permanente. Seu valor é dado por:

$$I = \frac{I_m \text{ áx } RP}{\sqrt{2}}$$

A compreensão destas reatâncias é crucial devido ao impacto direto na corrente do estator (armadura) após a ocorrência de um curto-circuito nos terminais da máquina. A variação dessas reatâncias influenciará diretamente nos valores dessa corrente resultante. Logo, a análise dessas reatâncias possibilita uma avaliação precisa do desempenho da máquina diante de falhas, permitindo a antecipação das consequências resultantes.

É importante observar que o gerador síncrono se destaca como o único componente no sistema elétrico que exibe três reatâncias distintas. Os valores dessas reatâncias são definidos de acordo com uma inequação específica, o que adiciona complexidade ao entendimento e à análise do comportamento do gerador diante de situações de falha.

Onde:

$$\underline{X_d''} < \underline{X_d'} < \underline{X_d}$$

3.26.5.5 Conversão de reatâncias

É comum expressar as reatâncias de uma máquina em termos de valores por unidade (pu).

A magnitude de referência corresponde à reatância nominal.

$$X_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} \times I_n} \quad \Omega$$

$$X_n = 1,0 \text{ pu}$$

Onde:

X_n – reatância nominal do gerador.

U_n – tensão nominal do gerador.

I_n – corrente nominal do gerador.

Caso a máquina seja operada com uma frequência superior à nominal, em vez da frequência nominal, ou com tensão e potência distintas das especificadas, a reatância da máquina será alterada de acordo com a seguinte expressão técnica:

$$X^2 = X^1 \times \left(\frac{f^2}{f^1} \right) \times \left(\frac{S^2}{S^1} \right) \times \left(\frac{U^1}{U^2} \right)^2$$

Onde:

X² = reatância na base nova

X¹ = reatância na base velha

f² = frequência na base nova

f¹ = frequência na base velha

S² = potência na base nova

S¹ = potência na base velha

U¹ = tensão na base velha

U² = tensão na base nova

É imprescindível destacar que, no contexto dos geradores de catálogo padrão, somente modificações na frequência são permitidas, sendo restritas à transição de 50Hz para 60Hz. Alterações na tensão são viáveis apenas para valores inferiores, devendo ser proporcionais à frequência. No cenário de redução da tensão, é imperativo ajustar a potência de forma proporcionalmente equivalente.

3.26.6 Potência em máquinas de polos salientes (DFIG)

A potência de uma máquina síncrona é expressa por:

$$P = m \times U_f \times I_f \times \cos \Phi$$

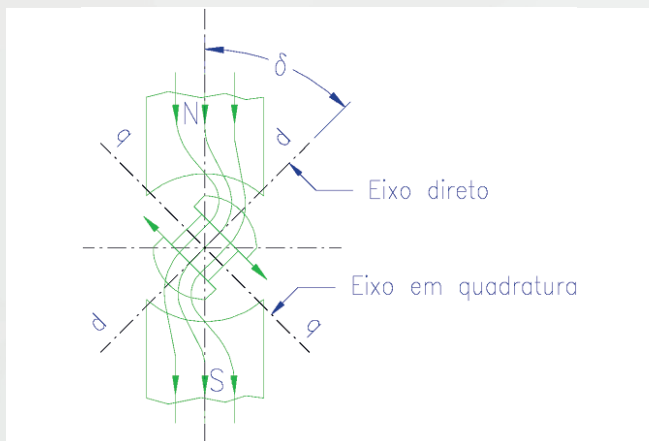
Onde:

m - Número de fases

U_f - Tensão de fase

I_f - Corrente de fase

A potência elétrica gerada em máquinas de polos salientes pode ser representada como uma função do ângulo de carga (δ), o qual é definido pelo deslocamento angular do rotor em relação ao fluxo girante do estator. Essa relação é expressa pela interação entre os fatores U_f (tensão de fase) e E_0 (força eletromotriz induzida), conforme ilustrado nas figuras subsequente.



Ângulo de carga (δ)

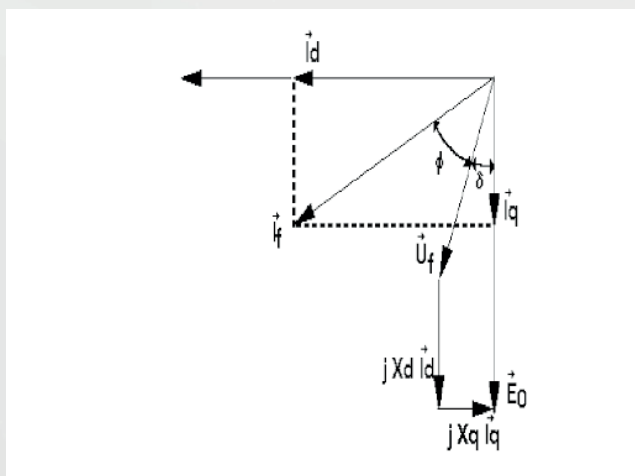


Diagrama de tensão

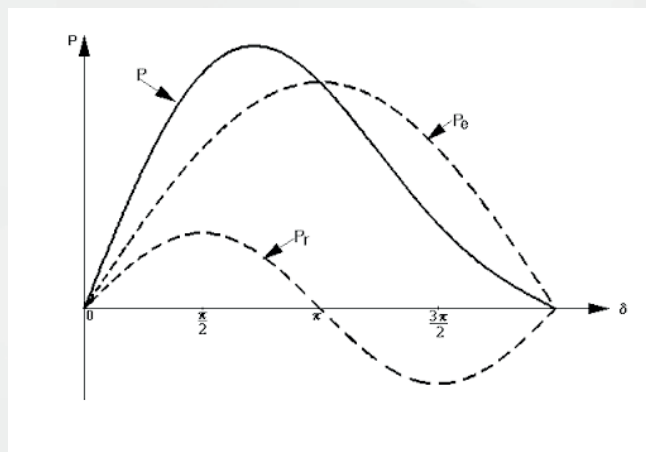
Onde:

x_d e x_q são as reatâncias de eixo direto e em quadratura, respectivamente:

$P = P_D + P_Q$

$P_d = U_f \cdot I_d \cdot \text{sen}\delta$

$P_q = U_f \cdot I_q \cdot \text{cos}\delta$



Curva de potência

A potência eletromagnética, que corresponde à quantidade de energia transferida do rotor para o estator em um gerador, pode ser formulada por meio da seguinte expressão:

$$P = \frac{m \cdot E_0 \cdot U_f}{x_d} \text{sen}\delta + \frac{m \cdot U_f^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \text{sen}2\delta$$

O termo inicial na expressão anterior representa a potência, sendo influenciado pela tensão terminal de fase (U_f) e pela excitação da máquina (E_0), conforme a curva de potência expressa na figura anterior.

$$P_e = \frac{m \cdot E_0 \cdot U_f}{x_d} \text{sen}\delta$$

O segundo termo na expressão é suplementar devido à discrepância na relutância do entreferro (x_q e x_d), a qual não é influenciada pela excitação da máquina, conforme a curva de potência expressa na figura anterior.

$$P_r = \frac{m \cdot U_f^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \text{sen}2\delta$$

3.26.7 Queda de tensão

Devido a certas definições técnicas empregadas neste contexto, a discussão sobre este aspecto não foi incluída no tópico sobre tensão anteriormente abordado. Agora, após a compreensão dos conceitos fundamentais, procederemos à análise detalhada deste tema.

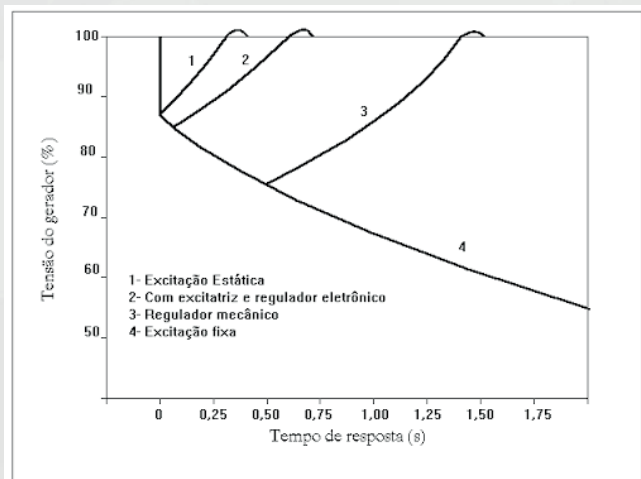
3.26.7.1 Cálculo da queda de tensão

Ao submeter o gerador a uma carga, ocorrerá uma súbita diminuição na tensão, a qual está condicionada à reatância do gerador, à corrente, ao fator de potência ($\cos\phi$) da carga e ao tipo de regulação. Os desafios mais significativos relacionados à queda e recuperação de tensão em um gerador são observados durante a partida de motores de indução.

Durante o processo de partida de motores de indução, o fator de potência é aproximadamente 0,3. Para simplificar o cálculo, consideraremos $\cos\phi$ igual a zero, além de negligenciarmos a impedância dos cabos de alimentação e a resistência interna do gerador.

Devido à flutuação da carga, a reatância do gerador apresenta variações temporais (X_d'' , X_d' e X_d , conforme as constantes de tempo intrínsecas da máquina), conforme discutido anteriormente no tópico de reatâncias.

Na representação gráfica subsequente, evidencia-se a flutuação da magnitude da tensão em relação ao tempo, com valores médios ilustrativos. As trajetórias apresentadas são sensíveis aos parâmetros do gerador, ao tempo de resposta da excitação e ao sistema de regulação.



O cálculo da queda de tensão adquire complexidade quando se incorpora a variação temporal da reatância. Para obter resultados mais precisos, é necessário considerar a reatância transitória (X_d') em máquinas equipadas com excitatriz e regulador eletrônico (sem escovas) e a reatância subtransitória (X_d'') em máquinas com excitação estática (com escovas). A equação que descreve a queda de tensão é expressa da seguinte forma:

$$\Delta U = \frac{X_A}{X_A + X_m}$$

$$\Delta U\% = \frac{X^* d}{1 + X^* d} \cdot 100$$

Onde:

X_A = Reatância do gerador
 X_m = Reatância do motor
 X_A e X_m em pu (por unidade)

De maneira geral, para qualquer valor de reatância do gerador e relação I_p/I_n (corrente de partida do motor / corrente nominal do gerador), a seguinte relação é válida:

$$\Delta U\% = \frac{[X^* d \cdot (I_p/I_n)]}{1 + [X^* d \cdot (I_p/I_n)]} \cdot 100$$

Onde:

X^*d - X_d' (em pu) em máquinas com excitatriz e regulador eletrônico de tensão (geradores brushless).

X^*d - X_d'' (em pu) em máquinas com excitatriz estática (geradores com escovas).

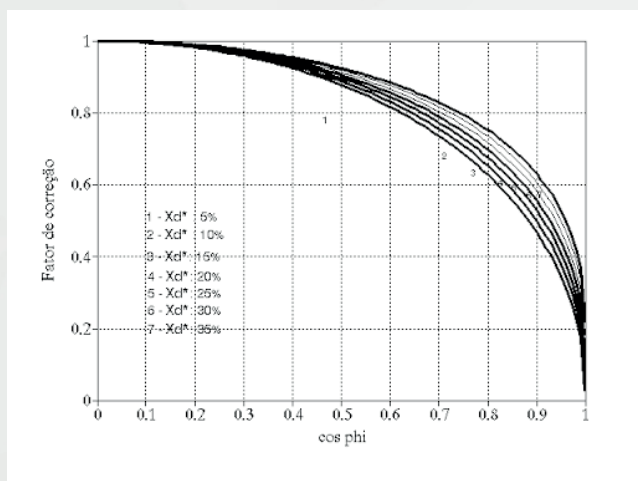
I_p - corrente de partida do motor (em am-pères).

I_n - corrente nominal do gerador (em am-pères).

O gráfico temporal de variação da tensão anteriormente visto, representa a magnitude da Queda de Tensão (ΔU) em relação à variável X^*d e à razão I_p/I_n , considerando um fator de potência ($\cos\phi$) igual a zero.

3.26.7.2 Influência do fator de potência

Caso seja necessário calcular a queda de tensão para valores de fator de potência ($\cos\phi$) distintos de zero, é imperativo empregar o gráfico subsequente. No referido gráfico, é possível identificar o coeficiente de correção "x" (em relação ao $\cos\phi$ e à reatância do gerador), o qual deve ser multiplicado pela queda de tensão (ΔU) para $\cos\phi = 0$.



Ou seja,

$$\Delta U (\cos\phi \text{ qualquer}) = x \cdot \Delta U (\cos\phi = 0).$$

A diminuição da queda de tensão, conforme evidenciado no gráfico, será observada concomitantemente ao aumento do fator de potência.

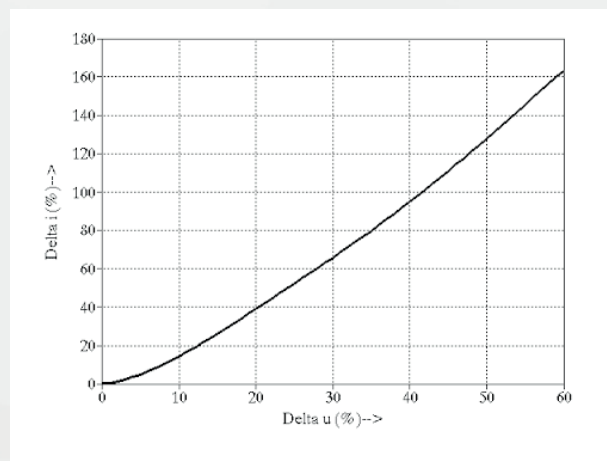
3.26.7.3 Influência da carga inicial

As cargas iniciais em geradores podem ser categorizadas em três tipos distintos:

- I. Impedância Constante
- II. kVA Constante
- III. Corrente Constante

Em uma carga caracterizada como impedância constante, a corrente do gerador diminuirá proporcionalmente à sua tensão quando submetido a essa carga. Isso resulta em uma redução da queda de tensão, e tal efeito pode ser negligenciado para fins de cálculo. Exemplos de cargas com impedância constante incluem lâmpadas incandescentes, aquecedores resistivos e resistores.

Em contraste, cargas do tipo kVA constante, quando operando em regime, apresentam um aumento da corrente com a diminuição da tensão, causando, conseqüentemente, um aumento na queda de tensão. Motores de indução são um exemplo típico dessa categoria de carga, e a variação da corrente (Δi) em motores de indução em regime, em relação à tensão em seus terminais, pode ser obtida na curva representada no gráfico abaixo.



Quando um gerador fornece energia a um motor de indução que está iniciando, enquanto outro motor já está conectado aos terminais do gerador em regime, a variação de corrente no motor em regime deve ser adicionada à corrente de partida do motor que está iniciando. Apesar das diferenças nos fatores de potência, eles são considerados iguais de maneira conservadora.

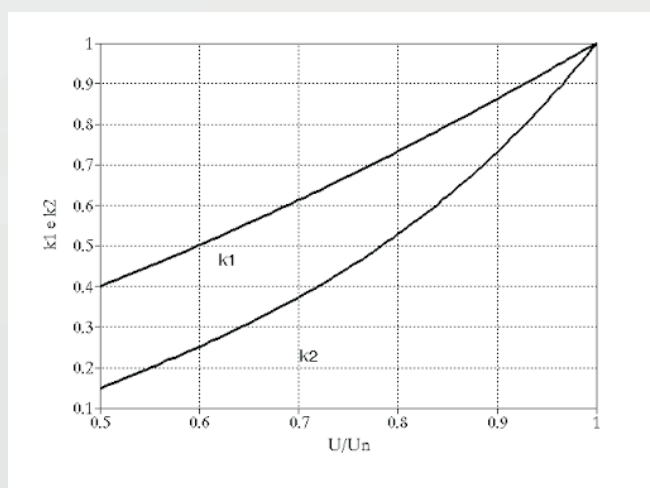
A combinação de cargas do tipo kVA constante e impedância constante resulta em cargas do tipo corrente constante, uma vez que seus efeitos individuais são opostos, com uma tendência à anulação mútua. Dependendo dos valores individuais dessas cargas, a queda de tensão pode não causar variações significativas na corrente, e em alguns casos, pode até não haver queda de tensão.

3.26.7.4 Limitações na partida

Consideramos como limite da corrente durante a partida de um motor de indução o valor de até 2,5 vezes a corrente nominal do gerador. Acima desse valor, a queda de tensão residual aumenta significativamente, e o tempo de permanência (limite térmico) é reduzido, podendo ser inferior ao tempo de partida do motor. Em situações específicas, quando a corrente atinge 2,0 vezes a corrente nominal, o tempo de sobrecarga é de 20 a 30 segundos.

Para mitigar a corrente de partida de motores de indução, são comumente empregados dispositivos como partida estrela-triângulo ou chave compensadora. A variação da corrente de partida em relação à tensão de partida é apresentada no gráfico no próximo tópico "sobrecarga" (constante K1), sendo necessário considerar essa redução na corrente ao calcular a queda de tensão.

Outro aspecto relevante é a potência da máquina acionadora, geralmente dimensionada com um fator de potência $\cos\phi = 0,8$, onde a potência útil (kW) é igual a 0,8 vezes a potência aparente (kVA). A queda de tensão resultante na partida dos motores pode inviabilizar o acionamento da carga. As curvas do gráfico a seguir mostram a redução do conjugado (torque) no motor em função da queda de tensão (constante K2). É fundamental analisar o tipo de carga a ser acionada para determinar o valor mínimo de conjugado e, conseqüentemente, o limite da queda de tensão.



No caso do uso de geradores em paralelo, a reatância total deve ser calculada conforme a expressão:

$$\frac{I_T}{X_{dT}^*} = \frac{I_{G1}}{X_{d1}^*} + \frac{I_{G2}}{X_{d2}^*} + \dots + \frac{I_{Gn}}{X_{dn}^*}$$

Onde:

X_{dT}* - reatância total (X_d' ou X_d'', conforme o caso).

X_{d1}*...n - reatância de cada gerador ligado em paralelo.

I_T - corrente total dos geradores em paralelo.

I_{G1}...n - Corrente nominal de cada gerador ligado em paralelo.

Se dois geradores idênticos forem conectados em paralelo, a reatância total será equivalente à soma das reatâncias individuais dos geradores.

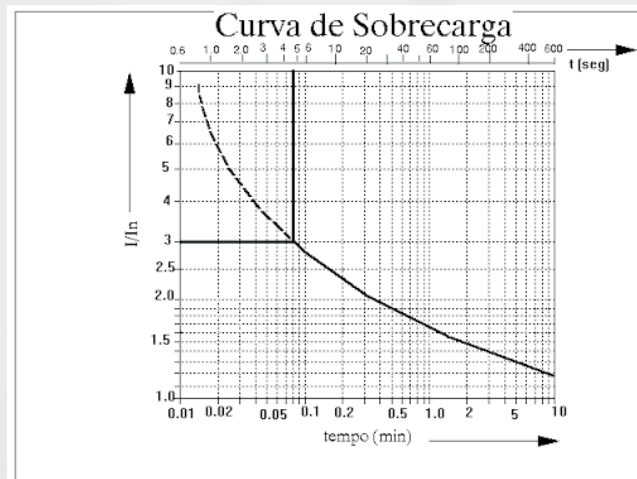
3.27 Sobrecarga

Conforme as diretrizes estabelecidas pelas normas VDE 530 ou ABNT, é requisitado que os geradores síncronos forneçam uma corrente equivalente a 1,5 vezes a nominal por um período de 15 segundos. Durante esse intervalo, é essencial manter a regulação de tensão próxima ao valor nominal por meio de ajustes apropriados.

Para aplicação em embarcações, os geradores devem ser capazes de fornecer uma corrente 1,5 vezes superior à nominal por um período de 2 minutos.

No contexto de geradores industriais, a sobrecarga admissível é estabelecida em 1,1 vezes a corrente nominal, mantida ao longo de 1 hora.

A sobrecarga momentânea em relação à corrente, aplicável a máquinas padrões, valores apenas orientativos, é apresentada no gráfico a seguir.



3.28 Sobrevelocidade

As máquinas síncronas, conforme estipulado pela norma NBR 5052, são projetadas para suportar de 1,2 vezes a velocidade nominal por um período de 2 minutos. É importante observar que, nessa situação, a máquina pode estar ou não em estado excitado.

3.29 Corrente de curto-circuito

Sempre que houver uma interligação entre dois pontos caracterizados por potenciais distintos e resistência reduzida, ocorrerá um curto-circuito. De maneira geral, esse incidente tende a ser prejudicial ao funcionamento do circuito elétrico.

As correntes de curto-circuito em geradores podem ser determinadas mediante a consideração das reatâncias, com seus respectivos valores expressos em porcentagem.

A corrente de curto-circuito trifásico máxima pode ser obtida por meio da seguinte expressão:

$$I_{cc\ Max} = \frac{2,55 \times I_f}{X_d''} \times 100 \quad (A)$$

Onde:

X_d'' em %

I_f – corrente de fase

A corrente de curto-circuito eficaz em uma fase pode ser expressa pela seguinte formulação técnica:

$$I_{ceff} = \frac{I_f}{X_d''} \times 100 \quad (A)$$

Os fabricantes buscam disponibilizar máquinas personalizadas para cada aplicação, considerando as variáveis de cada circuito.

3.30 Características construtivas

3.30.1 Introdução

A existência de uma ampla variedade de modelos de motores e geradores elétricos reflete a diversidade no campo da engenharia elétrica. Essa diversificação abrange características como potência, eficiência, tamanho, e funcionalidades específicas, permitindo a adaptação desses dispositivos a uma ampla gama de aplicações industriais, comerciais e residenciais. A constante inovação e o avanço tecnológico contribuem para o contínuo desenvolvimento de modelos mais eficientes, sustentáveis e especializados, atendendo às demandas específicas de diferentes setores.



3.30.2 Nomenclatura de motores

O modelo descrito na placa de identificação principal é a representação de códigos. Normalmente associados a linha de produção denominada, tipo de rotor, tipo de sistema de refrigeração, dimensão da carcaça (altura de eixo) e ao tipo de furação dos pés para fixação na base de operação.

WEG		HGF		04MAR13 1018823	
~ 3	kW(HP-cv)	480(650)	CARC. FRAME	400L/A/B	
MOTOR INDUÇAO - GAIOLA		FS	1.00	Hz	60
INDUCT. MOTOR-SQUIRREL CAGE		SF			
V	690	A	510		
RPM	893	I _a /N	6.6	F.P.	0.82
REG	S1	REN(%)	96.1	NOM.EFF.	AMB. 40°C
DUTY					
ISOL	IPW55	Δt	80 K	CAT	N
INSL				I.F.S.	S.F.A.
		Alt	1000	m.a.n.m.	3691 kg
				m.o.s.l.	

3.30.3 Normas aplicáveis

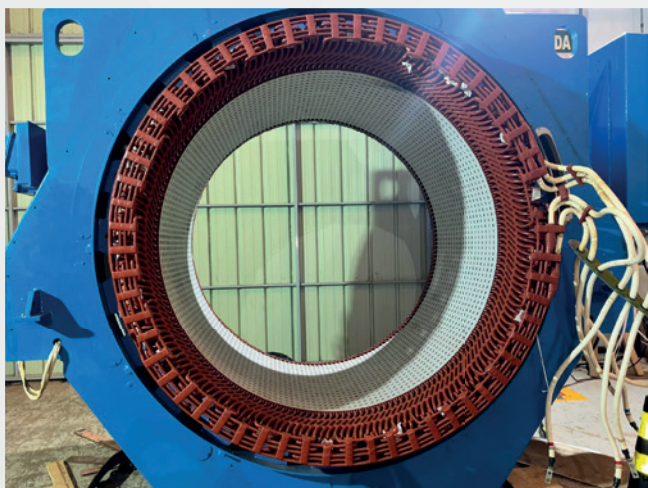
As máquinas síncronas são concebidas, produzidas e submetidas a testes em conformidade com as normas estabelecidas pela ABNT, IEC e DIN, quando aplicáveis, obrigatoriamente seguidas pelos fabricantes. Dentre as normas específicas, destacam-se:

- VDE 0530 - Máquinas Elétricas Girantes (Especificação e Características de Ensaio);
- NBR 5117 - Máquinas Síncronas (Especificação);
- NBR 5052 - Máquinas Síncronas (Método de Ensaio).

3.30.4 Componentes principais de geradores

O gerador integral pode ser decomposto em diversas unidades funcionais, sendo as principais delineadas a seguir.

3.30.4.1 Estator da máquina principal



As estruturas das máquinas, dependendo do modelo, são confeccionadas por meio de chapas de aço calandradas, adotando um formato tubular. As carcaças são produzidas mediante o uso de chapas de aço soldadas por meio de solda do tipo "MIG". A totalidade da estrutura da carcaça é submetida a um processo de normalização, visando aliviar as tensões originadas durante o procedimento de soldagem.

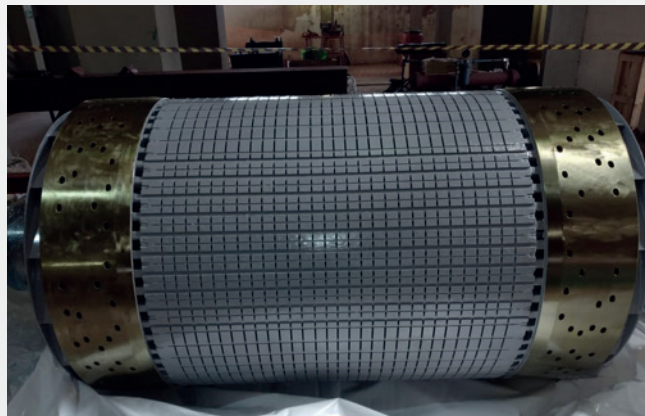
O conjunto de chapas do estator, também conhecido como núcleo do estator, juntamente com seu respectivo enrolamento, é posicionado sobre as nervuras da carcaça ou é prensado na carcaça. Nas máquinas de baixa tensão, são empregados fios circulares, enquanto nas de média tensão são utilizados fios retangulares.

A classe de isolamento padrão adotado para essas máquinas é a F ou H, dependendo do modelo específico. As bobinas são fixadas nas ranhuras por meio de cunhas de fechamento, frequentemente compostas de material isolante. As cabeças dos enrolamentos são fortalecidas para resistir a vibrações.

Nas máquinas de baixa tensão, o processo de impregnação é realizado por gotejamento ou por imersão. Para as máquinas de alta tensão, a impregnação é realizada por meio do sistema VPI (Vacuum

Pressure Impregnation), no caso de máquinas do fabricante WEG, por exemplo.

3.30.4.2 Rotor da máquina principal



O rotor aloja o enrolamento de campo, cujos polos são constituídos por conjuntos de chapas. Adicionalmente, uma gaiola de amortecimento é instalada no rotor para proporcionar compensação durante operações em paralelo e variações de carga.

3.30.4.3 Estator da excitatriz principal



A excitatriz principal é um gerador trifásico de polos salientes, podendo ser instalado de maneira fixa na tampa traseira do gerador e dentro deste último, ou posicionada externamente à máquina e fixada na tampa traseira ou na base do gerador, dependendo da sua configuração construtiva.

Os polos salientes são projetados para acomodar as bobinas de campo, as quais são conec-

tadas em série. A conexão da extremidade dessas bobinas é normalmente feita através de bornes localizados na caixa de ligação da excitatriz.

3.30.4.4 Rotor da excitatriz principal e diodos retificadores girantes



O rotor da excitatriz principal é instalado axialmente no eixo da máquina principal. Este rotor é constituído por lâminas, apresentando ranhuras que abrigam um enrolamento trifásico conectado em configuração estrela.

O ponto de conexão comum desta configuração estrela é inacessível. A partir de cada ponto de conexão estrela, dois condutores se estendem em direção aos retificadores rotativos, que são fixados nos suportes dissipadores. De ambos os condutores, um está conectado ao retificador localizado no suporte positivo, enquanto o segundo está ligado ao mesmo retificador, porém no suporte negativo.

3.30.4.5 Excitatriz auxiliar



O dispositivo denominado excitatriz auxiliar ou PMG (Gerador de Ímãs Permanentes) refere-se a um gerador de corrente trifásica cujo rotor é com-

posto por ímãs, os quais desempenham o papel de polos de excitação. Este rotor encontra-se acoplado ao eixo da máquina principal. O estator, composto por chapas, apresenta um enrolamento trifásico destinado a fornecer energia ao regulador de tensão.

A inclusão da excitatriz auxiliar é oferecida como uma opção, mediante solicitação.

3.30.4.6 Enrolamento auxiliar (ou bobina auxiliar)

O padrão presente em alguns modelos exclusivos refere-se a um conjunto de bobinas auxiliares monofásicas, que se encontra posicionado em determinadas ranhuras do estator principal da máquina. Estas bobinas coexistem com as bobinas de armadura, porém são completamente isoladas das mesmas.

A principal finalidade consiste em prover potência ao regulador de tensão para alimentar o campo da excitatriz principal. Esta potência é submetida a um processo de retificação e controle pelo regulador de tensão.

3.30.5 Componentes principais de motores

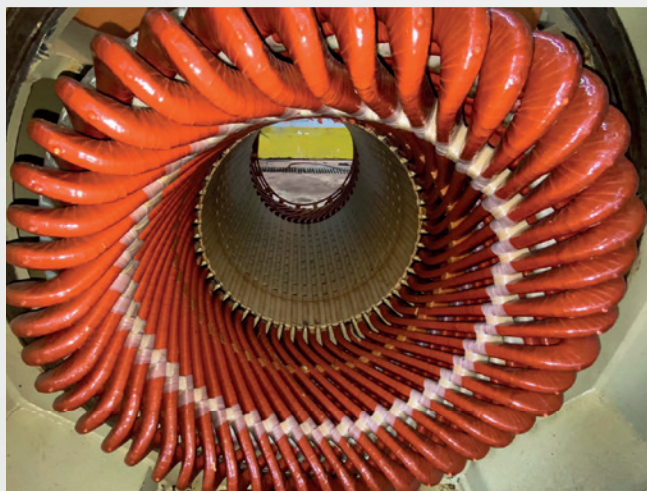
Todos os motores elétricos compartilham diversos elementos construtivos, com cada tipo de motor apresentando elementos específicos distintivos. Entre os componentes comuns a todos os motores incluem-se partes estruturais como carcaça, estator, tampas, mancais, rotor, guias de ar, ventiladores internos e externos, trocador de calor, caixas de ligação principal e acessórias, flange, acessórios de proteção, entre outros.

Os materiais utilizados para a carcaça, caixas de ligação e de acessórios, flanges e ventiladores podem ser de ferro fundido ou chapa de aço. Guias de ar, trocadores de calor e tampas defletoras são comumente fabricados com chapa de aço, alumínio ou fibra de vidro.

Apesar das partes ativas, como pacotes de chapas do estator, do rotor e enrolamentos, apresentarem similaridades substanciais entre os diversos tipos de motores, diferenças significativas no número, arranjo e construção dos enrolamentos, bem como nos núcleos ferromagnéticos, resultam em características de funcionamento distintas.

3.30.5.1 Carcaça/Estator

A principal finalidade da estrutura em questão consiste em prover apoio e salvaguardar o motor, ao mesmo tempo em que abriga o conjunto composto por chapas e enrolamento do estator. Essas estruturas podem ser configuradas nos formatos horizontal ou vertical, adaptando-se ao grau de proteção requerido pelas condições ambientais. Quanto à sua produção, pode ser realizada mediante a utilização de chapas de aço 1010/20, empregando-se a técnica de construção soldada, ou por meio de ferro fundido.



O núcleo do estator é composto por lâminas magnéticas de baixa perda específica (W/kg), também conhecidas como aço-silício. Essas lâminas podem apresentar revestimento do tipo C4 ou revestimentos especiais em C5.

Fazendo parte do estator, temos o componente principal: enrolamento trifásico. Consiste em três conjuntos idênticos de bobinas, cada um destinado a uma fase específica, integrando-se para constituir um sistema trifásico interconectado à rede trifásica de alimentação.

3.30.5.2 Rotor

Sobre a forma construtiva do rotor, vamos abordar com detalhes os rotores tipo gaiola e bobinado (também chamado de rotor de anéis).

3.30.5.2.1 Rotor de gaiola

Vamos citar esse tipo de rotor abordando separadamente os rotores injetados e de barras.



a) Rotor Injetado

São rotores confeccionados mediante o processo de injeção de alumínio em configuração de gaiola, produzidos sob condições controladas de temperatura e pressão. Esses rotores são elaborados com o intuito de oferecer as seguintes características:

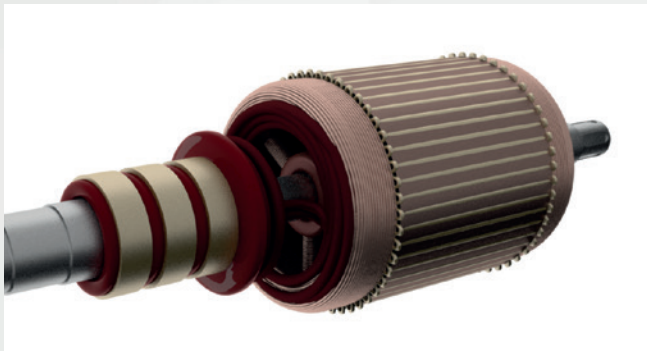
- Elevados torques de partida acompanhados de correntes reduzidas, proporcionados pela facilidade na construção de ranhuras que emulam a configuração de dupla gaiola;
- Notável rigidez mecânica;
- Capacidade para iniciar cargas com considerável momento de inércia;
- Resistência a elevações substanciais de temperatura durante o processo de partida;
- Custo inferior em comparação com os rotores fabricados com barras de cobre.

b) Rotor de Barras

O núcleo do rotor é constituído por lâminas de aço silício e apresenta canais axiais em todas as máquinas. A parte ativa, ou condutores, pode ser composta por barras de cobre ou latão. É dedicada especial atenção à prevenção de fadiga nas barras, decorrente das vibrações. Após a inserção das barras nas ranhuras, procede-se à soldagem do anel de curto-circuito por meio de solda de prata, assegurando uma conexão elétrica perfeita entre ambas as partes.

Adicionalmente, os rotores de barras podem apresentar uma variedade de formatos, com variações nas dimensões do perfil da barra. Essa diversidade de combinações proporciona um amplo controle dos parâmetros elétricos do motor, tais como torque máximo, torque de partida, eficiência, fator de potência e corrente de partida, entre outros.

3.30.5.2 Rotor bobinado (de anéis)



As bobinas são fabricadas utilizando barras de cobre nu. Cada espira da bobina é composta por duas partes, as quais são soldadas entre si na extremidade da bobina. O isolamento das bobinas é comumente realizado através do revestimento com fitas à base de mica no "estágio B" (catalisadas), seguindo o mesmo processo aplicado ao estator.

As bobinas são rigidamente fixadas nas ranhuras por meio de cunhas. Os anéis coletores são normalmente fabricados em aço inoxidável (padrão), embora também possam ser fornecidos em bronze ou latão, dependendo da aplicação e local de instalação.

O rotor é curto-circuitado através do conjunto dos anéis coletores e escovas, que proporcionam acesso ao enrolamento do rotor. Estes são projetados para suportar a corrente máxima de operação necessária e dissipar o calor gerado pela corrente elétrica e pelo contato entre as escovas e os anéis.

Através das escovas e do coletor, é possível conectar uma resistência trifásica em série com os enrolamentos do rotor, variando assim a impedância do secundário do motor. A utilização de um reostato em série com o rotor permite regular a corrente e o conjugado de partida, ou, em condições de regime, variar a rotação de trabalho através da variação do escorregamento.

a) Porta-Escovas Fixo

No sistema de porta-escovas do tipo fixo, as escovas mantêm contato constante com o coletor, sendo exercida pressão por molas de tipo constante. Neste arranjo, a vida útil das escovas é limitada devido ao contato ininterrupto com os anéis coletores. Diversos fatores desempenham um papel crucial na

determinação da durabilidade das escovas, incluindo o percentual de carga operacional do motor, a tipologia ou qualidade das escovas, o ambiente de instalação, entre outros.



Para essa configuração específica, todo o conjunto composto pelo coletor, escovas e porta-escovas é projetado e dimensionado para resistir às condições de partida e operação contínua.

b) Porta-Escovas Levantável



As propriedades mecânicas assemelham-se às do porta-escovas de tipo fixo, porém, neste caso, o levantamento das escovas é executado por um dispositivo motorizado ou manual. Este dispositivo possibilita o levantamento das escovas e a realização de curto-circuito nos anéis, por meio de controle remoto e/ou local. O sistema de levantamento motorizado de escovas apresenta vantagens significativas para o desempenho ao longo do tempo do motor de anéis:

1. Previne o uso constante e prematuro das escovas e anéis coletores.

2. Reduz consideravelmente as paradas para manutenção e substituição das escovas.
3. Impede o acúmulo de poeira no interior do compartimento do porta-escovas, mantendo os níveis de isolamento do rotor o mais elevado possível.
4. Prolonga a vida útil das escovas, do porta-escovas e, conseqüentemente, do motor.

Vamos detalhar a seqüência de operação do dispositivo de levantamento de escovas a seguir.

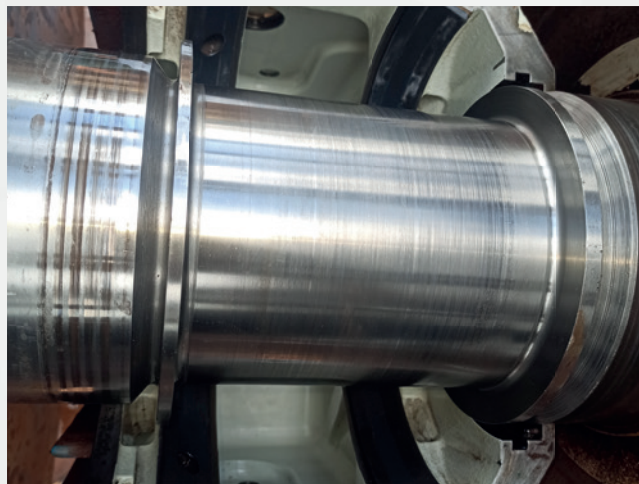
O motor é acionado e, por meio de um redutor, movimenta um anel que coloca as três fases em curto-circuito. Somente após essa operação, todas as escovas são levantadas ou afastadas em relação ao coletor. Para abaixar as escovas e restabelecer o contato do reostato com o rotor, a seqüência de operação é a inversa à anterior citada.

A operação de um motor com rotor bobinado curto-circuitado assemelha-se à de um motor com rotor de gaiola. A manutenção é substancialmente reduzida, uma vez que não há desgaste das escovas. Para essa configuração, o conjunto, coletor, escovas e porta-escovas são dimensionados para suportar as condições de partida. Um motor equipado com um dispositivo motorizado de levantamento de escovas não deve operar continuamente com as escovas baixadas, a menos que essa condição tenha sido especificada inicialmente durante a construção. Recomenda-se o uso desse dispositivo quando a aplicação exige aproximadamente duas (02) partidas por dia.

3.30.5.3 Eixo do rotor

Os eixos são projetados para resistir aos esforços mecânicos em diversas aplicações. A escolha dos materiais varia de acordo com o tipo de acoplamento, sendo possíveis opções como AISI 1040/45, AISI 1524, AISI 4140 ou materiais superiores. Essa seleção é fundamentada nos esforços radiais aplicados na extremidade do eixo ou em condições ambientais adversas, como elevadas temperaturas.

Os eixos são submetidos a um tratamento térmico com o propósito de aliviar as tensões internas, prevenir deformações e incrementar a resistência à fadiga decorrente dos esforços de torção e flexão.



Existem diferentes tipos de eixos:

1. Oco: Empregado em motores verticais com significativa carga axial, onde o peso da carga é suportado pelo motor, sendo o acoplamento realizado diretamente no motor.
2. Maciço: Utilizado em motores nos quais o diâmetro do rotor é pequeno em comparação com o diâmetro da ponta do eixo requerido para a aplicação.
3. Costelado: Aplicado em motores nos quais o diâmetro do rotor é consideravelmente maior em relação ao diâmetro da ponta do eixo necessário para a aplicação.

3.30.6 Bobinagem

O sistema de isolamento adotados pelos fabricantes, fundamenta-se no processo denominado "Global Vacuum Pressure Impregnation (GVPI)", desenvolvido em colaboração com proeminentes fornecedores de materiais isolantes em âmbito internacional. O GVPI, ao longo de vários anos, tem demonstrado sua eficácia e confiabilidade em máquinas elétricas rotativas, abrangendo diversas aplicações. O referido sistema de isolamento é aplicável a máquinas operando em baixa, média e alta tensões, que empregam bobinas pré-formadas com faixa de tensão entre 380 e 15.000V.

As bobinas são fabricadas com fios de cobre retangulares, os quais apresentam quatro diferentes tipos de isolamento, conforme a finalidade específica:

1. Fios de cobre esmaltados;

2. Fios de cobre esmaltados revestidos com uma ou duas camadas de filamentos de vidro;
3. Fios de cobre nu revestidos com fita à base de mica;
4. Fios de cobre esmaltados revestidos com fita à base de mica.



Após o processo de expansão das bobinas, estas são encapsuladas com uma fita porosa à base de mica. A espessura do isolamento é determinada de acordo com a tensão nominal da máquina, assegurando a rigidez dielétrica necessária. A aplicação da fita é cuidadosamente ajustada para garantir a compactação ideal do isolamento sobre as bobinas.

A prevenção do '**efeito corona**' é assegurada mediante o uso de duas fitas distintas. A fita condutora tem o propósito de evitar descargas na ranhura do estator em máquinas com tensão nominal acima de 5kV. Esta fita é composta por um falso tecido de poliéster ou tecido de vidro, dependendo da classe térmica, impregnado com verniz especial contendo partículas condutoras à base de carbono, garantindo a resistividade superficial necessária para prevenir descargas decorrentes do **efeito corona**.

Por outro lado, a fita semicondutora é aplicada em máquinas com tensão nominal superior a 6000V. Composta por falso tecido de poliéster e uma resina especial em estágio B, contém partículas de carbeto de silício que conferem as propriedades necessárias para equalização do potencial no término do pacote do estator. Essa fita desempenha um papel crucial na mitigação do gradiente de potencial e, assim, contribui para a proteção eficaz contra o **efeito corona**.

Após o isolamento de todas as bobinas, estas são inseridas no conjunto do estator, e as ranhuras são seladas com cunhas, que podem ser magnéticas ou não, dependendo da aplicação. A fixação dessas cunhas é assegurada pelo canal em formato de rabo

de andorinha na ranhura e pelo uso de um laminado expansível composto por manta de vidro.

A amarração das extremidades das bobinas é realizada utilizando materiais altamente absorventes, proporcionando a rigidez mecânica necessária para que as cabeças das bobinas possam resistir às condições de operação mais rigorosas.

Após a instalação das bobinas no estator, o fechamento das ranhuras, as conexões e a fixação das cabeças das bobinas, o estator bobinado é submetido a um processo de impregnação sob vácuo e pressão. Este procedimento utiliza uma resina epóxi classe H, livre de solventes, a fim de conferir ao sistema de isolamento características elétricas, mecânicas e de resistência às intempéries de alta qualidade.

As resinas epóxi são escolhas preferenciais para processos de impregnação devido à sua capacidade de oferecer excelente resistência às condições ambientais adversas frequentemente encontradas em ambientes onde máquinas elétricas rotativas são operadas. Além disso, por serem formuladas como resinas 100% sólidas, ou seja, sem solventes em sua composição, elas asseguram uma impregnação mais homogênea e minimizam a formação de bolhas de ar no isolamento durante o processo de polimerização e cura final.

Vamos abordar a seguir, os danos mais comuns causados aos enrolamentos.

3.30.6.1 Curto entre espiras

O curto-circuito entre espiras pode ocorrer devido à coincidência de dois pontos defeituosos na isolação dos condutores. Nas três fases, podem ocorrer correntes desiguais, e a disparidade dependerá da extensão do dano.

A magnitude do dano pode ser tão reduzida que a proteção correspondente não será acionada.

3.30.6.2 Uma fase queimada

Essa deterioração ocorre durante a operação do motor, por exemplo, em configuração de conexão em triângulo, caracterizada pela ausência de corrente em uma das fases. A corrente resultante eleva-se em uma proporção de 2 a 2,5 vezes no enrolamento não afetado, simultaneamente à notável redução na velocidade de rotação.

disparidade de tensão de 1% pode induzir um desequilíbrio de corrente entre 6% e 10%.

3.30.6.3 Duas fases queimadas

Este defeito manifestar-se-á na ausência de corrente em um condutor da rede quando o enrolamento estiver conectado em configuração estrela. Durante tal ocorrência, uma das fases apresentará uma corrente (I) igual a zero, ao passo que as outras duas fases absorverão a totalidade da potência, resultando no aumento das suas correntes absorvidas.

3.30.6.4 Três fases queimadas

O sistema de proteção do motor contra sobrecarga é exclusivamente composto por fusíveis. Como resultado, observa-se a carbonização gradual dos condutores e do isolamento, resultando em um curto-circuito entre as espiras ou um curto-circuito em relação à massa.

Exemplificando: quando a ligação do motor está incorreta, onde um motor com tensão nominal de 220/380 V é conectado à rede elétrica de 380 V utilizando a configuração estrela-triângulo, a corrente absorvida atinge níveis tão elevados que resultam na queima do enrolamento em questão de poucos segundos.

3.30.6.5 Curto entre fases

Trata-se de uma anomalia originada por uma inadequação na integridade do isolamento entre as cabeças das bobinas pertencentes a fases distintas.

3.30.6.6 Curto contra massa dentro da ranhura

Esse dano pode ter origem em um curto-circuito entre as espiras ou, alternativamente, devido a uma deficiência na isolação em relação ao potencial de terra (massa).

3.30.6.7 Fase danificada por desbalanceamento da tensão de rede

A queima do isolamento de uma fase pode ser atribuída a disparidades na tensão de rede. Uma

3.30.6.8 Queima por rotor bloqueado

A completa degradação do material isolante em todas as fases do motor indica uma corrente circulante de magnitude significativamente elevada. Essa ocorrência pode ser atribuída ao rotor bloqueado ou a repetidas instâncias de acionamento e inversão.

3.30.6.9 Queima por pico de tensão

Anomalias no isolamento, neste caso, resultam de fenômenos de sobretensão, frequentemente desencadeados durante a comutação de circuitos de potência, incidências de raios, descargas de capacitores e eventos relacionados a dispositivos semicondutores de potência.

3.30.6.10 Curto contra massa na saída da ranhura

A ocorrência em questão pode ser atribuída a uma inadequação no isolamento na saída da ranhura. É imperativo observar com diligência o processo de alocação das cabeças das bobinas, a fim de evitar a ruptura do material isolante.

3.30.7 Sistemas de refrigeração

As perdas intrínsecas em máquinas elétricas rotativas são inevitáveis, e o calor resultante deve ser eficientemente dissipado, ou seja, transferido para o sistema de resfriamento da máquina.

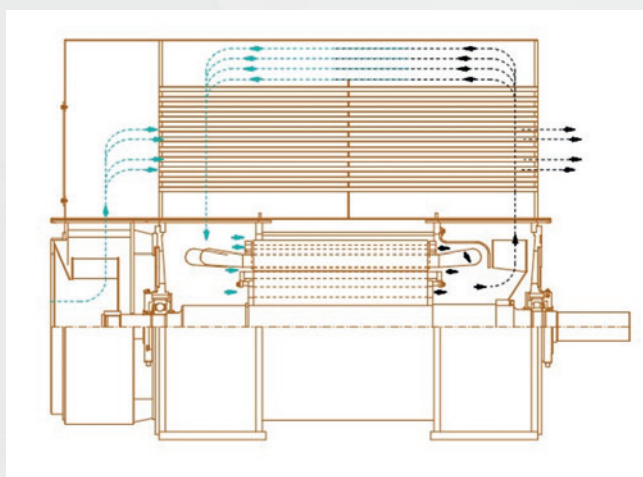
No contexto de motores elétricos, existem fundamentalmente dois tipos de circuitos de refrigeração: os circuitos abertos e os circuitos fechados.

O circuito aberto é caracterizado pela passagem do meio refrigerante (ar ou líquido) proveniente do ambiente externo ou de um recinto não contaminado sobre o motor, retornando então para o ambiente externo ou recinto não contaminado.

Por outro lado, comumente utilizado em geradores elétricos, o circuito fechado se destaca pela circulação controlada do meio refrigerante (ar ou líquido) em um circuito fechado, seja dentro da máquina ou através de um trocador de calor. Nesse caso, o calor é transferido da máquina para o meio refrigerante de forma contínua.

Os sistemas convencionais de refrigeração são elucidados a seguir.

3.30.7.1 Ventilação Axial



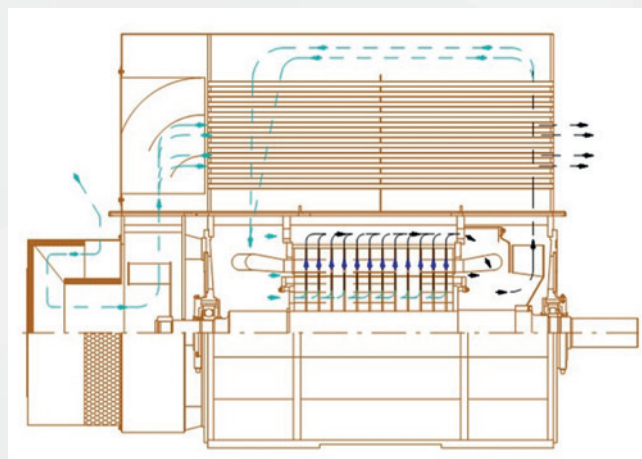
Dispositivo completamente encapsulado, dotado de sistema de refrigeração mediante um ventilador, e provido de carcaça com aletas, tanto externa quanto internamente. Apresenta classificação de proteção de IP55 ou superior. Incorpora um ventilador interno e canais axiais integrados no pacote de chapas do rotor e da carcaça.

3.30.7.2 Ventilação mista

Esse sistema é comumente utilizado em máquinas de linhas especiais. Vamos citar alguns tipos existentes a seguir, destacando de forma breve suas características.

Trocador de calor Ar-Ar

O motor pode ser equipado com um nível de proteção IP55 ou superior. Ele incorpora um sistema de ventilação composto por ventiladores interno e externo, ambos acoplados ao eixo. Adicionalmente, destaca-se que o trocador de calor se encontra posicionado na porção superior do conjunto motorizado.

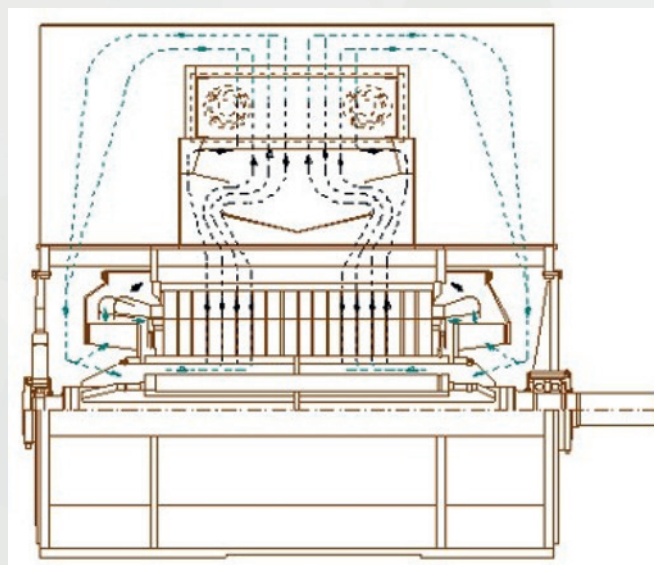


Aberto (Autoventilado)

Neste sistema, o motor pode ser configurado com proteção IP23, IP24, IP23W (WPI) ou IP24W (WPII), indicando sua natureza como um motor de tipo aberto. Este motor está equipado com um ventilador interno integrado ao eixo, responsável por aspirar o ar ambiente que perpassa a máquina, facilitando, assim, a transferência de calor.

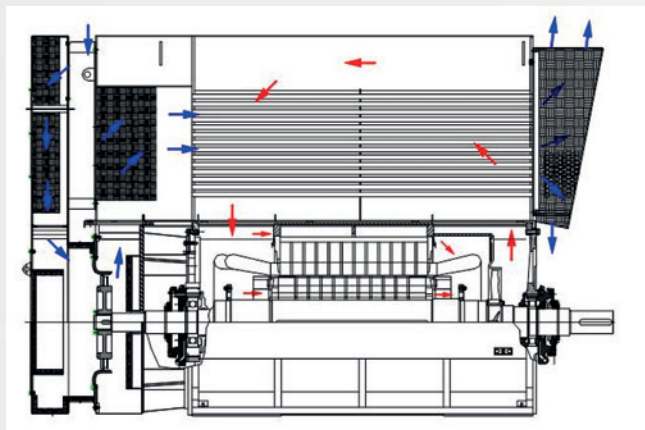
Trocador de calor Ar-Água

Esse modelo pode exibir um nível de proteção IP55 ou superior, indicando sua condição encapsulado. Este modelo possui um ventilador interno integrado ao eixo, no qual o fluxo de ar é induzido a circular por meio do radiador de água, viabilizando, dessa maneira, a dissipação térmica.

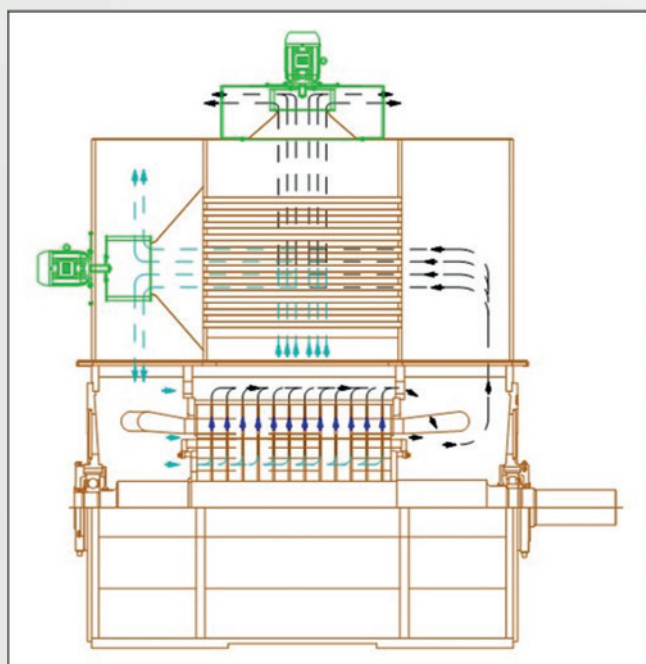


Autoventilado por dutos

Neste sistema, a máquina incorpora um ventilador internamente no eixo, responsável por aspirar o ar de um ambiente não contaminado. Posteriormente, após passar pela máquina, o ar é reintroduzido no meio ambiente. O Grau de Proteção atende ou excede a classificação IP55.



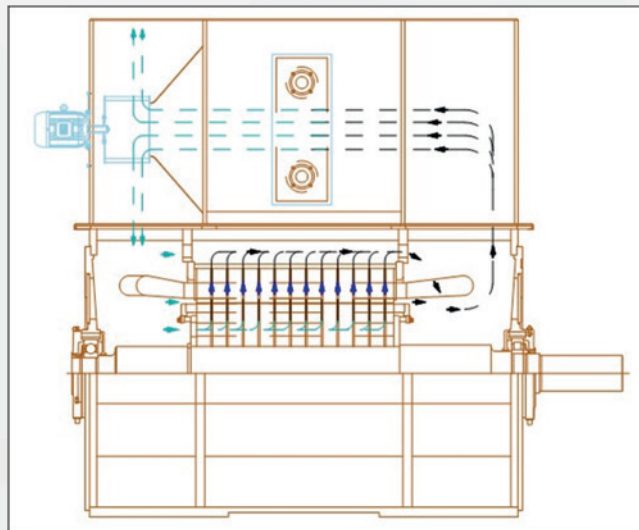
Ventilação independente com trocador de calor Ar-Ar



Neste sistema, encontra-se um ventilador autônomo destinado a impulsionar a circulação interna do ar. Um segundo ventilador independente é responsável pela aspiração do ar ambiente, promovendo sua circulação por meio do trocador de calor ar-ar. A máquina utilizada pode exibir um nível de proteção IP55 ou superior.

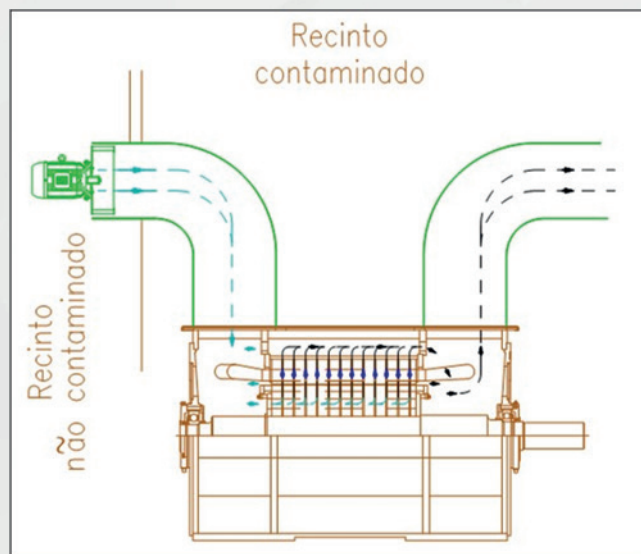
Ventilação independente com trocador de calor Ar-Água

Neste sistema, encontra-se um ventilador autônomo que impulsiona o fluxo de ar no interior da máquina por meio do permutador de calor ar-água. É possível configurar o sistema para alcançar um nível de proteção IP55 ou superior.



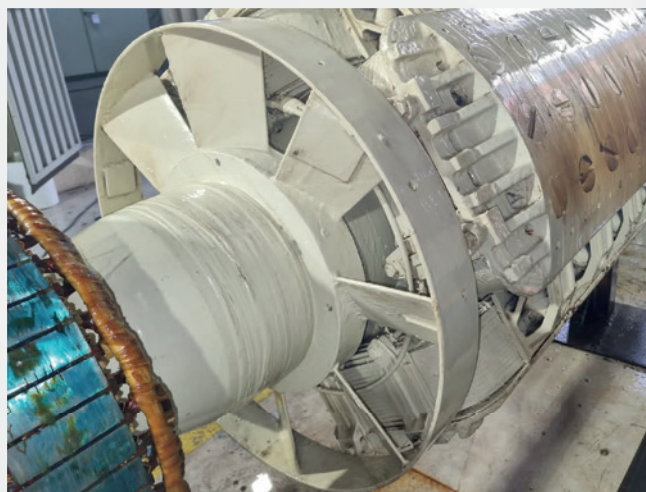
Ventilação independente por dutos

O fluxo de ar é aspirado de um ambiente isento de contaminação e direcionado por meio de condutos em direção ao motor. Este processo pode ser caracterizado por um nível de proteção igual ou superior a IP55.



3.30.7.3 Ventilação bilateral simétrica

A máquina pode ser configurada com um índice de proteção igual ou superior a IP55. O ativo incorpora ventiladores tanto internos quanto externos, os quais estão acoplados ao eixo. O calor gerado é direcionado para circular através dos tubos do trocador de calor ar-ar, efetuando, assim, a transferência térmica. É importante observar que o trocador de calor é posicionado na porção superior da máquina.



3.30.7.4 Ventilador

Os sistemas de ventilação, sejam eles internos ou externos, são concebidos com o propósito de alcançar um desempenho ótimo, mantendo simultaneamente um baixo nível de emissão de ruído. Estes sistemas são meticulosamente projetados para gerar o volume de ar requerido no processo de refrigeração, observando estritamente as normativas aplicáveis aos motores elétricos. Adicionalmente, são criteriosamente avaliadas outras características, tais como momentos de inércia e eficiência do motor.

Existem dois principais tipos de ventiladores:

1. Ventiladores radiais

- Máquinas bidirecionais.
- Máquinas que possuem quatro polos ou mais.



2. Ventiladores axiais

- Máquinas com rotação unidirecional.
- Máquinas com dois polos.
- Máquinas que garantem baixo nível de emissão de ruído.

3.30.8 Placa de identificação

Quando um fabricante concebe uma máquina elétrica rotativa para comercialização, é imperativo basear-se em valores predefinidos para as características da carga que será alimentada, bem como nas condições operacionais nas quais estará empregada. Esses valores coletivos constituem as "características nominais" da máquina. A transmissão dessas informações ao cliente é efetuada por meio da placa de identificação principal.



É notoriamente inviável incluir todas as informações de maneira completa na placa de identificação, tornando necessário recorrer a abreviações específicas. Além disso, é crucial que os valores apresentados sejam claros e não permitam interpretações ambíguas ou margens diversas em relação ao seu significado ou variação.

Nesse sentido, o fabricante adota Normas Técnicas que padronizam abreviações e símbolos, estabelecendo de maneira unívoca o significado e os limites dos valores declarados. Os geradores e moto-

res são fabricados em conformidade com as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional), VDE (Associação Alemã de Engenharia Elétrica), Nema (Associação Nacional de Fabricantes de Equipamentos Elétricos) e, mediante consulta prévia, podem ser produzidos conforme outras normativas.

Entre as informações padronizadas por norma que não necessitam ser detalhadas integralmente na placa de identificação, incluem-se as circunstâncias nas quais a máquina foi projetada para operar, ou seja, as "condições usuais de serviço".

As condições usuais de serviço compreendem:

- Meio refrigerante (geralmente o ambiente circundante) com temperatura não superior a 40°C e isento de elementos prejudiciais ao funcionamento;
- Localização em área sombreada;
- Altitude não superior a 1000 metros acima do nível do mar.

A placa de identificação da máquina incorpora dados que especificam as propriedades nominais e de eficiência de acordo com os parâmetros estabelecidos na norma. Adicionalmente às placas identificadoras que exibem as principais características da máquina, existem outras placas informativas, tais como aquelas relacionadas aos mancais, TAG, alertas, acessórios, certificação, controle de retrofit, entre outras.

3.30.9 Terminais de aterramento



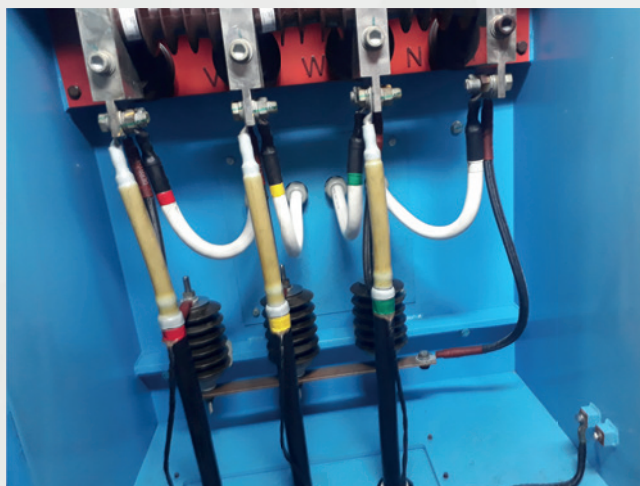
A finalidade do sistema de aterramento reside na salvaguarda dos operadores de máquinas elétricas, bem como das máquinas a elas conectadas,

contra eventuais curtos-circuitos entre partes energizadas e a carcaça do equipamento. Essa proteção é efetuada ao proporcionar um caminho de menor resistência para o fluxo de corrente, desviando-a do operador e da máquina. Para esse fim, essas máquinas são equipadas com pontos específicos de aterramento, localizados na região dos pés e/ou dentro da caixa de ligação principal, por meio de terminais designados para essa finalidade.

3.30.10 Caixa de ligação

3.30.10.1 Caixa de ligação de força

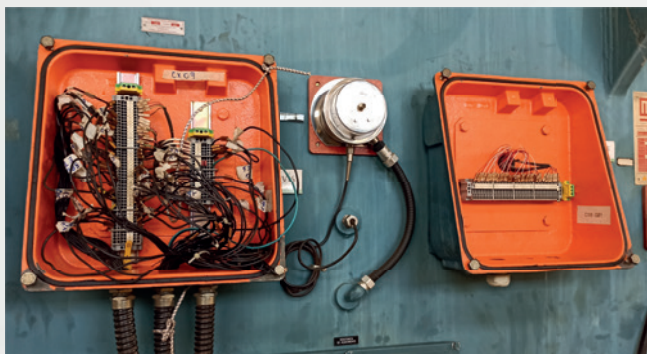
O invólucro do equipamento pode ser confeccionado em ferro fundido ou aço 1010/1020. O nível de proteção da caixa geralmente corresponde ao do motor, mas pode ser superior, dependendo da aplicação ou das exigências do cliente. A entrada dos cabos de alimentação pode ser realizada por meio de uma ou várias entradas com roscas métricas, PG, RWG ou NPT, ou ainda através de uma placa cega. A capacidade de rotação é de 180 graus em alguns casos, 90 graus em outros, dependendo do tipo e do tamanho da caixa. Essa variação é influenciada pela presença de acessórios internos na caixa e pela aplicação específica.



Para a conexão à rede, é possível utilizar barras, bornes, pinos de ligação, isoladores de porcelana ou epóxi, e outros utensílios, conforme apropriado.

3.30.10.2 Caixa de ligação de acessórios

A estrutura é fabricada em ferro fundido e, dependendo do modelo, é independente da caixa de força, possibilitando a instalação no mesmo lado ou oposto à caixa principal.



Normalmente, são disponibilizadas 3 (três) entradas com roscas métricas, PG, RWG ou NPT, destinadas aos cabos de conexão. O procedimento padrão consiste em fornecer uma caixa para os acessórios de sinal (Pt100) e outra para os acessórios de força (resistência de aquecimento) junto com a máquina. Opcionalmente, podem existir caixas adicionais de ligação de acessórios conforme necessidade.

Os bornes de conexão são padronizados, seguindo uma ordem e numeração para os tipos de acessórios. Para mais informações, consulte o manual de manutenção, conforme o modelo utilizado.

3.30.10.3 Caixa de ligação do rotor –Rotor de anéis

Fabricado em aço, o dispositivo abriga os terminais de circuito do rotor por meio de uma placa de bornes. A inserção dos cabos de alimentação ocorre por meio de uma ou mais entradas com roscas métricas, PG, RWG ou NPT, ou ainda por meio de uma placa cega, conforme especificações do cliente.

3.30.11 Acessórios e especialidades

3.30.11.1 Resistor de aquecimento

Resistores de aquecimento, também conhecidos como resistores de desumidificação, são empregados em ambientes de elevada umidade. Esses dispositivos são energizados durante períodos de inatividade das máquinas, elevando a temperatura interna em alguns graus acima da temperatura ambiente, geralmente entre 5 e 10°C. Essa ação tem como objetivo evitar a formação de condensação de água no interior das máquinas, especialmente quando estes permanecem inativos por longos períodos.



A utilização desses resistores é facultativa, podendo ser solicitada pelo cliente ou recomendada pelo fabricante quando se evidencia a exposição da máquina a ambientes úmidos. Os resistores de desumidificação são projetados para operar em uma única faixa de tensão, adaptando-se a redes monofásicas de 110, 220, 380 ou 440V, conforme a disponibilidade de tensão no local de instalação da máquina.

3.30.11.2 Proteção térmica

A proteção térmica comumente é implementada por intermédio de termoresistências, termistores ou termostatos. A seleção dos detetores a serem empregados é influenciada pela categoria de temperatura do isolamento utilizado, pela natureza específica de cada máquina e pelos requisitos inerentes à aplicação ou cliente.

3.30.11.2.1 Classes térmicas

As classes térmicas em geradores e motores elétricos são indicadores cruciais para garantir o desempenho e a durabilidade desses equipamentos. Elas são representadas por letras, como A (105°), E (120°), F (155°C), H (180°C) e B (130°C), que denotam a capacidade do isolamento térmico suportar variações de temperatura durante a operação. O valor de cada classe é composto pela soma da temperatura ambiente, coeficiente de transferência térmica e acréscimo para o ponto mais quente.

A escolha da classe térmica adequada depende de fatores como potência, ambiente operacional e características do sistema elétrico. Essa seleção impacta diretamente na eficiência energética, capacidade de carga e prevenção de falhas. Em ambientes industriais desafiadores, a análise cuidadosa das classes térmicas é ainda mais crucial para garantir a estabilidade operacional e reduzir custos de manutenção.

3.30.11.2.2 Elevação de temperatura

É um ensaio cujo objetivo é a determinação da temperatura atingida pela máquina em condições nominais de operação. Para calcular a elevação da temperatura, é crucial obter o valor da resistência ôhmica a frio. O procedimento consiste em operar a máquina sob carga nominal, monitorando a evolução da temperatura nos sensores designados (ou, caso inexistam, instalando um termômetro de bulbo no ponto mais quente da carcaça). O acompanhamento prossegue até que a variação térmica seja inferior a 1°C durante uma hora.

Após a estabilização, a máquina é desligada, e, assim que para de girar, são medidas a resistência ôhmica a quente e a temperatura ambiente no momento da medição. A elevação de temperatura, determinada pela variação da resistência ôhmica do cobre da máquina, é calculada utilizando a seguinte equação:

$$t_2 - t_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (235 + t_1) + t_1 - t_a$$

Onde:

t_2 - é a temperatura do enrolamento no fim do ensaio, em grau Celsius;

t_1 - é a temperatura do enrolamento (motor frio com temperatura estabilizada) no momento da medição da resistência R_1 , em graus Celsius.

R_2 - é a resistência do enrolamento no fim do ensaio, em ohms;

R_1 - é a resistência do enrolamento na temperatura t_1 , em ohms;

3.30.11.3 Dispositivos de proteção

3.30.11.3.1 Termoresistores

Esses dispositivos de detecção, comumente referidos como "RTD" - "Resistência Dependente da Temperatura" ou Resistência Calibrada, constituem elementos cujo funcionamento se baseia na propriedade de variação da resistência em relação à temperatura, intrínseca a certos materiais (geralmente platina, níquel ou cobre). Eles apresentam resistência calibrada, exibindo uma relação linear entre a resistividade do material do sensor e a temperatura à qual estão sujeitos.



Essa característica possibilita a monitorização contínua do processo de aquecimento da máquina por meio do visor do controlador, com elevado nível de precisão e sensibilidade de resposta.

A aplicação desses dispositivos é abrangente nos diversos setores da técnica de medição e automação de temperatura nas indústrias em geral. Geralmente, são empregados em instalações de grande responsabilidade, como em regimes intermitentes muito irregulares, podendo um mesmo detector ser utilizado para alarme e desligamento.

Os RTD's mais comuns são denominados "de platina" e "de cobre", cujas resistências a 0°C são, respectivamente, 100 e 10 Ohms. No Brasil, a utilização de RTD's em motores e geradores, até o momento, tem sido predominantemente realizada com os modelos "de platina" ou PT100.

São frequentemente empregadas nos enrolamentos das fases, nos mancais (sejam rolamentos ou buchas) e no sistema de resfriamento da máquina, seja por meio de ar frio ou quente.

3.30.11.3.2 Termistores (PTC e NTC)

São sensores térmicos compostos por dispositivos semicondutores cuja resistência experimenta uma mudança abrupta ao atingir uma temperatura específica.

Os termos PTC e NTC referem-se aos coeficientes de temperatura positivo e negativo, respectivamente.



O PTC é um termistor caracterizado por uma elevação abrupta na resistência a uma temperatura predefinida, específica para cada variante. Essa variação súbita na resistência interrompe a corrente no PTC, acionando um relé de saída que desativa o circuito principal. Além disso, pode ser empregado em sistemas de alarme, tanto para sinalização quanto para desativação (dois por fase).

No caso do termistor NTC, ocorre o oposto do PTC. Contudo, sua aplicação não é comum em motores elétricos, uma vez que os circuitos eletrônicos de controle disponíveis geralmente são projetados para o PTC (aumento de resistência).

Os termistores possuem dimensões reduzidas, não sofrem desgaste mecânico e apresentam uma resposta mais ágil em comparação com outros detectores. Apesar disso, possibilitam um monitoramento contínuo do processo de aquecimento da máquina.

Em conjunto com os circuitos eletrônicos correspondentes, os termistores proporcionam uma proteção abrangente contra sobreaquecimento de-

corrente de falhas de fase, sobrecargas, variações excessivas de tensão ou frequência, bem como operações frequentes de reversão ou ligar/desligar. Apresentam um custo relativamente baixo em comparação com os termopares de resistência (RTD), embora exijam um relé para controlar a ativação do alarme ou operação.

3.30.11.3.3 Termômetros

Existem diversas categorias de termômetros disponíveis, variando de acordo com os diferentes modelos oferecidos pelos fabricantes.



A utilização comum ocorre no mancal, mas também é possível empregá-los para aferir a temperatura interna do motor e no trocador de calor.

Esses termômetros são equipados com um indicador local e, para possibilitar a sinalização remota, podem incluir contatos auxiliares, geralmente com as configurações de normalmente abertos (NA) e/ou normalmente fechados (NF).

Em ambientes de risco, é imperativo que esses termômetros sejam instalados apenas com o indicador posicionado na máquina.

3.30.11.3.4 Termostatos

São dispositivos térmicos do tipo bimetálico equipados com contatos de prata, geralmente em configuração normalmente fechada, os quais se abrem em resposta a uma elevação específica da temperatura. Após a diminuição da temperatura de atuação do bimetálico, este retorna instantaneamente à sua forma original, permitindo o fechamento dos contatos mais uma vez.

Os termostatos podem ser designados para aplicações em sistemas de alarme, desligamento, ou ambas as funções (alarme e desligamento) em máquinas elétricas trifásicas, conforme as necessidades do cliente. Eles são conectados em série com a bobina do contator. A quantidade de termostatos utilizados varia de acordo com o nível de segurança desejado e as especificações do cliente, podendo ser empregados três termostatos (um por fase) ou seis termostatos (grupos de dois por fase).



No caso de operação simultânea em alarme e desligamento (dois termostatos por fase), os termostatos de alarme devem ser adequados para atuar na elevação de temperatura pré-determinada da máquina, enquanto os termostatos de desligamento devem atuar na temperatura máxima do material isolante, conforme determinado pelo grau de segurança e requisitos específicos do cliente.

3.30.12 Formas construtivas normalizadas

O termo "forma construtiva" refere-se à organização das partes construtivas das máquinas em relação à sua fixação, à disposição de seus mancais e à ponta de eixo. Essas especificações seguem padrões estabelecidos pelas normas NBR-5031, IEC 60034-7 e NEMA MG 1-4.

3.30.13 Mancais

Dispositivo mecânico que suporta um eixo rotativo, permitindo seu movimento com o mínimo de atrito por meio de deslizamento ou oscilação. Devido à significativa relevância dos mancais para o desempenho global de máquinas, apresentamos a seguir alguns fatores que influenciam sua durabilidade, a saber:

- Velocidade operacional;
- Esforços axiais e radiais aplicados;
- Adequada manutenção e lubrificação;
- Condições ambientais às quais estão expostos.

A escolha do tipo de mancal está diretamente relacionada ao contexto da aplicação, podendo ser rolamento ou deslizamento (Bucha).

3.30.13.1 Mancal de Rolamento

As características de aplicação e limites de temperatura são especificadas pelos manuais dos fabricantes.

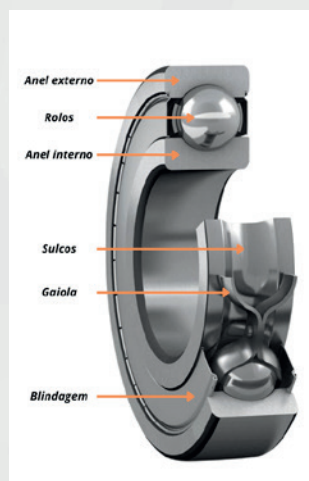
Os limites de temperatura são normalmente estabelecidos em 90°C para acionamento de alarme e 110°C para desligamento automático.

3.30.13.1.1 Forma construtiva

A precisão na fabricação e montagem desses componentes é crucial para garantir o desempenho eficiente e duradouro dos rolamentos.



Vamos detalhar os componentes que fazem parte de um mancal de rolamento, descrevendo suas principais características.



a) Anéis Internos e Externos

Os rolamentos são compostos por dois anéis, um interno e outro externo, fabricados geralmente de aço. O anel interno é montado no eixo da máquina, enquanto o anel externo é fixado na carcaça ou estrutura adjacente.

b) Ranhuras e Sulcos

Os anéis internos e externos podem apresentar ranhuras e sulcos para posicionar os elementos girantes (esferas e rolos) de forma adequada, mantendo-as em suas posições durante o funcionamento.

c) Gaiola

Utilizada para manter o espaçamento adequado entre os elementos girantes e garantir uma distribuição uniforme da carga, geralmente feita de metal ou polímero de alta resistência. A gaiola evita o contato direto entre as esferas, minimizando o desgaste e maximizando a vida útil do rolamento.

d) Vedações e Lubrificação

Rolamentos podem conter vedações para impedir a entrada de contaminantes e reter o lubrificante.

A lubrificação destes componentes é essencial para reduzir o atrito e o desgaste, podendo ser realizada mediante a aplicação de graxa, opcionalmente imersão em óleo, ou ainda por meio de névoa de óleo (conhecida como "Oil Mist"), dependendo do modelo do rolamento.

3.30.13.1.2 Tipos de rolamentos

Em complemento a forma construtiva citada anteriormente, vamos citar os tipos de rolamentos, diretamente ligados aos seus elementos girantes que permitem o movimento rotativo do eixo, sendo frequentemente feitos de aço cromado, e que estão distribuídas entre os anéis interno e externo. Elas facilitam o deslizamento suave entre os anéis, minimizando o atrito e permitindo o movimento rotativo.

a) Rolamentos de Esferas

Este tipo é o padrão adotado pela maioria dos fabricantes devido à sua eficiência, durabilidade e capacidade de suportar diferentes cargas com baixo atrito.



Dependendo da aplicação, existem diferentes tipos de rolamentos de esferas, como os de

contato angular, de uma ou duas carreiras, miniatura, entre outros, cada um projetado para suportar condições específicas de carga e velocidade.

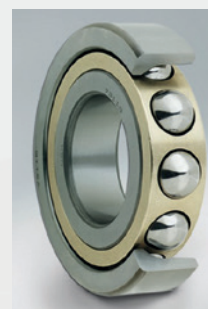
b) Rolamentos de Rolos

Utilizados em situações em que as cargas apresentam forças radiais elevadas. Importante destacar que não são adequados para motores de 2 polos, devido à proximidade da velocidade crítica com a velocidade síncrona do motor.



c) Rolamento de Contato Angular

Recomendado para aplicações com cargas que envolvem esforços radiais e axiais superiores aos suportados por rolamentos normais.



d) Rolamento de Rolos Cônicos

Indicado para situações em que as cargas apresentam elevados esforços radiais e axiais.



3.30.13.2 Mancal de deslize

As vantagens significativas do mancal de deslize em comparação com o rolamento incluem a vida útil prolongada, capacidade para suportar altas rotações e resistência superior a esforços radiais combinados com a rotação.

A principal desvantagem em relação ao rolamento reside no custo.

Seu sistema de lubrificação é em sua maioria à óleo, tendo características específicas de viscosidade, composição e outros.

Os limites de temperatura são normalmente estabelecidos em 100°C para acionamento de alarme e 120°C para desligamento automático.

3.30.13.2.1 Forma construtiva

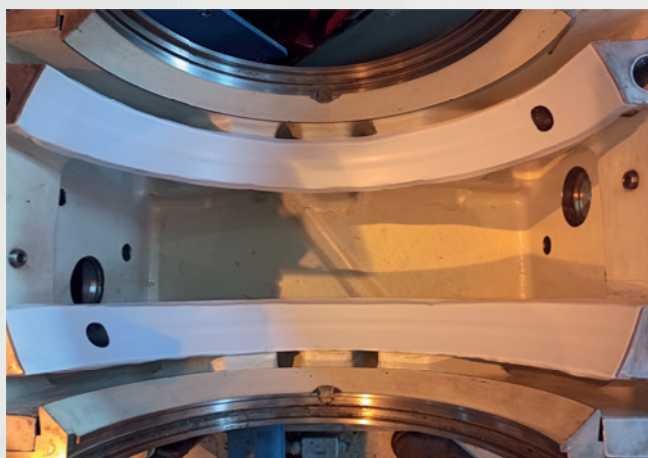
Esse tipo de mancal tem como seus principais componentes a caixa de mancal, casquilhos (Bucha), selos flutuantes, Anel pescador (anel de bronze), mangueira de elevação de eixo (Jacking) e tampa do mancal. As partes que compõem o conjunto dependem do modelo do mancal e seu fabricante, devido a aplicação de cada componente.



Vamos citar a seguir, a forma e utilidade de cada componente.

a) Caixa de mancal

Tem a função de servir de suporte estrutural para os casquilhos e conseqüentemente para o rotor, armazenar o lubrificante e proteger os componentes contra contaminantes externos.



É geralmente fabricada em materiais resistentes, como ferro fundido, aço ou ligas de alumínio, para fornecer a resistência estrutural necessária e pro-

teger o mancal contra impactos e cargas. A estrutura é projetada para ser robusta e suportar as condições operacionais.

Dentre seus componentes, possui: furos de drenagem e parafusos de fixação projetados para suportar os esforços quando em operação.

b) Casquilhos (Buchas)

São construídos em forma cilíndrica, com diâmetro interno e externo ajustado as especificações do mancal. É comumente fabricado de material base (aço especial) e material patente (ligas de materiais antifricção que têm como principais características a baixa dureza e elevada ductilidade, associados com um baixíssimo coeficiente de atrito, além de ser projetada para ser autolubrificante). Alguns modelos possuem encosto axial (material patente) no mancal dianteiro ou traseiro, dependendo da aplicação.



Eles são divididos em duas partes devidamente alinhados por pinos. Esse arranjo permite a inspeção sem a necessidade de remover a máquina do local de instalação. Estes possuem ranhuras ou sulcos em sua superfície interna para a distribuição uniforme do lubrificante.

Além disso, eles são eletricamente isolados da carcaça do motor, evitando assim a circulação de correntes parasitas provenientes do eixo da máquina.

c) Selos flutuantes

São dispositivos utilizados para vedar a passagem de fluidos, evitando a saída indesejada do lubrificante para fora do mancal através dos orifícios entre a parte girante e estacionária (rotor e caixa de mancal). Os selos flutuantes possuem fa-



ces de vedação em formato de labirinto que entram em contato direto com o eixo rotativo. Essas faces podem ser planas, cônicas ou esféricas, dependendo do design específico do selo.

Fabricados frequentemente em materiais resistentes à corrosão e desgaste, como carvão de silício, tungstênio, cerâmica ou ligas especiais. A construção pode envolver diferentes camadas desses materiais para garantir durabilidade e eficácia. A forma física do selo flutuante é projetada para se ajustar ao eixo rotativo e à carcaça circundante.

O termo "flutuante" refere-se à capacidade do selo de ajustar-se automaticamente para compensar desalinhamentos ou variações na posição do eixo. Esse mecanismo flutuante ajuda a garantir uma vedação eficaz mesmo em condições dinâmicas.

Destacamos que esse componente está limitado a vazão e pressão de óleo em operação normal da máquina, conforme projetado. O excesso de lubrificação nos mancais pode ocasionar vazamentos.

d) Anel Pescador (Anel de Bronze)

O anel pescador é frequentemente construído com materiais de baixo atrito, como bronze ou materiais autolubrificantes. Sua forma circular proporciona uma superfície de contato deslizante suave.



Ele atua como um componente que proporciona lubrificação para minimizar o atrito entre o eixo e os casquilhos, sendo projetado com certo nível de porosidade suficiente para coletar e redistribuir óleo lubrificante, garantindo uma lubrificação adequada e reduzindo assim o desgaste mecânico. Além disso, o anel pescador pode ter uma função secundária de auxiliar no resfriamento, dissipando o calor gerado durante a operação.

e) Mangueira de elevação de eixo (Jacking)

A mangueira de levantamento de eixo é tipicamente confeccionada com materiais resistentes e flexíveis, como borracha ou poliuretano, devido à pressão interna exercida para elevação do eixo e a exposição à temperatura do óleo lubrificante na caixa de mancal que pode gerar ressecamento em sua proteção mecânica.



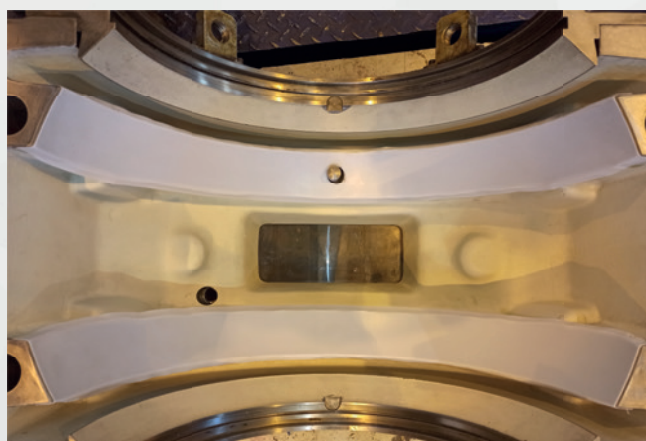
A mangueira é projetada em uma configuração que permite o adequado levantamento do eixo, proporcionando um suporte hidrodinâmico eficiente entre as partes rotativas (eixo) e estacionárias (casquilhos) do mancal.

A principal função da mangueira é facilitar o levantamento hidrodinâmico do eixo. Ela ajuda a criar uma película de fluido (óleo lubrificante), entre o eixo e os casquilhos, reduzindo significativamente o atrito e o desgaste mecânico durante a partida da máquina.

Normalmente o sistema de levantamento de eixo não foi projetado para operação constante, sendo acionada para partida e, após a máquina alcançar a rotação nominal, é desativado.

f) Tampa do mancal

As características físicas dos mancais são as mesmas da caixa de mancal citado anteriormente. Possui a função de proteger os componentes contra contaminantes externos. Normalmente contém uma tampa de inspeção para visualização do interno do mancal e, em alguns casos, para reposição de óleo lubrificante.



g) Folga axial de eixo e casquilhos

Esses mancais apresentam uma folga axial de alguns milímetros, variando de acordo com o tamanho do mancal. A montagem da máquina é realizada

de forma a posicionar o centro magnético do conjunto principal de modo que o rotor tenha folga para ambos os lados, ou seja, a folga axial é dividida ao meio.



Um indicador fixo no mancal dianteiro aponta a posição correta do centro magnético, indicando-a através de três marcas na extremidade do eixo. Uma marca representa o limite do rotor para trás, outra para frente, e a terceira indica a posição do centro magnético, correspondendo à posição de montagem e operação do motor, considerando o alinhamento entre rotor e estator (em função do campo magnético), bem como entre máquina acionada e máquina acionadora (em função da distância física axial de projeto - GAP).



Destaca-se que é crucial acoplar a máquina de modo que o indicador esteja alinhado com a marca central na ponta do eixo. Caso o mancal opere deslocado para frente ou para trás, pode ocorrer superaquecimento, resultando na possibilidade de danos aos casquilhos.

3.30.14 Geradores com excitação por escovas

O sistema de excitação por escovas refere-se à parte do gerador elétrico que fornece a corrente de excitação para o campo magnético do rotor principal. O conjunto é formado basicamente por escovas e anéis coletores, com a função de conduzir a corrente contínua de excitação da fonte até os enrolamentos do rotor principal, sendo controlado por um regulador de tensão.



As escovas são dispositivos condutores, geralmente feitos de materiais como grafite, que mantêm contato elétrico com os anéis coletores no rotor.

Os anéis coletores são partes rotativas conectadas aos enrolamentos do rotor, permitindo a transferência de corrente elétrica das escovas para os enrolamentos.

O regulador de tensão monitora a saída do gerador e ajusta a corrente de excitação para manter a tensão de saída dentro dos limites desejados, assegurando a estabilidade da tensão e protegendo o sistema contra variações indesejadas.

A tensão alternada de saída destinada à alimentação das cargas é derivada do estator principal (armadura). Nesse sistema, o campo (rotor principal), mantém a tensão de saída do gerador (estator principal) constante dentro de suas características nominais. Essa estabilidade é regulada pelo regulador de tensão, responsável por monitorar continuamente a tensão de saída, agindo no fornecimento ideal de corrente para o rotor principal. Ao ser acionado na rotação nominal, sem alimentação fornecida ao rotor, o processo de escorvamento é iniciado pela pequena tensão residual do gerador, ou seja, o processo de introdução de corrente elétrica no rotor para estabelecer o campo magnético tem seu início com a presença dessa pequena tensão residual presente no sistema.

Como vantagem, esse sistema tem uma resposta mais rápida na recuperação de tensão, devido à aplicação direta de corrente contínua no rotor.

Por outro lado, sua desvantagem é necessitar de manutenção periódica no conjunto escovas e porta-escovas. Não é recomendado para uso em cargas sensíveis e de telecomunicações devido à possibili-

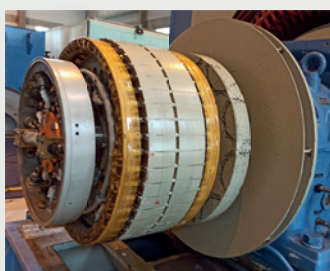
dade de gerar interferência de rádio causada pelo contato das escovas e anéis (potencial faiscamento). Além disso, não deve ser empregado em atmosferas explosivas.

3.30.15 Geradores com excitação sem escovas (BRUSHLESS)

Nesses geradores, a obtenção de corrente contínua para alimentação do campo ocorre sem a utilização de escovas e anéis coletores, empregando exclusivamente indução magnética. Para tal, o gerador é equipado com um componente denominado excitatriz principal, caracterizada por uma armadura girante (rotor da excitatriz) e um campo fixo (estator da excitatriz).



O rotor da excitatriz é montada no próprio eixo do gerador. Além disso, inclui um conjunto de diodos girantes (Roda de Diodos / circuito retificador), também posicionado no eixo do gerador, responsável por fornecer corrente contínua ao rotor principal. Este conjunto de diodos recebe uma tensão alternada proveniente do rotor da excitatriz principal, induzida pelo estator da excitatriz principal (campo da excitatriz), alimentado por corrente contínua proveniente do regulador de tensão.



O conceito de tensão alternada de saída do gerador (estator principal) e controle do campo do

rotor principal pelo regulador de tensão, segue o mesmo princípio do sistema por escovas citado anteriormente, sendo distintas apenas no tipo de sistema de excitação.

Nos geradores brushless, a potência para a excitação (alimentação do regulador de tensão) pode ser obtida de diferentes maneiras, definindo-se o tipo de excitação da máquina. Esses tipos de excitação incluem:

I. Alimentação através de bobina auxiliar:

Um conjunto independente de bobinas, alojado em ranhuras do estator principal da máquina (armadura principal), funciona como uma fonte de potência independente para o regulador de tensão. O regulador recebe tensão alternada dessa fonte e alimenta o campo da excitatriz principal com tensão retificada e regulada.

II. Alimentação através de excitatriz auxiliar a ímãs permanentes (PMG - "Permanent Magnets Generator"):

Uma excitatriz auxiliar a ímãs permanentes, com campo no rotor, é montada no próprio eixo do gerador. A excitatriz auxiliar funciona como uma fonte de potência independente para o regulador de tensão, gerando tensão trifásica alternada no estator, a qual é retificada, regulada e aplicada ao estator da excitatriz principal do gerador.

III. Alimentação sem excitatriz auxiliar pelo enrolamento de armadura da máquina:

Utiliza o próprio enrolamento de armadura da máquina, com a opção de ponto de conexão adicional nos enrolamentos do transformador (tap's - para baixa tensão) ou via Transformador de Potencial (TP - para alta tensão), ou ainda, alimentação externa em locais com rede elétrica presente. O regulador de tensão recebe tensão alternada de uma dessas fontes, retifica, regula e aplica-a ao estator da excitatriz principal do gerador.

3.30.16 Máquinas de polos lisos e polos salientes

Os geradores síncronos são comumente fabricados com rotores caracterizados por polos lisos ou salientes.

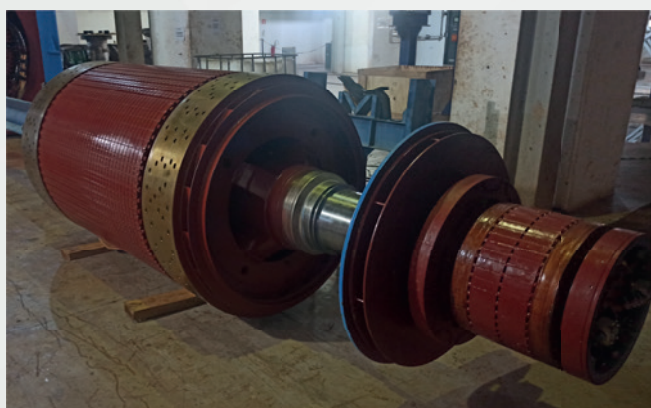
A escolha entre polos salientes e lisos dependerá das exigências específicas da aplicação e do desempenho desejado na máquina elétrica. Cada construção tem suas vantagens e desvantagens, in-

fluenciando fatores como eficiência, torque e resposta dinâmica do sistema.

Vamos abordar com mais detalhes a construção desses polos a seguir.

3.30.16.1 Lisos

Os polos lisos referem-se a rotores nos quais o espaçamento uniforme entre o núcleo de ferro é mantido de maneira consistente ao longo de toda a circunferência.



A construção física desse tipo de rotor se resume em núcleo, enrolamentos, isolamento térmico, revestimento térmico, capa de aço e forma geométrica. Para entender cada um desses componentes principais, vamos abordá-los a seguir.

a) Núcleo

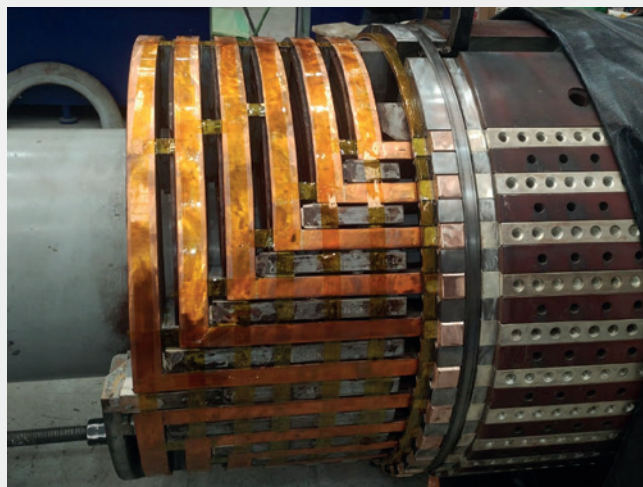
O núcleo do polo liso é frequentemente fabricado com material ferromagnético de alta permeabilidade, como laminado de aço silício. Esse material proporciona uma condutividade magnética superior, contribuindo para a eficiência do fluxo magnético.

O núcleo é composto por várias lâminas ou chapas finas empilhadas. Esse empilhamento visa reduzir as perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault) e otimizar as propriedades magnéticas do núcleo.

b) Enrolamentos

Os enrolamentos nos polos lisos são constituídos por condutores elétricos, geralmente fios de cobre esmaltados. A escolha de materiais condutores de alta qualidade é essencial para garantir uma condução eficiente de corrente elétrica. Cada

condutor é cuidadosamente isolado para prevenir curtos-circuitos e garantir a integridade elétrica do enrolamento.



c) Isolamento Térmico

Camadas de isolamento térmico são frequentemente inseridas entre as diferentes partes do polo liso para mitigar o acúmulo de calor e manter uma operação dentro dos limites de temperatura seguros.

Em alguns casos, são incorporados sistemas de ventilação para dissipar o calor gerado durante a operação, contribuindo para a eficiência térmica do polo.

d) Revestimento

Os polos lisos são revestidos com materiais anticorrosivos para proteger contra a deterioração devido a fatores ambientais adversos.

Uma camada adicional de isolamento elétrico pode ser aplicada externamente para evitar curtos-circuitos e garantir a segurança operacional.

e) Capa de aço

A capa de aço é comumente utilizada como um invólucro externo nos polos lisos. Fabricada em aço, essa capa tem a função de fornecer suporte estrutural e proteção adicional aos componentes internos contra impactos mecânicos e fatores ambientais adversos. Ela serve como uma camada externa robusta que protege os enrolamentos, isolamentos e outras partes internas dos polos lisos contra danos físicos, tais como impactos ou vibrações durante a operação.



Além da resistência mecânica, o revestimento de aço na capa também contribui para a resistência à corrosão, impedindo a deterioração causada por condições ambientais agressivas.

Em alguns projetos, a capa de aço pode incluir características para proporcionar isolamento térmico adicional através de camadas isolantes específicas integradas à capa de aço, contribuindo para a eficiência operacional e a proteção contra o superaquecimento.

Esse componente possui orifícios de ventilação dividido por caídas minuciosamente projetadas em busca de eficiência na refrigeração.

f) Forma Geométrica

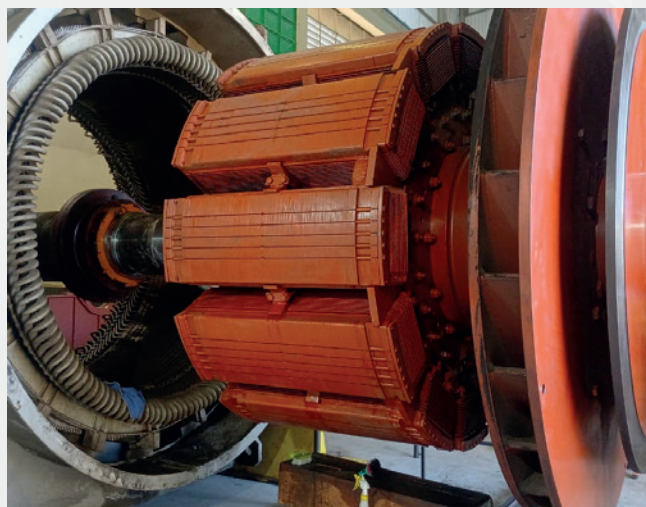
Não podemos deixar de citar o formato adotado na construção das máquinas síncronas. A característica principal é o perfil uniforme ao longo do entreferro, assegurando que a distribuição do fluxo magnético seja consistente, resultando em um desempenho elétrico estável.

A construção dos polos lisos envolve processos de usinagem e fabricação altamente precisos para garantir dimensões adequadas, sendo um equilíbrio intrincado entre materiais de alta qualidade, técnicas de fabricação e considerações térmicas e elétricas para garantir um desempenho eficiente e confiável.

3.30.16.2 Polos Salientes

Os polos salientes referem-se a rotores caracterizados por uma interrupção no espaço entre o núcleo de ferro ao longo de sua periferia. Nessas instâncias, são identificadas as regiões denominadas interpolares, nas quais o espaço entre o núcleo é

substancialmente ampliado, resultando na evidência visual das saliências dos polos.



A construção física desse tipo de rotor se resume em Design do rotor, saliências e regiões interpolares, distribuição do campo magnético, efeito na indução de tensão e aplicações específicas. Para entender cada uma dessas características, vamos abordá-los a seguir.

a) Design do rotor

Em rotores de máquinas elétricas com polos salientes, o design do rotor é modificado para criar regiões de maior destaque ao longo da periferia. Ao contrário dos polos lisos, onde a superfície é uniforme, os polos salientes possuem saliências proeminentes, criando regiões interpolares.

b) Saliências e Regiões Interpolares

As saliências nos polos salientes são partes proeminentes do rotor que se estendem além da superfície principal.

Entre essas saliências, são formadas as chamadas regiões interpolares, onde o entreferro é significativamente aumentado em comparação com os polos lisos.

c) Distribuição do Campo Magnético

A presença de saliências altera a distribuição do campo magnético ao redor do rotor. Isso pode impactar o desempenho magnético da máquina elétrica, proporcionando características específicas de funcionamento.

A variação no entreferro ao longo das saliências influencia a indução de tensão nas bobinas adjacentes, gerando padrões de fluxo magnético distintos em comparação com polos lisos.

d) Aplicações Específicas

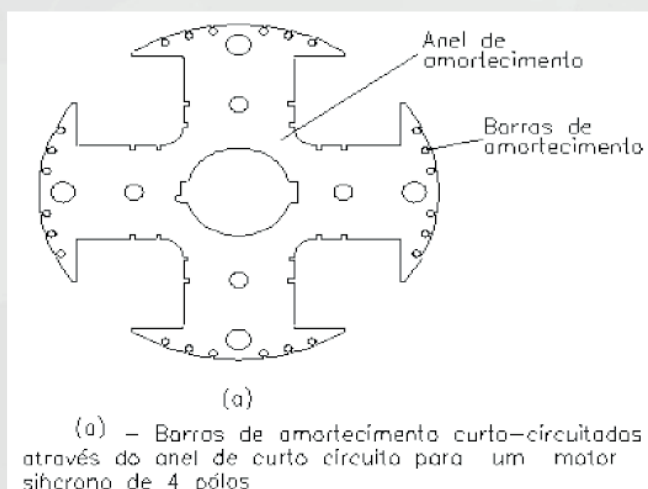
A construção de polos salientes é frequentemente adotada em máquinas elétricas projetadas para aplicações específicas, onde certas características de desempenho, como torque ou controle de velocidade, são priorizadas.

3.30.17 Motores síncronos

Os motores síncronos se destacam pela dinâmica de operação, caracterizada pela correspondência da velocidade de rotação com o campo girante da armadura em regime permanente. Isso resulta na ausência de escorregamento e, conseqüentemente, na inexistência de conjugado de partida. Dessa forma, esses motores requerem um método específico para inicialização.

O método mais comum consiste em iniciar o motor síncrono como se fosse um motor assíncrono de gaiola, para posteriormente excitá-lo alimentando o enrolamento de campo com corrente contínua, visando a sincronização. A alimentação do campo principal com corrente contínua pode ser realizada por meio de escovas e anéis coletores (excitação com escovas).

Para gerar torque de partida, utiliza-se barras de cobre, latão ou alumínio nas sapatas polares, as quais são curto-circuitadas nas extremidades por meio de anéis, formando uma gaiola similar à de um motor de indução assíncrono. A figura a seguir, ilustra o perfil da chapa rotórica para um motor síncrono de quatro polos, destacando a localização das barras e a região em que são curto-circuitadas nas sapatas polares (a).



A gaiola de partida, também conhecida como enrolamento amortecedor, não apenas fornece o conjugado de partida, mas também amortiza oscilações decorrentes de variações de carga, estabilizando a rotação do motor.

A partida do motor síncrono ocorre com o enrolamento de campo (excitação) curto-circuitado e o induzido (armadura) conectado à rede. O enrolamento de campo é curto-circuitado inicialmente para evitar indução de tensões muito altas, prevenindo assim a perfuração do isolamento. Posteriormente, conecta-se a armadura a uma rede de tensão alternada, manifestando o conjugado de um motor assíncrono. À medida que o rotor acelera, o enrolamento de campo é alimentado com corrente contínua quando a velocidade do rotor se aproxima de 95% da velocidade síncrona. O campo magnético gerado entrelaça-se com o campo magnético girante da armadura, resultando no conjugado de sincronismo e sincronização do rotor com o campo girante do estator.

Os motores síncronos são aplicados como compensadores síncronos em instalações para correção do fator de potência. Sua facilidade de ajuste e a capacidade de manter continuamente o valor do fator de potência pré-ajustado são vantagens notáveis. Além de acionar cargas mecanicamente, o motor síncrono pode operar como compensador síncrono.

Em determinadas condições de tamanho e potência, e em aplicações específicas, o motor síncrono operando com fator de potência unitário pode oferecer vantagens em relação ao motor assíncrono, proporcionando maior eficiência. Com fator de potência unitário, a potência reativa é inexistente, resultando em corrente reduzida e, conseqüentemente, em menores perdas nos enrolamentos.

3.31 Características do ambiente

Fatores como temperatura, umidade e presença de substâncias corrosivas podem influenciar diretamente a eficiência e a vida útil das máquinas elétricas. Ambientes agressivos podem acelerar o desgaste mecânico e comprometer a eficácia dos sistemas de isolamento elétrico. Portanto, a consideração e adaptação das máquinas elétricas às condições ambientais são fundamentais.

Dois fatores preponderantes influenciam diretamente na determinação da potência admissível, dentre outros aspectos:

- A temperatura do meio refrigerante no qual a máquina é implantada.
- A altitude na qual a máquina é instalada.

Em grande parte dos cenários, o ar circundante mantém uma temperatura que não ultrapassa os 40°C, é desprovido de elementos prejudiciais, e a altitude é limitada a 1000 metros acima do nível do mar. Para esses valores de altitude e temperatura ambiente, consideram-se condições operacionais normais, excluindo a possibilidade de superaquecimento da máquina.

Vamos abordar com mais detalhes esses fatores de ambiente que estão diretamente ligados ao desempenho dessas máquinas.

3.31.1 Altitude

Um gerador que opera em altitudes superiores a 1000 metros, sem ser especificamente designado para tal condição, experimentará um aumento de temperatura devido à diminuição da densidade do ar, resultando na redução da capacidade de dissipação de calor. A inadequada transferência térmica entre o gerador e o ambiente circundante implica a necessidade de redução de perdas, acarretando, conseqüentemente, uma diminuição na potência gerada. O aumento de temperatura nas máquinas é diretamente proporcional às perdas, as quais variam aproximadamente de forma quadrática em relação à potência.

Existem três alternativas viáveis para a instalação de um motor acima de 1000 metros do nível do mar, quando este é projetado para operar a 1000 metros e a 40°C:

a) A utilização de materiais isolantes de classe superior possibilita a manutenção da potência original do motor.

b) A opção por motores com um fator de serviço superior a 1,0 (por exemplo, 1,15 ou mais) é admissível, desde que a carga demande apenas a potência nominal do motor.

c) A redução de 1% na potência requerida deve ser aplicada para cada aumento de 100 metros na altitude acima de 1000 metros, mantendo a temperatura ambiente inalterada.

3.31.2 Temperatura do ambiente

Em geradores e motores que operam continuamente em ambientes com temperaturas superiores a 40°C, sem serem inicialmente projetados para essa condição, há o risco de os enrolamentos alcançarem temperaturas prejudiciais à isolação, resultando em uma redução significativa na vida útil do equipamento devido a deterioração térmica.

Para mitigar esse problema, é necessário realizar um projeto especial do gerador, empregando materiais isolantes de qualidade superior ou considerando a redução da potência nominal do equipamento.

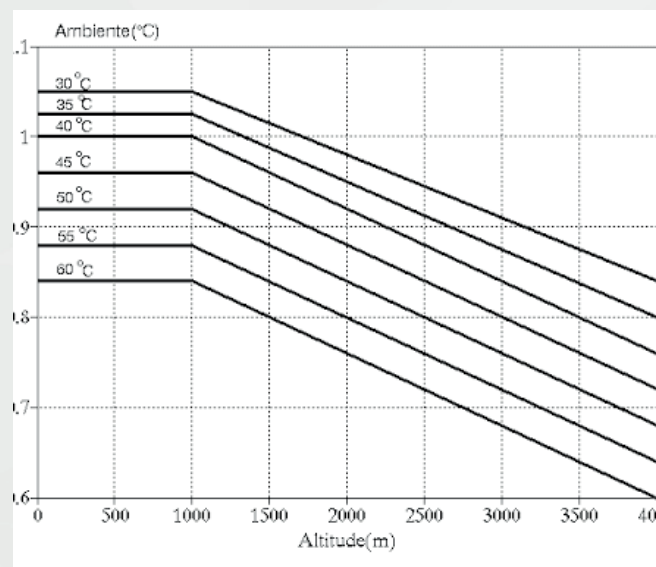
Elucidando a importância de considerar a temperatura ambiente, podemos considerar o caso de geradores e motores operando em temperaturas inferiores a -20°C, sem especificações para tal condição, podem surgir os seguintes problemas:

1. Excessiva condensação, demandando medidas adicionais como drenagem suplementar ou a instalação de resistência de aquecimento, especialmente quando o gerador permanece inativo por longos períodos.

2. Formação de gelo nos mancais, resultando no endurecimento das graxas ou lubrificantes dos mancais. Para contornar essa situação, torna-se necessário o uso de lubrificantes especiais ou graxas anticongelantes.

3.31.3 Determinação da potência útil

Considerando os impactos resultantes das alterações na temperatura e altitude na capacidade de dissipação em um gerador, a potência gerada pode ser calculada ao multiplicar a potência útil pelo coeficiente presente nas curvas do diagrama ilustrado abaixo.



Vale ressaltar que o mesmo cálculo pode ser realizado para determinar a potência de um motor. Porém, por obterem características distintas obvias, consideramos para o motor, a multiplicação da potência útil (ou a potência nominal a 40°C e 1000m) pelo fator de multiplicação correspondente, conforme apresentado na tabela abaixo.

H T	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
10							0,99
15						1,00	0,94
20					1,00	0,95	0,90
25				1,00	0,96	0,90	0,85
30			1,00	0,96	0,90	0,86	0,81
35		1,00	0,96	0,90	0,85	0,81	0,77
40	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,76	0,72
45	0,94	0,89	0,84	0,80	0,76	0,72	0,68
50	0,88	0,83	0,79	0,75	0,71	0,67	0,67
55	0,82	0,77	0,73	0,70	0,66	0,63	0,60
60	0,76	0,72	0,68	0,65	0,62	0,59	0,56

O fator de multiplicação é a relação entre a potência útil à temperatura ambiente (T) em graus celsius e a altitude acima do nível do mar (H) em metros.

3.31.4 Atmosfera ambiente

3.31.4.1 Ambientes agressivos

Ambientes hostis, como estaleiros, instalações portuárias, indústria pesqueira, diversas aplicações navais, indústria química e petroquímica, demandam que os equipamentos operantes sejam completamente adaptados para suportar tais condições com alta confiabilidade, sem apresentar falhas de qualquer natureza.

Para a utilização de máquinas nesses ambientes adversos, os fabricantes desenvolvem modelos projetados para atender aos requisitos específicos e padronizados das condições mais rigorosas encontradas. Essas máquinas devem apresentar as seguintes características especiais:

- Enrolamento duplamente impregnado.
- Pintura anticorrosiva (epóxi), aplicada interna e externamente.
- Placa de identificação em aço inoxidável.
- Elementos de montagem zincados.
- Ventilador fabricado com material não faiscante.
- Vedação específica para cada tipo de mancal, situada entre o eixo e as tampas.
- Juntas de borracha destinadas a selar a caixa de ligação.

Essas especificações garantem a robustez e a durabilidade necessárias para um desempenho eficaz em ambientes desafiadores, proporcionando assim uma operação confiável em condições adversas.

Nos casos de geradores destinados à aplicação naval, as máquinas devem incorporar características distintivas em conformidade com os requisitos estabelecidos para construção, inspeção e testes nas normas das sociedades classificadoras navais. Entre essas entidades, incluem-se o American Bureau of Shipping (ABS), Bureaus Veritas (BV), Lloyds Register of Shipping, Germanischer Lloyd, e outras. Estas entidades especificam, entre diversas características, limites mínimos de temperaturas ambientais e critérios para sobrecargas.

3.31.4.2 Ambiente contendo poeiras ou fibras

Para avaliar a viabilidade operacional das máquinas nesses ambientes específicos, é necessário atentar-se à dados pertinentes, incluindo as dimensões e a estimativa da quantidade de fibras presentes no ambiente em questão, no caso de usinas de álcool e açúcar, por exemplo. O tamanho e a quantidade de fibras desempenham um papel crucial, pois ao longo do tempo podem causar obstruções no sistema de ventilação, resultando no aquecimento da máquina.

Em situações em que a concentração de fibras é elevada, é recomendado o uso de filtros de ar adequados ou a realização de procedimentos de limpeza nos dispositivos de refrigeração e das próprias carcaças das máquinas, principalmente em caso de motores que ficam expostos a alto nível de contaminantes quando instalados em moenda e/ou caldeiras.

3.31.4.3 Locais em que a ventilação é prejudicada

A ventilação é prejudicada por fatores como o excesso de contaminação, elevada temperatura, alto nível de umidade, locais com gases e vapores nocivos e dentre diversos outros, sendo necessário a seleção do tipo de sistema de ventilação mais adequado, descartando sistemas abertos.

3.31.4.4 Áreas de risco

Uma instalação na qual produtos inflamáveis são manipulados, processados ou armazenados de maneira contínua demanda cuidados específicos para assegurar a preservação do patrimônio e a segurança da vida humana.

Os equipamentos elétricos, devido às suas características inerentes, têm o potencial de se tornarem fontes de ignição, seja por meio de centelhamento decorrente da abertura e fechamento de contatos, ou devido ao superaquecimento de algum componente, seja ele intencional ou causado por correntes de defeito.

3.31.4.5 Atmosferas explosivas

Uma atmosfera é considerada explosiva quando a relação entre a concentração de gases, vapores, partículas sólidas em suspensão (pós) ou fibras atinge um ponto em que a presença de uma faísca gerada por um circuito elétrico ou o aquecimento de um dispositivo pode desencadear uma reação explosiva. Para que ocorra tal explosão, são requisitados três elementos fundamentais: a presença de um agente combustível, oxigênio em quantidade adequada e o surgimento de uma fonte de ignição, seguindo a equação: combustível + oxigênio + fonte de ignição = explosão.

3.31.4.6 Classificação das áreas de risco

Conforme as diretrizes estabelecidas pelas normas ABNT / IEC, a categorização das áreas de risco é realizada da seguinte forma:

1. Zona 0:

Área na qual a presença contínua de mistura inflamável e/ou explosiva é verificada, persistindo por extensos períodos. Exemplo disso seria a área interna de um tanque de combustível, onde a atmosfera explosiva está constantemente presente.

2. Zona 1:

Espaço onde a probabilidade de ocorrência de mistura inflamável e/ou explosiva está associada à operação normal do equipamento e do processo. Nessa zona, a atmosfera explosiva é frequentemente identificada.

3. Zona 2:

Locais nos quais a presença de mistura inflamável e/ou explosiva é improvável, ocorrendo apenas por curtos períodos. Esta zona está relacionada à operação anormal do equipamento e do processo, como perdas ou uso negligente, onde a atmosfera explosiva pode eventualmente estar presente de maneira acidental.

As classes e grupos nas áreas de risco são divididas da seguinte forma:

1. Classe I:

Gases ou Vapores Explosivos

- Grupo B: Hidrogênio, butadieno, óxido de eteno;

- Grupo C: Éter etílico, etileno;
- Grupo D: Gasolina, nafta, solventes em geral.

2. Classe II:

Poeiras Combustíveis ou Condutoras

- Grupo E: metais condutivos como alumínio, magnésio, zinco, titânio e outros. Essas poeiras apresentam a capacidade de conduzir eletricidade.

- Grupo F: materiais como carvão mineral, coque de petróleo ou negro de fumo. Essas poeiras são potencialmente combustíveis.

- Grupo G: poeiras combustíveis que não se enquadram nos critérios dos Grupos E ou F. Pode incluir uma variedade de substâncias, como grãos, farinha, madeira, plásticos, entre outros.

3. Classe III:

Fibras e Partículas Leves e Inflamáveis

- Grupo I: Para minas suscetíveis à liberação de grisu (gás à base de metano);

- Grupo II: Para outros locais, subdividido em IIA, IIB e IIC.

Essas categorias visam estabelecer critérios claros para a identificação e mitigação de riscos em ambientes sujeitos a possíveis explosões, proporcionando diretrizes específicas para a segurança em conformidade com as normas vigentes. Em resumo, temos a tabela a seguir.

3.31.4.7 Classes de temperatura

A temperatura máxima na superfície exposta do equipamento elétrico deve ser mantida abaixo da temperatura de ignição do gás ou vapor presente no ambiente. A classificação dos gases em classes de temperatura é determinada pela temperatura de ignição, estabelecendo que a temperatura máxima na superfície do equipamento, correspondente a cada classe, deve ser inferior à temperatura associada aos gases específicos.

Para a precisa e adequada especificação de um motor destinado a operar em uma área classificada como de risco, é imprescindível obter dados detalhados relacionados à carga, incluindo potência consumida, curva de carga, tipo de acoplamento, inércia, entre outros. Isso se deve ao fato de que a temperatura de ignição de muitos gases e vapores é geralmente baixa em comparação com a temperatura do rotor durante a partida. Além disso, é importante considerar que essa temperatura é grandemente

influenciada pelo tempo de aceleração do motor. Essas informações são cruciais para garantir a segurança e a eficiência operacional, alinhando-se às normas e regulamentos vigentes.

3.31.4.8 Máquinas para área de risco

Os ensaios e a certificação destes equipamentos podem ser conduzidos em laboratórios credenciados pelo INMETRO ou nas instalações do fabricante dos equipamentos. Na segunda opção, é imperativo que os ensaios sejam supervisionados por um Inspetor do Órgão Certificador devidamente credenciado pelo INMETRO.

É necessário que as máquinas fabricadas estejam em acordo com as normas ABNT e IEC, garantindo que os tipos de proteção (a prova de explosão, segurança aumentada, pressurizado e outros) estejam em acordo com as áreas de aplicação, conforme a definição para qual o equipamento foi projetado.

3.31.5 Graus de proteção

Os invólucros dos equipamentos elétricos devem proporcionar um nível específico de proteção, alinhado às características do ambiente de instalação e à acessibilidade dos dispositivos. Por exemplo, equipamentos destinados a locais sujeitos a jatos d'água devem apresentar um invólucro projetado para resistir a esses jatos, considerando valores específicos de pressão e ângulo de incidência, de modo a prevenir a penetração de água.

3.31.5.1 Código de identificação

As normas NBR-6146 e IEC-60034-5 estabelecem os padrões para a classificação dos graus de proteção de equipamentos elétricos, utilizando a notação IP, composta por duas letras seguidas por dois algarismos.

O primeiro algarismo na sequência fornece a indicação do grau de proteção contra a entrada de objetos sólidos externos e contato inadvertido, conforme apresentado na tabela a seguir.

1º ALGARISMO	
ALGARISMO	INDICAÇÃO
0	Sem proteção
1	Corpos estranhos de dimensões acima de 50 mm
2	Corpos estranhos de dimensões acima de 12 mm
3	Corpos estranhos de dimensões acima de 2,5 mm
4	Corpos estranhos de dimensões acima de 1,0 mm
5	Proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor
6	Totalmente protegido contra poeira

O segundo algarismo na classificação indica o nível de proteção contra a entrada de água no interior do motor, conforme especificado pela tabela subsequente.

2º ALGARISMO	
ALGARISMO	INDICAÇÃO
0	Sem proteção
1	Pingos de água na vertical
2	Pingos de água até a inclinação de 15° com a vertical
3	Água de chuva até a inclinação de 60° com a vertical
4	Respingos de todas as direções
5	Jatos d'água de todas as direções
6	Água de vagalhões
7	Imersão temporária
8	Imersão permanente

Como exemplo, vamos considerar a classe de proteção IP65. O primeiro algarismo (6), indica que a máquina possui proteção completa contra toques e proteção completa contra o acúmulo de poeiras nocivas. O segundo algarismo (5), indica proteção contra jatos de água em todas as direções.

3.31.5.2 Tipos usuais de proteção

Embora haja várias combinações possíveis para os algarismos indicativos do grau de proteção,

apenas determinados tipos de proteção são utilizados em condições normais. Esses tipos incluem:

- Grau de Proteção IP 23 ou IP 24 para motores abertos.
- Grau de Proteção IPW55 e IP 65 para motores fechados.

Adicionalmente, algumas letras, quando adicionadas ao grau de proteção, fornecem informações adicionais específicas sobre o motor:

- W (IPW55, IPW24): Proteção contra intempéries.
- R (IPR55): Motor com refrigeração por dutos.
- S (IP23S): Ensaio de proteção contra a entrada de água realizado com o motor desligado.
- M (IP23M): Ensaio de proteção contra a entrada de água realizado com o motor ligado.

3.31.6 Limites de ruído

As normas regulamentam os limites superiores de nível de potência sonora atribuídos a máquinas. Os valores máximos de nível de potência sonora em máquinas elétricas rotativas transmitidos pelo ar, expressos em decibéis (dB), utilizando a escala de ponderação A, podem ser consultados nas Normas IEC 60034-9 e ABNT-NBR 7565.

Como exemplo, podemos considerar uma máquina com grau de proteção IP55 com limite de rotação de: maior que 3150 e menor ou igual a 3750 RPM; e potência nominal maior que 110 e menor ou igual a 220 kVA. Logo, conforme as normais citadas, o nível de potência sonora é de 110 dB.

3.32 Características de desempenho

3.32.1 Elevação de temperatura

3.32.1.1 Aquecimento do enrolamento

A potência útil do gerador é inferior à potência de acionamento, resultando em um rendimento sempre abaixo de 100%. A discrepância entre essas potências representa perdas, as quais

são convertidas em calor. Este calor é gerado no enrolamento do gerador e deve ser dissipado para fora do sistema, a fim de prevenir um aumento excessivo de temperatura. Esse fenômeno ocorre em todas as máquinas elétricas, sendo essencial a eficiente gestão térmica para garantir o desempenho adequado do equipamento. Logo, é adotado o sistema de ventilação adequado, conforme já citado nos tópicos anteriores.

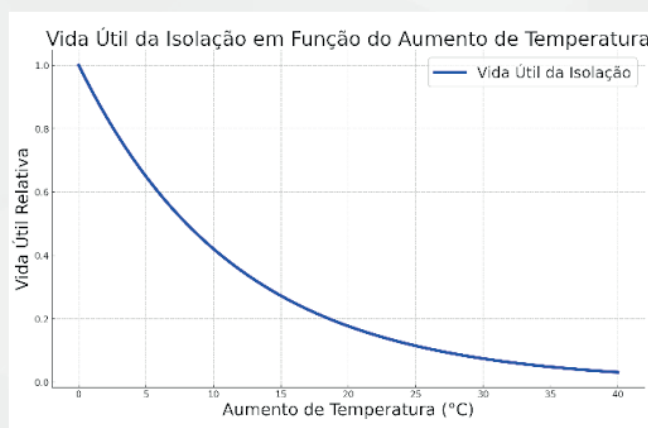
3.32.1.2 Vida útil de máquinas elétricas girantes

A durabilidade da máquina elétrica, excluindo as partes sujeitas ao desgaste por uso, como escovas e rolamentos, está intrinsecamente relacionada ao desempenho do material isolante. Este componente é suscetível a diversos fatores, tais como umidade, vibrações, ambientes corrosivos, entre outros que já vimos até o momento. Contudo, destaca-se a temperatura de operação dos materiais isolantes como o fator mais significativo.

Ao abordarmos a redução da vida útil da máquina, não nos referimos exclusivamente a temperaturas elevadas que levem à queima do isolante e destruição repentina do enrolamento. A depreciação gradual do isolante é um aspecto relevante, manifestando-se quando este se torna ressecado, perdendo sua capacidade isolante progressivamente, até atingir um ponto em que não suporta mais a tensão aplicada, resultando em curto-circuito.

A experiência prática demonstra que a vida útil da isolação é praticamente ilimitada se sua temperatura for mantida abaixo de um limite específico. Acima desse valor, a durabilidade do isolante diminui progressivamente conforme a temperatura de operação se eleva, sendo este limite substancialmente inferior à temperatura de "queima" do material isolante e variando conforme o tipo de material utilizado.

A vida útil da isolação é determinada por curvas que representam as variações nas características dos materiais em relação à temperatura. Essa durabilidade é reduzida pela metade a cada aumento de 8 a 10°C acima da temperatura nominal da classe, conforme representado no gráfico a seguir. Importante ressaltar que essa limitação de temperatura se refere ao ponto mais quente da isolação, não necessariamente abrangendo todo o enrolamento. Um ponto fraco no interior da bobina é suficiente para tornar o enrolamento inutilizado.



Diversos elementos, combinados entre si e em conjunto com a temperatura, desempenham um papel crucial e determinante na vida útil do equipamento, presentes na aplicação individual do motor ou gerador. Estes fatores incluem, mas não limitado:

1. Variação significativa na temperatura do enrolamento, ocorrendo frequentemente durante as condições normais de operação, como exemplificado pelo funcionamento intermitente do motor ao longo do dia.

2. Frequência das partidas: durante o processo de partida, especialmente quando realizada diretamente na rede, ocorre um considerável esforço mecânico nas bobinas devido à elevada corrente que circula pelo cobre. Esse esforço pode resultar na curvatura da cabeça da bobina em direção ao rotor, provocando microfissuras no isolante.

3. Acionamento por Inversor de Frequência: esse método de acionamento proporciona ao motor ondas de tensão com alta frequência e rápida variação de velocidade. Quanto maior a taxa de variação de tensão (dV/dT), maior a demanda sobre o isolamento.

4. Surto de manobra (liga/desliga) ou de origem atmosférica: durante as operações de ligar ou desligar, ocorre um transitório de tensão sobre o enrolamento do motor, com amplitude significativamente superior à tensão nominal. Descargas atmosféricas na rede elétrica podem também gerar picos de tensão, impactando adversamente o isolante.

3.32.1.3 Classe de isolamento

Conforme mencionado anteriormente, a determinação do limite de temperatura está intrinsecamente ligada ao material empregado. Com o propósito de estabelecer normas, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento (formados pela combinação de diversos materiais) são categorizados

em CLASSES DE ISOLAMENTO. Cada classe é definida pelo seu respectivo limite de temperatura, ou seja, pela temperatura máxima que o material pode sustentar continuamente sem comprometer sua vida útil.

As classes de isolamento adotadas em máquinas elétricas, de acordo com a NBR-7094, e seus respectivos limites de temperatura são as seguintes:

- Classe A (105°C)
- Classe E (120°C)
- Classe B (130°C)
- Classe F (155°C)
- Classe H (180°C)

Destaca-se que a Classe F é frequentemente empregada em máquinas de alta tensão.

3.32.1.4 Medida da temperatura do enrolamento

A mensuração da temperatura do enrolamento por meio de termômetros ou sensores de temperatura apresenta desafios significativos, dado que a temperatura varia de forma não uniforme ao longo do enrolamento, tornando incerta a proximidade do ponto de medição em relação ao ponto mais quente. O método convencional e mais confiável para aferir a temperatura de um enrolamento é através da variação da resistência ôhmica em função da temperatura, explorando a propriedade dos condutores de modificar sua resistência.

A determinação do aumento da temperatura utilizando o método da resistência para condutores de cobre é realizada mediante a aplicação da seguinte fórmula:

$$D_t = t_2 - t_a = [(R_2 - R_1) / R_1] \cdot (235 + t_1) + (t_1 - t_a)$$

Onde:

D_t = elevação de temperatura;

t_2 = temperatura dos enrolamentos no fim do ensaio;

t_a = temperatura do meio refrigerante no fim do ensaio;

t_1 = temperatura do enrolamento antes do ensaio, praticamente igual à do meio refrigerante, medida por termômetro;

R_1 = resistência do enrolamento antes do ensaio;

R_2 = resistência do enrolamento no fim do ensaio.

Outra abordagem amplamente empregada na medição da elevação de temperatura é por meio de sensores do tipo RTD (Resistência Térmica de Detecção), conhecidos como PT100. O princípio de operação desses sensores é idêntico, uma vez que consistem em resistências calibradas que variam linearmente em função da temperatura.

Esse método possibilita a detecção da temperatura no ponto mais quente do enrolamento, visto que os sensores são posicionados no centro do conjunto de lâminas do estator, entre as duas camadas de bobinas da ranhura. Por outro lado, a abordagem baseada na resistência do enrolamento considera a temperatura média do enrolamento.

3.32.1.5 Temperatura máxima dos enrolamentos

A temperatura do ponto mais elevado do enrolamento deve ser controlada de modo a não ultrapassar o limite estabelecido para a classe correspondente. A temperatura total é obtida somando-se a temperatura ambiente à elevação de temperatura (Δt), adicionando a diferença entre a temperatura média do enrolamento e a do ponto mais quente.

As normas relacionadas a máquinas elétricas estipulam a máxima elevação de temperatura (Δt), restringindo assim a temperatura máxima do ponto mais quente. Essa limitação é baseada em considerações específicas:

1. A temperatura ambiente não deve exceder 40°C, conforme norma. Condições de trabalho acima desse limite são consideradas especiais.

2. A diferença entre a temperatura média e a do ponto mais quente é estabelecida em norma. Para as classes A e E, esse valor é de 5°C, para a classe B é de 10°C, e para as classes F e H é de 15°C. Essa variação é relativamente consistente entre diferentes máquinas elétricas.

As normas para máquinas elétricas também definem limites máximos para a temperatura ambiente e especificam valores máximos de elevação de temperatura para cada classe de isolamento. Dessa maneira, a temperatura do ponto mais quente é indiretamente controlada.

Os valores numéricos e a composição da temperatura admissível para o ponto mais quente estão detalhados na tabela abaixo.

Classe de Isolamento (em °C)	A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	40	40	40	40	40
Δt = Elevação de temperatura (método de resistência)	60	75	80	100	125
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	5	5	10	15	15
Total: temperatura do ponto mais quente	105	120	130	155	180

3.32.2 Regime de serviço

O nível de regularidade da carga imposta a uma máquina é denominado como seu regime de operação. As máquinas convencionais são concebidas para operação em regime contínuo, caracterizado por uma carga constante ao longo de um período indefinido, equivalente à potência nominal da máquina.

Em situações em que a carga permanece constante ou varia de maneira previsível, o regime pode ser expresso numericamente ou através de gráficos que ilustram a variação das grandezas em função do tempo. Quando a sequência real dos valores temporais é indeterminada, é necessário indicar uma sequência fictícia que seja no mínimo tão rigorosa quanto a situação real.

3.32.2.1 Regimes padronizados para motores

Vamos citar os regimes a seguir, considerando as características para motores.

a) Regime contínuo (S1)

Operação sob carga constante por um período suficiente para atingir o equilíbrio térmico. Exemplos incluem bombas, compressores e esteiras transportadoras. Refere-se a todas as cargas que mantêm

uma rotação constante e apresentam pouca variação de carga após o acionamento.

b) Regime por tempo limitado (S2)

Operação sob carga constante por um intervalo de tempo inferior ao requerido para alcançar o equilíbrio térmico, sucedida por um período de repouso com duração adequada para restaurar a uniformidade de temperatura com o meio refrigerante. Exemplifica-se tal procedimento em dispositivos como motores de emergência, unidades hidráulicas e bombas de incêndio.

c) Regime intermitente periódico (S3)

Caracterizado por uma sucessão de ciclos uniformes, cada um compreendendo uma fase de operação sob carga constante e um intervalo de repouso, sendo esses intervalos de curta duração não suficientes para o alcance do equilíbrio térmico ao longo de um ciclo operacional. Adicionalmente, destaca-se que a corrente inicial não exerce influência significativa na elevação da temperatura durante o referido ciclo de regime.

d) Regime intermitente periódico com partidas (S4)

Caracterizado por sequência de ciclos de regime idênticos, cada um composto por um período de partida, um período de operação com carga constante e um intervalo de repouso, sendo esses intervalos de curta duração não suficientes para o alcance do equilíbrio térmico. Utilizados em várias aplicações, incluindo sistemas de elevação, ventilação e climatização, máquinas industriais, sistemas de bombeamento e veículos elétricos.

e) Regime intermitente periódico com frenagem elétrica (S5)

Caracterizado por sequência de ciclos de operação idênticos, cada um composto por um período de partida, um período de operação sob carga constante, um período de frenagem elétrica e um período de repouso, sendo esses intervalos de curta duração não suficientes para o alcance do equilíbrio térmico. Como exemplos, podemos citar ponte rolante e guindastes.

f) Regime de funcionamento contínuo com carga intermitente (S6)

Caracterizado por uma sucessão de ciclos de regime idênticos, cada um composto por um período de operação sob carga constante seguido por um intervalo de operação sem carga, sem a presença de períodos de repouso. Como exemplos de aplicação, temos: laminadores, picadores, misturadores e centrífugas.

g) Regime de funcionamento contínuo com frenagem elétrica (S7)

Caracterizado por sequências de ciclos de regime idênticos, cada um composto por um período de partida, um período de operação em carga constante e um período de frenagem elétrica, sem a presença de um intervalo de repouso. Como exemplo: laminadores e tesouras.

h) Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade (S8)

Definido por uma sucessão de ciclos compostos por regimes idênticos, cada ciclo compreendendo um período de partida seguido por um período de operação em carga constante, associada a uma velocidade de rotação previamente estabelecida. Esses são seguidos por um ou mais períodos de operação em outras cargas constantes, correspondendo a diferentes velocidades de rotação. Não há intervalo de repouso durante o processo.

Podemos observar nos sistemas operacionais S3 e S8, que frequentemente ocorre um período de curta duração não suficientes para o alcance do equilíbrio térmico, resultando em ciclos de aquecimento e resfriamento parciais do motor em cada iteração. Após um extenso número de ciclos, o motor alcança uma faixa estabilizada de elevação de temperatura e equilíbrio térmico.

i) Regimes especiais

Nos casos em que a carga apresenta variações ao longo dos períodos operacionais, incluindo situações de reversão ou frenagem por contracorrente, a seleção apropriada do motor requer uma abordagem consultiva junto ao fabricante, considerando uma descrição completa do ciclo. Aspectos a serem considerados incluem:

- Potência necessária para acionar a carga, sendo necessário considerar variações conforme um gráfico de potência requerida durante o ciclo;

- Conjugado resistente da carga;
- Momento de inércia total ($GD^2/4$ ou J) da máquina acionada, referenciado à sua rotação nominal;
- Número de partidas, reversões, frenagens por contracorrente, entre outros;
- Duração dos períodos em carga e em repouso ou vazio.

3.32.2 Regimes padronizados para geradores

Vamos citar os regimes a seguir, considerando as características para geradores.

Vale destacar que no caso de geradores, o regime utilizado tem uma atenção especialmente voltado para a diferença de temperatura entre o bobinado e a temperatura ambiente que chamamos de delta T (ΔT). Isso serve para definir a classe de isolamento dos isolantes dos enrolamentos, bem como os limites de temperatura máxima de operação.

a) Potência contínua (COP)

Temperatura ambiente de 40 °C e delta T (ΔT) igual a 125 °C. O alternador opera fornecendo carga constante durante operação isolada ou em paralelo com a rede principal, com um fator de carga de 100% por um número ilimitado de horas anuais. Não é permitida a ocorrência de sobrecarga dentro deste regime operacional.

B) Prime por tempo limitado (LTP)

Temperatura ambiente de 40 °C e delta T (ΔT) igual a 125 °C. O alternador opera fornecendo carga constante durante um número pré-determinado de horas anuais, conforme estipulado pelas normas específicas. Este equipamento é recomendado para aplicações em que as interrupções no fornecimento de energia são planejadas, com um limite máximo de operação de 500 horas por ano.

c) Prime por tempo ilimitado (PRP)

Temperatura ambiente de 40 °C e delta T (ΔT) igual a 150 °C. O alternador opera fornecendo carga variável durante um número ilimitado de horas anuais, em situações em que a rede comercial não está disponível ou não é considerada confiável. Nesse regime operacional específico, é estabelecido que a potência média não deve ultrapassar 70% da

potência nominal principal. Adicionalmente, o alternador é projetado para suportar uma sobrecarga de até 10% por um período não superior a 1 hora a cada 12 horas de operação, limitando-se a um máximo de 25 horas por ano.

d) Potência de emergência Standby (ESP)

Temperatura ambiente de 40 °C e delta T (ΔT) igual a 150 °C. O alternador opera com a função de reserva de energia, fornecendo alimentação a cargas de natureza variável durante emergências em áreas abastecidas pela rede comercial ou outra fonte principal de energia. É exigido que a potência média da carga não ultrapasse 70% da capacidade de emergência, e a duração do fornecimento de energia está sujeita a limitações conforme estipulado em norma.

e) Potência de emergência Standby (ESP)

Temperatura ambiente de 27 °C e delta T (ΔT) igual a 163 °C. Essa situação assemelha-se ao estado de emergência para 40 °C, no entanto, a temperatura ambiente máxima aceitável é estabelecida em 27 °C, e conseqüentemente temos o delta T distinto.

3.32.2.3 Designação do regime tipo

O 'regime tipo' refere-se à identificação ou especificação do padrão ou regime de funcionamento de determinado sistema, dispositivo ou processo. No contexto técnico de máquinas elétricas, essa designação é utilizada para descrever as características operacionais específicas que regem o desempenho e/ou comportamento da máquina.

A designação do tipo de regime a ser utilizado é seguido de indicações. Como por exemplo, no caso de regimes anteriormente vistos para motores, temos:

I - S2 refere-se ao período de operação durante carga constante;

II - S3 a S6 estão relacionados ao fator de duração do ciclo;

III - S8 aborda cada uma das velocidades nominais que compõem o ciclo, acompanhadas pela potência nominal correspondente e seu respectivo tempo de operação.

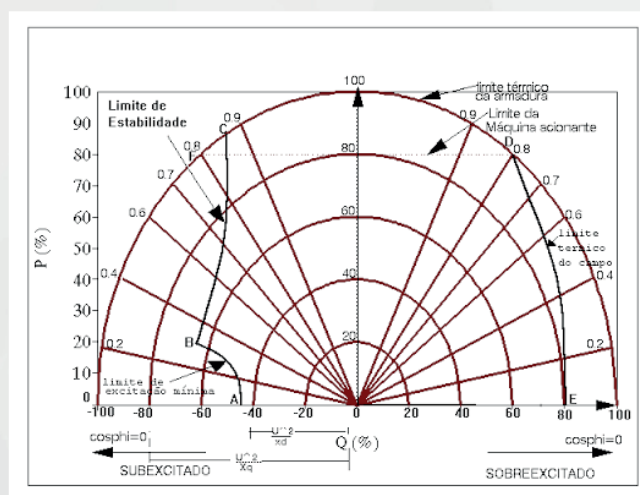
IV - Nos regimes S4, S5, S7 e S8, eventuais complementos à designação devem ser determinados mediante consenso entre o fabricante e o comprador.

Como exemplo das prescrições a serem adicionadas às denominações de regimes distintos do contínuo, destacam-se as seguintes, aplicáveis em conformidade com o regime considerado: taxa de partidas por hora; taxa de frenagens por hora; categoria de frenagens; constante de energia cinética (H) a velocidade nominal, do motor e da carga, podendo ser substituída pelo fator de inércia (FI).

Vale destacar que a Constante de Energia Cinética (H) representa a relação entre a energia cinética (armazenada no rotor à velocidade nominal de rotação) e a potência aparente nominal. O Fator de Inércia (FI) é a relação entre a soma do momento de inércia total da carga (referido ao eixo do motor) e o momento de inércia do rotor.

3.32.3 Diagrama de carga

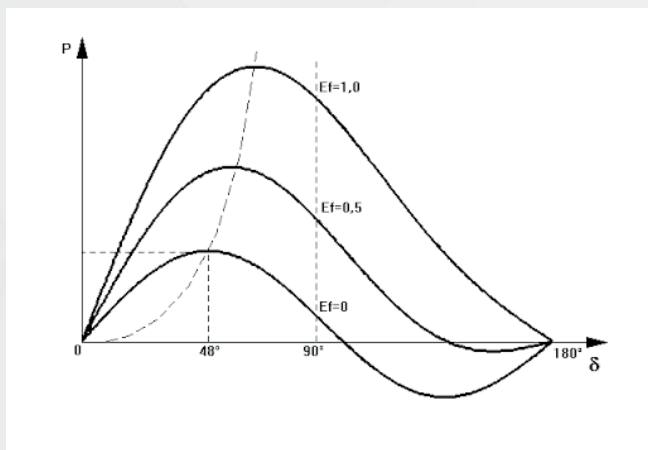
Para operar um gerador com segurança, é imperativo compreender os parâmetros que regem seus limites operacionais. Tais limites são estabelecidos considerando a potência do equipamento motriz, a estabilidade operacional, a excitação do campo e o limite térmico do gerador. O exame dessas condições é conduzido por meio da análise do diagrama de carga, apresentado na figura subsequente. Este diagrama permite a delimitação da região na qual o gerador pode operar, possibilitando assim a avaliação das condições operacionais da máquina.



Cabe ressaltar que a construção detalhada do diagrama não será objeto de abordagem neste curso. Com base exclusivamente nos diagramas obtidos, serão apresentados comentários concernentes aos limites identificados no gráfico.

O limite associado à máquina motriz é determinado pela potência efetiva fornecida pelo gerador, estando este último submetido às restrições impostas pela máquina primária (representada pela linha F-D no gráfico).

Já o limite de estabilidade é estabelecido pela curva B-C, que define a potência máxima em relação ao ângulo de carga máximo (δ), conforme ilustrado na Figura abaixo.



Ao alcançar o estado de excitação nula, a potência resultante será exclusivamente influenciada pelo conjugado de relutância, sendo sua variação diretamente proporcional ao dobro do ângulo de carga δ . Para excitação nula, o ângulo de carga atinge 45° para a potência máxima, sendo esse ponto de limite evidenciado na curva A-B. A capacidade térmica da armadura é condicionada pelas perdas no estator e pela eficiência do sistema de ventilação da máquina. As perdas predominantes são atribuídas às perdas joule, resultantes da corrente de armadura (representada pela curva C-D). Já o limite térmico do rotor é delineado pela corrente de excitação, ocorrendo na região de carga indutiva, demandando excitações substanciais (curva D-E).

O gerador deve demonstrar competência em operar com uma variação de $\pm 10\%$ na tensão. A diminuição da tensão impacta negativamente na capacidade de fornecer potência reativa capacitiva, resulta no aumento da temperatura do estator e promove o incremento do ângulo de carga. Por outro lado, o aumento da tensão propicia maior estabilidade (carga capacitiva), reduzindo o ângulo de potência e incrementando a temperatura do enrolamento de excitação. Para garantir a operação segura do gerador, é imperativo que todos os pontos de operação estejam contidos na região interna do diagrama de carga, respeitando a máxima potência ativa e reativa.

Nota-se no gráfico que a principal restrição se encontra na área de cargas capacitivas, as quais, no entanto, não representam condições operacionais.

Os geradores de baixa tensão encontram sua aplicação primordial na alimentação de equipamentos industriais ou em contextos específicos, como em telecomunicações, onde as cargas são predominantemente indutivas e não lineares. Nessas circunstâncias, o gerador operará sob forte excitação. O limite de carga capacitiva é essencial para grandes geradores conectados a longas linhas de transmissão abertas, uma vez que essas linhas assumem características capacitivas em determinados períodos de operação.

3.32.4 Análise espectral de correntes

A análise espectral de correntes em máquinas elétricas refere-se ao processo de decomposição dessas correntes em suas componentes fundamentais, identificando as frequências associadas a cada componente. Essa abordagem é essencial para compreender o comportamento dinâmico e as características operacionais de máquinas elétricas.

Para realizar a análise espectral, utiliza-se comumente a Transformada de Fourier, que converte um sinal no domínio do tempo em seu equivalente no domínio da frequência. No contexto das máquinas elétricas, a análise espectral de correntes proporciona insights valiosos sobre fenômenos como desequilíbrios, distorções harmônicas, e ressonâncias que podem surgir durante o funcionamento.

A interpretação dos resultados da análise espectral requer conhecimento técnico avançado, pois a presença de determinadas frequências pode indicar diferentes tipos de problemas. Essa abordagem é particularmente valiosa em ambientes industriais, contribuindo para a manutenção preditiva, otimização do desempenho e aumento da confiabilidade das máquinas elétricas.

3.32.5 Operação em paralelo de geradores

Durante a operação de um gerador, há a necessidade de exigência tanto em sua potência nominal quanto em valores inferiores a essa nominal. Quando o gerador é pouco utilizado, ocorre a diminuição tanto de seu rendimento quanto da eficiência

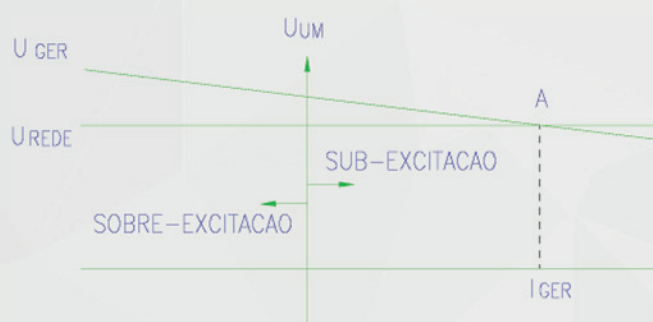
da máquina de acionamento. Por diversos motivos, incluindo a busca por maior confiabilidade no fornecimento de energia, a opção pela operação em paralelo de geradores pode ser adotada.

Ao realizar a conexão de geradores em paralelo, é imperativo observar os seguintes critérios:

1. As tensões dos geradores a serem conectados devem ser idênticas.
2. Os ângulos de fase das tensões dos geradores devem ser iguais.
3. As frequências das tensões dos geradores devem coincidir.
4. A ordem de sequência das fases nos pontos a serem conectados deve ser a mesma.

Essas considerações aplicam-se igualmente à conexão em paralelo de geradores com a rede. No contexto de ligação em paralelo, a distribuição da potência ativa é influenciada pelo conjugado acionante (máquina primária), enquanto a distribuição da potência reativa depende da excitação de cada gerador.

Observa-se uma tendência de queda na rotação das máquinas acionantes com o aumento da potência ativa, proporcionando uma distribuição estável da potência ativa. Da mesma forma, para garantir uma distribuição estável de potência reativa, é essencial reduzir a excitação do gerador, promovendo um aumento nos reativos. Esta relação é ilustrada na figura abaixo, onde a curva característica da tensão demonstra um decréscimo correspondente.

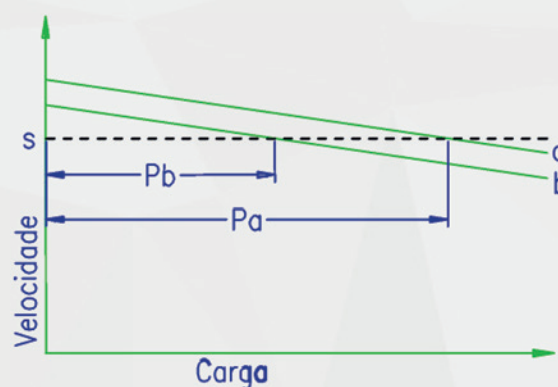


Para reduzir a excitação no gerador, visando uma distribuição adequada de reativos, é necessário fornecer ao regulador um sinal de corrente com componente reativa. Esse objetivo é alcançado mediante a utilização de um transformador de corrente (TC) externo, instalado na fase do gerador onde o regulador não está tomando a referência.

3.32.5.1 Divisão de potência ativa (W)

Para dois geradores em operação simultânea e em paralelo, a variação da carga resulta em uma correspondente redução em suas velocidades, impactando os sistemas de controle de velocidade das máquinas primárias. Os reguladores de velocidade são acionados para restaurar a velocidade nominal, sendo a distribuição de carga entre os geradores determinada pelas propriedades dos reguladores de velocidade das máquinas primárias.

Quando um sistema apresenta características de velocidade do tipo "a" e outro do tipo "b", conforme ilustrado na figura abaixo, a distribuição de carga entre eles ocorrerá na proporção P_a e P_b quando operando a uma velocidade S . O controle de carga em cada unidade é alcançado por meio da ajustagem das características do regulador de velocidade, seja "para cima" ou "para baixo".



3.32.5.2 Divisão de potência reativa (VAR)

A tensão aplicada a uma carga conectada a dois geradores é influenciada pela excitação total desses geradores. No caso de geradores idênticos, com reguladores de velocidade em suas máquinas primárias e características equivalentes, a distribuição de cargas ativas é compartilhada de maneira uniforme. Além disso, se os geradores possuírem a mesma excitação, a divisão de volt-ampères reativos (VAR) também será equitativa. Dessa forma, cada gerador opera com o mesmo fator de potência (FP).

Qualquer aumento na excitação de um dos geradores resultará em um aumento na tensão do sistema, fazendo com que esse gerador forneça uma parcela maior de VAR. Por outro lado, uma diminuição na excitação do outro gerador fará com que a

tensão terminal retorne ao valor original, mas a discrepância na divisão de VAR será ampliada.

Consequentemente, os ajustes na excitação dos geradores não apenas determinam a tensão aplicada à carga, mas também afetam a distribuição de VAR entre os geradores.

3.33 Característica de partida

Na partida de motores elétricos, técnicas como a partida estrela-triângulo são frequentemente empregadas para mitigar picos de corrente e minimizar o impacto inicial no sistema de energia. Essa abordagem visa reduzir a corrente de partida, promovendo uma transição suave para o pleno funcionamento do motor.

No contexto dos geradores, o desafio reside em assegurar uma partida eficaz enquanto se mantém a estabilidade da tensão. A corrente inicial deve ser suficiente para energizar o sistema, mas também é crucial evitar flutuações prejudiciais na tensão durante esse processo crítico.

Assim, a partida de máquinas implica considerações distintas para motores e geradores, demandando estratégias técnicas específicas para equilibrar as necessidades operacionais e garantir a eficiência e estabilidade do sistema elétrico.

Nesse tópico, vamos focar especialmente em comportamento de motores, adotando sistemas de partidas.

3.33.1 Limitação de corrente de partida

Sempre que viável, a partida de um motor trifásico de gaiola deverá ser efetuada diretamente na rede ou à plena tensão, por intermédio de contatores a vácuo e/ou disjuntores. É imperativo considerar que, para um motor específico, as curvas de conjugado e corrente permanecem constantes (sendo determinadas pela parte física do motor), independentemente das dificuldades de partida, desde que a tensão se mantenha constante.

Em situações em que a corrente de partida do motor é substancial, podem surgir as seguintes consequências adversas:

I - Significativa queda de tensão no sistema de alimentação da rede, ocasionando interferências nos equipamentos instalados neste sistema;

II - Necessidade de sobredimensionamento do sistema de alimentação (cabos, chaves, proteção, transformador), acarretando aumento nos custos;

III - Restrições impostas pelas concessionárias de energia elétrica que limitam a queda de tensão na rede.

Caso a partida direta na rede não seja viável devido aos problemas mencionados anteriormente, é possível empregar sistemas de partida indireta para reduzir a corrente de partida. Esses sistemas de partida indireta (com tensão reduzida, variação de frequência ou resistência) incluem: chave estrela-triângulo; chave compensadora ou autotransformador; chave de partida estática ou soft-start; inversor de frequência; e reostato para motores de anéis. Vamos abordar cada um desses sistemas de partida indireta com mais detalhes a seguir.

3.33.2 Chave Estrela-Triângulo

É imprescindível que o motor destinado à aplicação da partida com chave estrela-triângulo possua a capacidade de operar em dupla tensão, especificamente nas faixas de 1350/2300V, 2400/4160V ou 3800/6600V. Cada motor deve dispor de, no mínimo, seis bornes de ligação, sendo as entradas e saídas dos enrolamentos principais.

A utilização da partida estrela-triângulo é viável quando a curva de conjugados do motor atinge um nível suficientemente elevado para assegurar a aceleração da máquina com redução de corrente. Durante a configuração em estrela, o conjugado é reduzido entre 25 e 33% do valor na partida, e a corrente de partida é reduzida para 33% do valor na configuração triângulo. Portanto, em casos em que a partida estrela-triângulo é necessária, é essencial empregar um motor com uma curva de conjugado de partida elevada.

O método de acionamento estrela-triângulo é pouco empregado em motores de média e alta tensão.

3.33.3 Chave compensadora (Autotransformador)

Esse sistema de partida é uma abordagem técnica que envolve o uso de uma chave compensadora que atua como um dispositivo de controle e proteção durante o processo de partida do motor. A chave compensadora é especialmente projetada para minimizar os efeitos adversos associados ao aumento súbito de corrente durante a partida.

Este sistema visa atenuar os picos de corrente que ocorrem quando um motor elétrico é ligado, mitigando assim o impacto negativo na rede elétrica e nos componentes do motor. A chave compensadora incorpora dispositivos de controle, como resistores ou reatores, que são temporariamente inseridos no circuito durante a partida para limitar a corrente inicial.

Além disso, a utilização desse sistema proporciona benefícios adicionais, como a redução do desgaste mecânico e térmico nos componentes do motor, contribuindo para uma operação mais eficiente e duradoura. Em ambientes industriais e comerciais, onde a demanda por controle preciso e eficiência energética é crucial, a implementação do sistema de partida por chave compensadora é uma escolha estratégica para otimizar o desempenho dos motores elétricos.

3.33.4 Partida Estática ou Soft-Starter

A partida estática é um método de acionamento de motores elétricos que prescinde do uso de dispositivos mecânicos convencionais, como contatores. Em vez disso, recorre a componentes semicondutores, como tiristores, para controlar suavemente a alimentação do motor durante o início. Essa abordagem visa evitar picos de corrente e reduzir o estresse mecânico associado à partida direta. Dentro desse contexto mais amplo de partida estática, destaca-se a soft-starter, um dispositivo específico projetado para realizar partidas suaves em motores elétricos.

O progresso da eletrônica possibilitou o desenvolvimento da chave de partida de estado sólido, composta por pares de tiristores (SCR) ou combinações de tiristores/diodos, dispostos em cada terminal de potência do motor. O ângulo de disparo de cada par de tiristores é eletronicamente controlado para fornecer uma tensão variável nos terminais do motor

durante o processo de "aceleração". Esse comportamento é comumente denominado "partida suave" (soft-starter).

Ao término do período de partida, ajustável conforme a aplicação, a tensão atinge seu valor pleno por meio de uma aceleração gradual ou uma rampa ascendente, evitando assim incrementos ou "saltos" abruptos, como observado em métodos de partida convencionais, como autotransformador e ligação estrela-triângulo. Esse procedimento possibilita a manutenção da corrente de partida próxima à nominal, apresentando uma variação suave, conforme desejado. O limite de corrente permitido no motor é determinado pela aplicação e pelo projeto do motor.

Além do controle preciso da tensão (e, por conseguinte, da corrente) durante a partida, a chave de partida eletrônica oferece a vantagem adicional de ausência de partes móveis ou componentes geradores de arco elétrico, como é o caso das chaves mecânicas. Esta característica representa uma das principais vantagens das chaves eletrônicas, uma vez que sua vida útil é consideravelmente prolongada, permitindo um elevado número de manobras, podendo alcançar até centenas de milhões de ciclos operacionais.

3.33.5 Partida com inversor de frequência

Ao longo de um extenso período, os motores de corrente alternada (CA) foram exclusivamente empregados em aplicações que demandavam velocidade constante. Tradicionalmente associado a bombas, ventiladores e compressores, o controle de vazão era conduzido mecanicamente por meio de práticas como o estrangulamento de válvulas e abafadores. A busca por variação de velocidade impeliu a escolha de motores de corrente contínua (CC), em conjunto com turbinas e motores de combustão interna.

Entretanto, o cenário evoluiu substancialmente com o advento de acionamentos de velocidade variável, notáveis por sua confiabilidade e custo efetivo, modificando rapidamente esses procedimentos estabelecidos. Esses acionamentos, responsáveis por regular a velocidade do motor mediante o controle de tensão e frequência da rede elétrica, ampliaram consideravelmente a aplicabilidade e desempenho dos motores de corrente alternada.

O uso de controles de frequência ajustável, embora apresente efeitos positivos, impacta de maneira significativa o projeto, desempenho e confiabilidade dos motores CA. Velocidades mais baixas, por exemplo, resultam em ciclos reduzidos, minimizando a fadiga em rolamentos, ventoinhas e outros componentes rotativos. A implementação de "Partida Suave" elimina os elevados esforços iniciais nos enrolamentos do estator e barras do rotor, comuns quando a partida é efetuada diretamente na rede.

É válido ressaltar que acionamentos de frequência ajustável, quando aplicados adequadamente, podem impactar positivamente a vida útil do motor. Contudo, alguns fatores cruciais devem ser considerados, sendo esses devidamente definidos, administráveis e abordados a seguir. A ocorrência de problemas durante a instalação desses acionamentos será significativamente reduzida se esses fatores forem adequadamente considerados na fase inicial de especificação técnica.

Aspectos adicionais a serem ponderados na especificação de motores com velocidade variável são: tensão de "Modo Comum"; harmônicas; frequências de chaveamento e ondas estacionárias; faixa de velocidade; e aspectos na partida.

a) Tensão de 'Modo Comum'

Quando operado em configuração direta à rede elétrica, o motor é alimentado pela tensão trifásica de entrada. Em presença de uma fonte de alimentação trifásica regular (equilibrada), a soma vetorial de todos os vetores de fase é nula, resultando em um neutro estacionário, geralmente mantido aterrado. No contexto de um motor acionado por Inversor de Frequência, a fonte de alimentação é uma ponte retificadora trifásica. Durante a operação, apenas duas fases conduzem simultaneamente, resultando em uma soma vetorial não nula. O ponto central do Link CC (Corrente Contínua) desloca-se, apresentando valores de tensão positivos e negativos em relação à terra (tensão de "Modo Comum"), cujas magnitudes variam conforme o ângulo de disparo da ponte retificadora.

A magnitude da tensão de Modo Comum em cada perna da ponte pode atingir metade da tensão nominal Fase-Neutro. Portanto, a tensão total aplicada nas fases do motor, quando alimentado por um conversor CA-CA, pode ser equivalente a duas vezes a tensão nominal de fase.

b) Harmônicas

Os impactos decorrentes das harmônicas produzidas durante o processo de acionamento possuem a capacidade de influenciar significativamente a operacionalidade, durabilidade e eficiência do motor. Esses efeitos podem ser categorizados em três domínios distintos: térmico, dielétrico e mecânico.

As harmônicas de corrente representam aditivos à componente fundamental da corrente elétrica, resultando assim na geração de calor suplementar nos enrolamentos do motor. Mesmo quando a distorção de corrente atinge um valor de 30% (trinta por cento) em um motor, o acréscimo de calor não ultrapassa 8% (oito por cento), principalmente devido ao comportamento dos enrolamentos do motor, que se assemelham a um filtro.

É imperativo que o fornecedor do sistema de acionamento forneça ao fabricante do motor informações detalhadas sobre as harmônicas geradas. Essa prática é essencial para permitir que o motor seja adequadamente projetado, com capacidade suficiente de absorção e dissipação de calor, a fim de compensar quaisquer perdas adicionais devido às harmônicas ou aquecimentos suplementares. Um motor operando com velocidade variável por meio de um inversor de frequência deve aderir aos mesmos padrões de elevação de temperatura que um motor operando com uma forma de onda senoidal pura.

As harmônicas de corrente também podem resultar em maior emissão de ruído audível. Portanto, é necessário que os motores demonstrem conformidade com os limites de níveis de ruído quando acionados por inversores estáticos de frequência. Além disso, as harmônicas contribuem para o fenômeno conhecido como "Torque Pulsante". Esse torque pulsante induz excitações torcionais que podem ter consequências destrutivas se não forem adequadamente mitigadas.

Em situações extremas, a amplitude da pulsação pode ser suficientemente significativa para gerar contra torques. Aplicações em que há baixa inércia, como bombas centrífugas diretamente acopladas, geralmente apresentam pouco risco. No entanto, em aplicações envolvendo ventiladores ou compressores de alta velocidade com redutores de alta inércia, o risco potencial é elevado. Essa condição perigosa pode ser analisada e prevenida com segurança.

Uma análise torcional é rotineiramente conduzida nos elementos críticos do trem de acionamento. Em sistemas de acionamento de velocidade variável, elementos adicionais devem ser incorporados para análise, incluindo o Torque Pulsante. As magnitudes desse fenômeno e a fadiga resultante podem ser calculadas, e em certos casos, pode ser necessário modificar o diâmetro do eixo e os fatores de concentração de tensões para evitar falhas por fadiga nos elementos do trem de acionamento.

c) Frequências de chaveamento e ondas estacionárias

Além do potencial em geração de calor adicional, as características das ondas de acionamento podem ter impactos diretos no sistema de isolamento dos motores. Todos os acionamentos estáticos fazem uso de dispositivos eletrônicos de chaveamento em sua seção de inversão. A operação de chaveamento (ligar e desligar) resulta na produção de picos e transientes de tensão e corrente, os quais afetam de maneira diversificada o isolamento do motor.

Os picos de tensão ou elevados valores de dV/dt (taxa de variação da tensão em relação ao tempo), causados pela frequência de chaveamento, exercem influência na vida útil dos enrolamentos do motor. A frequência e a amplitude dessas ocorrências têm efeitos significativos na durabilidade do isolamento e na provável natureza de possíveis falhas.

Uma abordagem conservadora e equitativa seria solicitar que o fabricante do acionamento especifique quaisquer requisitos adicionais de isolamento ao fabricante do motor (considerando que a utilização de filtros encareceria demasiadamente o inversor). Quando necessário, geralmente em comprimentos superiores a 20 metros, o usuário deve fornecer ao fabricante do inversor/motor os comprimentos estimados dos cabos. Isso se deve ao fato de que, a partir desse comprimento, o aumento da capacitância da linha em relação à terra propicia a amplificação (por meio do fenômeno da reflexão) dos picos de tensão, os quais podem comprometer o isolamento do motor. Esse efeito pode ser mitigado pela incorporação de filtros reativos na saída do conversor ou pelo aumento do isolamento das bobinas do motor.

d) Faixa de velocidade

Apesar de a inércia não apresentar um desafio para motores com partida suave, ela se revela uma consideração crucial no acionamento. No contexto de aplicações com centrífugas, é imperativo que tanto o motor quanto o acionamento sejam projetados para atender às condições de máxima velocidade operacional.

Para cargas alternadas (ou outras cargas com torque constante, como extrusoras, britadores e determinados tipos de sopradores e compressores), o dimensionamento adequado deve contemplar as condições de velocidade mínima operacional.

De uma perspectiva lógica e pragmática, é essencial fornecer dados reais de carga a todos os fornecedores de motores, garantindo que o motor possa iniciar, acelerar a carga e operar dentro dos limites especificados de temperatura sob todas as condições de operação.

Na maioria das aplicações com velocidade variável, a máxima velocidade operacional se aproxima ou atinge a rotação nominal de um motor padrão conectado diretamente à rede elétrica. Operações em baixa velocidade podem não apresentar os mesmos desafios de integridade mecânica observados em operações em alta velocidade, mas certamente compartilham questões relacionadas a mancais, lubrificação e refrigeração.

A velocidade mínima de operação deve ser claramente especificada na Especificação ou na Folha de Dados, considerando a íntima relação entre o sistema de refrigeração do motor e sua rotação. Operar na velocidade crítica pode resultar em níveis elevados de vibração, potencialmente causando falhas por fadiga nos componentes do trem de acionamento. Para mitigar esse risco, é crucial especificar uma máquina que não possua qualquer frequência crítica dentro da faixa de operação desejada ou programar o inversor de frequência para evitar essa rotação.

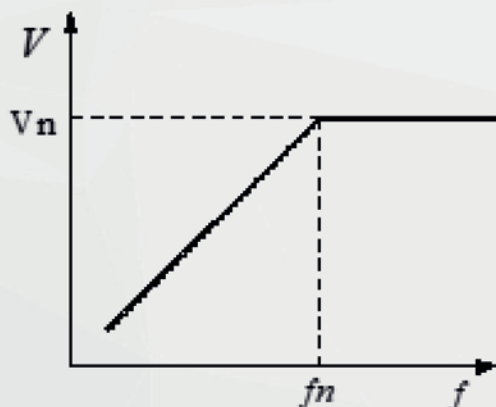
Embora seja uma solução comum para a maioria das aplicações com motores de 04 polos e maiores, na faixa de 50% a 100% da velocidade, essa abordagem pode apresentar desafios significativos em motores de 02 polos ou em faixas mais amplas de variação de velocidade. Em motores maiores, de alta velocidade, essas soluções podem ser onerosas ou indisponíveis. A utilização de motores com frequências críticas na faixa de operação é viável se apresentarem uma resposta em frequência bem amortecida. Alternativamente, o controle pode ser bloqueado

para operações em frequências específicas, o que, por sua vez, limita a flexibilidade operacional do acionamento.

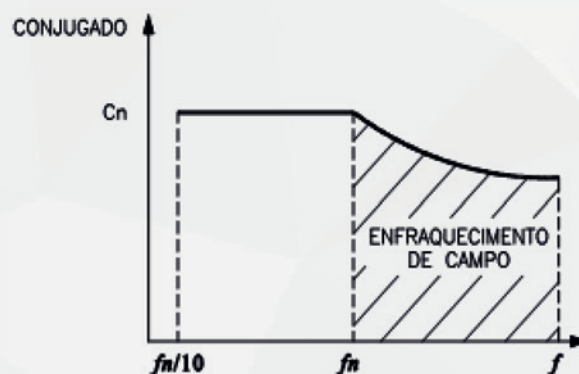
e) Aspectos na partida

Um aspecto vantajoso na operação de motores equipados com sistemas de acionamento de frequência variável reside na implementação de partidas suaves. As configurações típicas dos dispositivos de acionamento são ajustadas de modo a restringir a corrente do motor a 100% de sua capacidade nominal, resultando na eliminação dos esforços iniciais no isolamento do motor e na rede de alimentação.

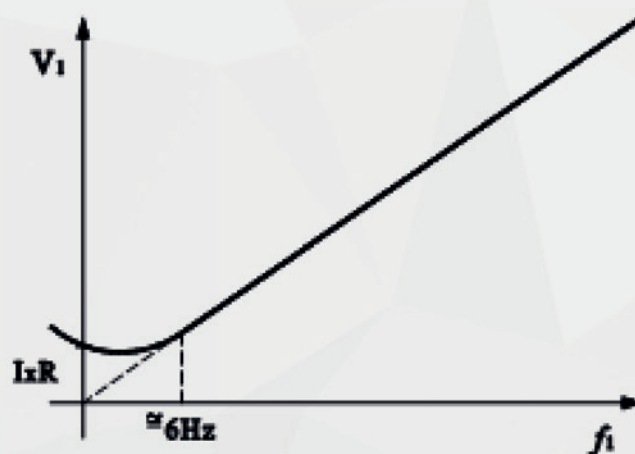
A maioria das aplicações é concebida para manter uma relação V/Hz constante, assegurando, assim, a uniformidade do fluxo eletromagnético no entreferro do motor. Dessa forma, em situações de baixas frequências, a tensão aplicada será proporcionalmente reduzida, conforme ilustrado na figura a seguir.



Durante as operações, o sistema de acionamento regula a tensão e frequência, viabilizando o funcionamento do motor em proximidade aos valores nominais de escorregamento e fluxo, garantindo sua operação dentro da região estável da curva Torque x R.P.M. Dessa forma, para a maioria das aplicações, especialmente para cargas centrífugas, as correntes de partida apresentam-se em níveis significativamente reduzidos. Isso resulta em uma aceleração suave e controlada, enquanto o baixo índice de escorregamento contribui para a minimização do aquecimento do rotor. Podemos identificar a curva típica de motor aplicado à inversor de frequência a seguir.



É relevante destacar que a redução da tensão e frequência do estator resulta em uma queda significativa de tensão no mesmo. Em cenários de frequências baixas, ao manter a proporcionalidade entre a frequência e a tensão, ocorre uma considerável diminuição do fluxo magnético e, conseqüentemente, do conjugado da máquina. A fim de evitar tal cenário, torna-se necessário elevar a tensão do estator para frequências mais baixas, por meio da aplicação de compensação IxR (corrente x resistência) envolvendo o aumento da tensão de forma proporcional à corrente (I) multiplicada pela resistência (R) dos condutores, conforme ilustrado na figura subsequente.

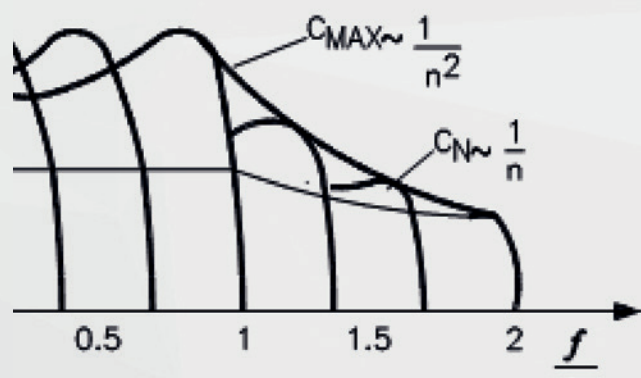


Para a faixa de frequências compreendida entre 0 Hz e aproximadamente 6 Hz, a relação entre a magnitude da tensão V_1 e a frequência f_1 não é facilmente determinada, uma vez que essa relação depende simultaneamente da frequência f_1 (estacionária) e da frequência f_2 (rotativa). Portanto, a variação da tensão em baixas frequências está condicionada não apenas à frequência do escorregamento, mas também, conseqüentemente, à carga imposta. Quanto a isso, destacamos dois pontos:

I - As relações entre a frequência elétrica (V_1/f_1) que excedem os valores nominais são restritas

devido à saturação e subsequente enfraquecimento do campo elétrico que ocorrem em elevados níveis de tensão. Integrando as equações previamente expostas, considerando pequenos valores de escorregamento e assumindo que f_2 é proporcional a f_1 , podemos afirmar que o conjugado máximo diminui proporcionalmente ao quadrado do aumento da velocidade ($1/n^2$). Consequentemente: a diminuição do conjugado nominal ocorre de maneira hiperbólica em função do aumento da velocidade, representada pela expressão matemática ($1/n$), e ainda, observa-se uma diminuição aproximadamente proporcional ao quadrado da redução do fluxo (expresso por: 2); e o valor estimado da velocidade máxima sob condições de potência constante é expresso pela equação a seguir em conformidade com a figura ilustrativa.

$$n_{m\ x} < \left(\frac{C_{m\ x}}{C_{nom}} \right) \cdot n_{nom}$$

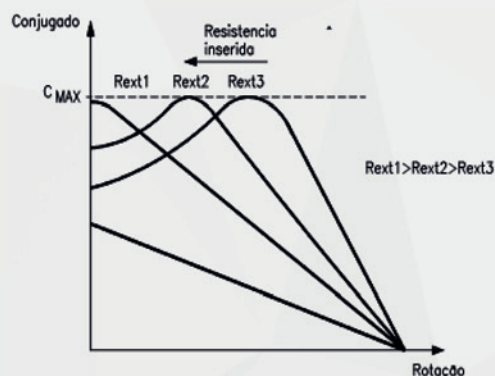


II - Devido à natureza não senoidal das formas de onda geradas pelos conversores de frequência, tanto em termos de tensão quanto de corrente, que apresentam elevados componentes harmônicos de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens, observa-se um aumento nas perdas nos motores associados a tais dispositivos. Adicionalmente, em virtude dos picos de tensão, torna-se imperativo dimensionar o isolamento do motor para suportar até o dobro da tensão nominal (linha). Consequentemente, é necessário reduzir as características nominais do motor em aproximadamente 12%, indicando que o motor utilizado apresenta um tamanho físico correspondente a um motor com uma potência 12% superior. Em termos práticos, isso implica que, ao utilizar um motor com especificações padrão para uma elevação de 80K, ao alimentá-lo com um inversor de frequência, as especificações devem ser ajustadas para uma elevação de 105K, mantendo-se o tamanho físico do motor.

3.33.6 Partida com Reostato para motor de anéis

O motor de indução de anéis, também conhecido como rotor bobinado, apresenta uma gama de curvas representativas da relação entre o conjugado e a velocidade, obtida mediante a inclusão de resistências externas no circuito rotórico. Por meio dessa abordagem, é viável ajustar o motor para fornecer qualquer valor de conjugado, respeitando o limite estabelecido pelo conjugado máximo. Isso permite que o motor alcance elevados valores de conjugado durante a partida, mantendo correntes relativamente reduzidas, inclusive até o ponto de corrente correspondente ao conjugado máximo. Além disso, possibilita a operação do motor a uma velocidade específica com o conjugado desejado.

Cada curva na família de curvas demonstra o comportamento do motor, revelando que, à medida que a carga aumenta, a rotação diminui de forma gradual. Na velocidade síncrona, o conjugado do motor atinge zero, caracterizando um ponto específico no desempenho do sistema.



A aplicação de motores de anéis fundamenta-se na seguinte expressão matemática:

$$s = \frac{3R_2 \cdot I_2^2}{\omega_0 \cdot T} = \frac{P_{j2}}{\omega_0 \cdot T}$$

Onde:

s é o escorregamento;
 R_2 é a resistência rotórica;
 I_2 é a corrente rotórica (A);
 ω_0 é a rotação síncrona (rd/s);
 T é o torque ou conjugado do rotor (Nm);
 P_{j2} = perdas no rotor (W).

A inclusão de uma resistência externa no rotor resulta no incremento do momento de inércia, desencadeando alterações na velocidade angular do motor.

Quando se emprega um reostato líquido, a resposta da curva de torque manifesta-se de maneira proporcional e linear.

3.34 Características de aceleração

3.34.1 Potência nominal

Ao intentar selecionar um motor para acionar uma carga específica, torna-se imperativo obter informações relativas ao torque exigido pela carga, a rotação nominal que a carga deve atingir em situações normais e as variáveis associadas às condições operacionais. Além disso, mediante a identificação do tipo de acoplamento empregado, é possível determinar a rotação nominal do motor.

Dessa maneira, a potência nominal do motor é calculada conforme a expressão a seguir:

$$P_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot C_n}{60}$$

ou

$$P_n = 0,10472 \cdot n \cdot C_n = n \cdot C_n / 9,5493$$

Onde:

P_n é a potência nominal do motor em Watt;
 C_n é o conjugado nominal do motor em Nm;
 n é a rotação nominal do motor em r.p.m.

Na formulação da equação de potência anteriormente apresentada, pressupôs-se que o conjugado demandado pela carga é equivalente ao conjugado nominal do motor. Essa premissa é aplicável exclusivamente a situações de acoplamento direto.

No caso de acoplamento com redução de velocidade, torna-se necessário referir o conjugado demandado pela carga ao eixo do motor, procedimento realizado da seguinte maneira:

$$C_n = \frac{1}{\eta_{ac}} \cdot \frac{n_c}{n_m} \cdot C_{cn}$$

Onde:

n_c é a rotação da carga;
 C_{cn} é o conjugado nominal da carga em Nm;
 η_{ac} é o rendimento do acoplamento;
 n_m é a rotação do motor.

O rendimento do acoplamento é definido por:

$$\eta = \frac{P_c}{P_a}$$

Onde:

P_c = potência transmitida à carga;
 P_a = potência total fornecida pelo motor, ou potência do eixo do motor.

3.34.2 Conjugado resistente da carga

O conjugado resistente da carga é determinado pelo conjugado demandado pela carga, sendo, portanto, variável de acordo com o tipo específico de carga a ser acionada pelo motor. Todavia, todos esses casos podem ser adequadamente representados pela seguinte expressão:

$$C_c = C_0 + k_c \cdot n^x$$

Onde:

C_c é o conjugado resistente da carga em Nm;
 C_0 é o conjugado da carga para rotação zero (ou de partida) em Nm;
 k_c é a constante que depende da carga;
 n é a rotação nominal do motor em r.p.m.
 x é o parâmetro que depende da carga, pode assumir os valores - 1, 0, 1, 2.

Conforme expresso pela equação supracitada, observa-se que o conjugado da carga apresenta variação em relação à rotação "n". Tal variação está intrinsecamente vinculada ao parâmetro "x". Portanto, é possível categorizar as cargas em quatro grupos distintos com base nessas considerações, conforme veremos a seguir.

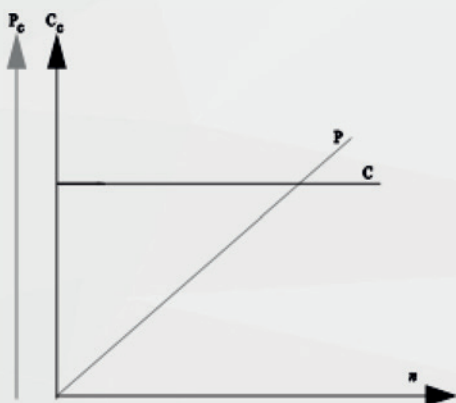
3.34.3 Conjugado constante

Para esta categoria de carga, o parâmetro "x" é nulo ($x = 0$), implicando, assim:

$$C_c = (C_o + k_c) = \text{Constante}$$

O conjugado resistente (C_c) mantém-se invariável durante as alterações de velocidade, enquanto a potência consumida pela carga (P_c) cresce de maneira proporcional à velocidade.

$$\text{Logo: } P_c = (C_o + K_c) \cdot n$$



Exemplificações de sistemas sujeitos a torques constantes: compressores de pistão, dispositivos de elevação (talhas e guindastes), bombas de pistão, trituradores (britadores) e sistemas de transporte contínuo.

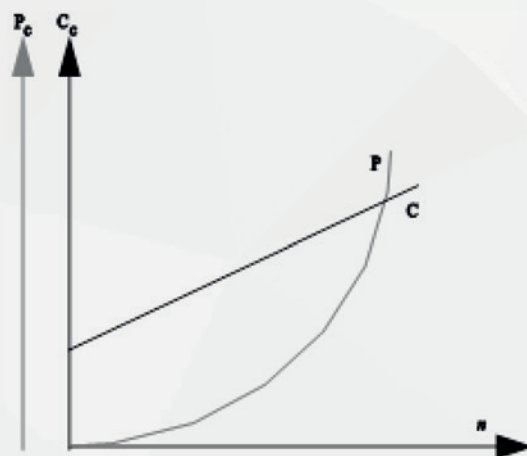
3.34.3.1 Conjugado linear

Neste conjunto, o parâmetro x é atribuído o valor de 1 ($x = 1$). Portanto:

$$C_c = C_o + K_c \cdot n = \text{Linear}$$

Neste tipo de equipamento, o conjugado é caracterizado por uma variação linear em relação à rotação, enquanto a potência é proporcional ao quadrado dessa rotação. Portanto:

$$P_c = C_o \cdot n + K_c \cdot n^2$$



Exemplos de sistemas submetidos a cargas com conjugado linear, uma aplicação infrequente, incluem: um mecanismo de calandragem com atrito viscoso empregado no processo de calandragem de papel; sistemas centrífugos; e bombas de vácuo.

3.34.3.2 Conjugado quadrático

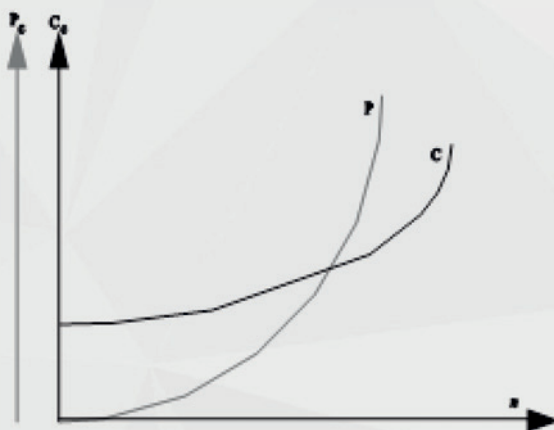
Neste contexto, consideramos a variável x igual a 2. O conjugado de x é determinado da seguinte maneira:

$$C_c = C_o + k_c \cdot n^2 = \text{Parabólico}$$

Neste cenário, a relação entre o conjugado e a rotação é expressa por uma variação proporcional ao quadrado da rotação, enquanto a potência é caracterizada por uma variação proporcional ao cubo da rotação. Portanto:

$$P_c = C_o \cdot n + k_c \cdot n^3$$

Exemplos de aplicações que envolvem cargas sujeitas a conjugado quadrático incluem bombas centrífugas, ventiladores, compressores centrífugos e misturadores centrífugos.



3.34.3.3 Conjugado hiperbólico

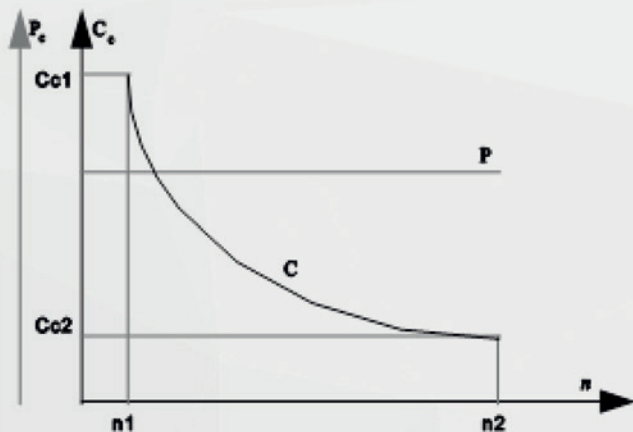
Neste cenário, a variável x é estabelecida como $x = -1$, e seu conjugado é expresso da seguinte maneira:

$$C_c = k_c / n = \text{Hiperbólico}$$

Neste cenário de carga, a constante C_0 pode ser assumida como nula. Ao analisar a expressão mencionada, observa-se que para $n = 0$, o conjugado resultaria em infinito, uma condição fisicamente impraticável. No entanto, na prática, essa situação não se concretiza devido às restrições impostas à rotação da máquina, a qual varia dentro de um intervalo definido entre o mínimo (n_1) e o máximo (n_2). Nessas circunstâncias, a potência permanece constante, indicando que não varia em função da rotação.

Logo,

$$P_c = k_c = \text{Constante}$$

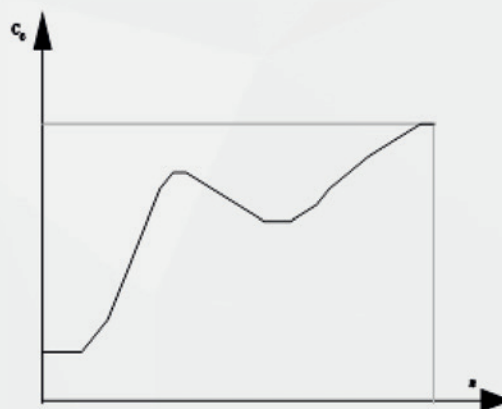


Exemplificações de aplicações sujeitas a cargas com comportamento de conjugado hiperbólico incluem a operação de dispositivos específicos, tais como bobinadeiras de papel, descascadores de toras, tornos (com análise conduzida em regime de conjugado constante, notadamente para motores de dupla velocidade sujeitos a um elevado número de manobras), bem como bobinadeiras de fios.

3.34.3.4 Conjugado não definidos

Neste contexto, a aplicação da equação completa para o conjugado resistente da carga é inaplicável, uma vez que a determinação precisa de

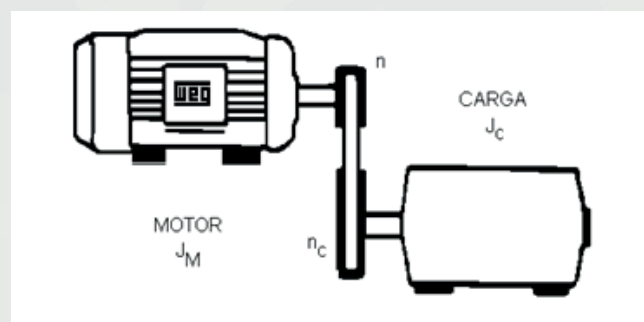
sua equação não é viável. Portanto, é imperativo empregar técnicas de integração gráfica para a determinação eficaz do conjugado. Na prática, a análise considera o conjugado como constante, estabelecido pelo valor máximo do torque absorvido.



3.34.4 Inércia da carga

O momento de inércia, denotado por "J," da carga acionada representa uma característica fundamental cuja análise é essencial para determinar, por meio do tempo de aceleração, a capacidade do motor em acionar a carga conforme as condições prescritas pelo ambiente ou pela estabilidade térmica do material isolante. O momento de inércia é uma medida da resistência de um corpo à alteração de seu movimento de rotação em torno de um eixo específico. Essa grandeza é dependente do eixo de rotação e da distribuição de massa e forma do corpo. A unidade de medida para o momento de inércia é o quilograma metro quadrado (kgm^2) no Sistema Internacional (SI).

O momento de inércia total do sistema, representado por J_T , é a soma dos momentos de inércia da carga (J_C) e do motor (J_M), conforme expresso por $J_T = J_M + J_C$. Em situações em que a máquina apresenta "rotação diferente da rotação do motor," como ocorre em acionamentos por polias ou engrenagens, a inércia da carga deve ser referenciada à rotação nominal do motor, conforme ilustrado na figura abaixo:



Onde:

J_{ce} é o momento de inércia da carga referido ao eixo do motor;

J_c é o momento de inércia da carga;

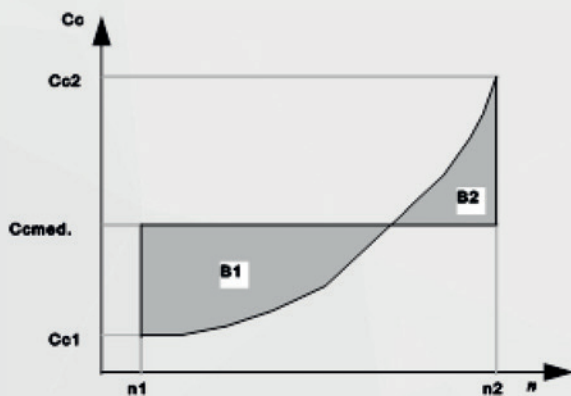
n_c é a rotação da carga;

n_m é a rotação nominal do motor.

Uma unidade de medida amplamente empregada para a quantificação do momento de inércia é o "Momento de Impulsão", identificado como GD^2 da carga, cuja expressão é apresentada em unidades do Sistema Internacional de Medidas (SI) como quilograma-força metro ao quadrado ($\text{kgf}\cdot\text{m}^2$). Sua relação com o momento de inércia é estabelecida pela seguinte equação: $J = GD^2/4$.

3.34.5 Conjugado médio da carga

Mediante a análise da curva do conjugado da carga, é factível a determinação do conjugado médio. O discernimento do conjugado médio reveste-se de relevância no procedimento de cálculo do intervalo de tempo necessário para a aceleração do sistema.

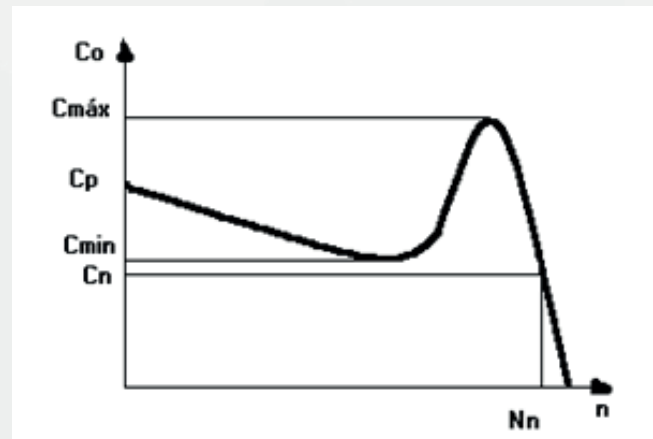


O conjugado médio da carga pode ser determinado por meio de uma representação gráfica, sendo necessário observar que a área delimitada pela curva B1 é equivalente à área delimitada pela curva B2.

3.34.6 Conjugado e rotação do motor

Conforme elucidado anteriormente, o motor de indução manifesta um conjugado nulo na rotação síncrona. À medida que a carga é incrementada, a velocidade do motor decresce progressivamente,

até alcançar um ponto em que o conjugado atinge seu valor máximo nessa rotação. Caso o conjugado da carga persista em aumentar, a velocidade do motor diminui abruptamente, podendo resultar no travamento do rotor. A representação gráfica da variação do conjugado em relação à velocidade para um motor convencional resulta em uma curva, cujo perfil é ilustrado na figura abaixo.



Na mencionada curva, destacamos e definimos alguns pontos cruciais. Os valores dos conjugados associados a esses pontos são especificados pela norma NBR 7094 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e são apresentados a seguir:

I - C_0 (Conjugado Básico):

Representa o conjugado resultante de uma relação funcional entre a potência e a velocidade síncrona em um sistema.

$$C_0 (\text{kgfm}) = \frac{716 \cdot P (\text{cv})}{n_s (\text{rpm})} = \frac{974 \cdot P (\text{kW})}{n_s (\text{rpm})}$$

$$C_0 (\text{Nm}) = \frac{7094 \cdot P (\text{cv})}{n_s (\text{rpm})} = \frac{9550 \cdot P (\text{kW})}{n_s (\text{rpm})}$$

II - C_n (Conjugado Nominal):

Refere-se ao conjugado desenvolvido pelo motor quando operando a potência nominal, mantendo a tensão e frequência nominais.

III - CP (Conjugado com Rotor Bloqueado, Conjugado de Partida ou Conjugado de Arranque):

É o conjugado mínimo gerado pelo motor quando o rotor está bloqueado, considerando todas as posições angulares possíveis. Essa definição leva em consideração a variação do conjugado com o rotor bloqueado, que pode ocorrer dependendo da posição em que o motor é travado, mantendo a tensão e frequência nominais.

O conjugado de partida pode ser representado em newtons-metro (Nm) ou, mais frequentemente, em termos percentuais do torque nominal.

$$C_P (\%) = \frac{C_P (\text{Nm})}{C_n (\text{Nm})} \cdot 100$$

Na aplicação prática, é imperativo otimizar o conjugado do rotor quando este se encontra bloqueado, visando possibilitar a superação eficiente da inércia inicial da carga e, por conseguinte, alcançar uma aceleração rápida. Essa otimização é particularmente crucial em partidas com tensão reduzida.

• C_{min} (Conjugado Mínimo):

Refere-se ao menor valor de conjugado desenvolvido pelo motor durante a fase de aceleração, iniciando a partir da velocidade zero até atingir a velocidade correspondente ao Conjugado Máximo. Em aplicações práticas, é crucial que esse valor não seja excessivamente baixo, evitando a presença de uma depressão significativa na curva de aceleração. Isso visa evitar partidas prolongadas que poderiam resultar em superaquecimento do motor, especialmente em situações de alta inércia ou partidas com tensão reduzida.

• C_{máx} (Conjugado Máximo):

Representa o valor máximo de conjugado desenvolvido pelo motor operando sob tensão e frequências nominais, sem experimentar quedas abruptas de velocidade. Em aplicações práticas, é imperativo que o Conjugado Máximo seja otimizado por duas razões principais:

O motor deve ser capaz de superar, sem dificuldades significativas, eventuais picos de carga, comuns em certas aplicações como britadores, caandras e misturadores.

O motor deve manter a velocidade de forma estável, mesmo durante quedas momentâneas e excessivas de tensão, evitando perdas abruptas de velocidade.

3.34.7 Categorias – Valores mínimos normalizados

De acordo com as propriedades do conjugado, relacionados a velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos equipados com rotor de gaiola são categorizados conforme normas técnicas específicas. Essas categorias são delineadas pela norma NBR 7094 e compreendem classificações que se adaptam a diferentes tipos de cargas, garantindo a aplicabilidade adequada em diversos contextos industriais.

3.34.7.1 Categoria N

Conjugado de partida nominal, corrente de partida nominal e baixo escorregamento constituem as características predominantes em motores amplamente disponíveis no mercado. Esses motores são destinados ao acionamento de cargas convencionais, tais como bombas, máquinas operatrizes, ventiladores, entre outros.

Essas especificações são aplicáveis à partida direta na rede, abrangendo motores com 4, 6 ou 8 polos e potência na faixa de 0,4 a 160 kW, operando a uma frequência de 60 Hz.

3.34.7.2 Categoria H

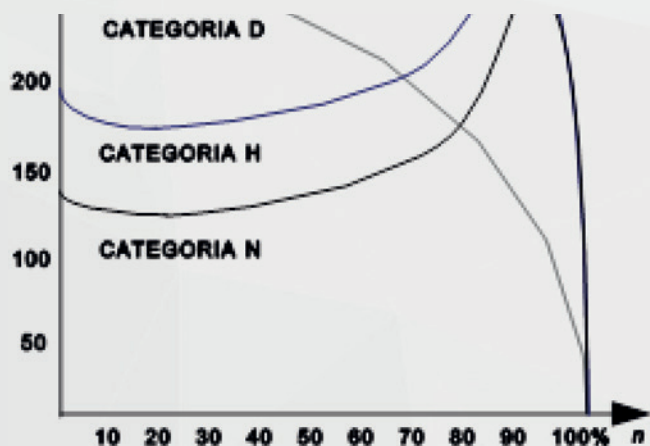
Conjugado de partida elevado, corrente de partida nominal e baixo escorregamento são parâmetros aplicáveis a motores elétricos destinados a cargas que demandam um torque inicial significativo, tais como peneiras, transportadores carregadores, sistemas de alta inércia, britadores, bem como certos tipos de ventiladores, entre outras aplicações. Essas especificações são cruciais para otimizar o desempenho do motor em condições de partida e garantir a eficiência operacional em ambientes industriais.

3.34.7.3 Categoria D

Esta categoria está especificamente associada à norma NBR 17094.

Caracteriza-se por apresentar um elevado conjugado de partida, uma corrente de partida normal e um escorregamento significativo (superior a 5%). É comumente empregada em aplicações que demandam altos níveis de torque inicial, como em máquinas excêntricas e dispositivos similares, onde a carga exibe picos periódicos. Adicionalmente, motores desta categoria são utilizados em sistemas como elevadores e em cargas que requerem um elevado conjugado de partida com uma corrente de partida restrita.

É importante observar que a Categoria D não é recomendada para motores com potência superior a 110 kW, devido às consideráveis dificuldades técnicas associadas à obtenção de um escorregamento apropriado. As características das curvas de conjugado em relação à velocidade para diversas categorias podem ser visualizadas na figura subsequente.



3.34.8 Tempo de rotor bloqueado (trb)

O tempo de rotor bloqueado é definido como a duração máxima da partida de um motor elétrico, representando o intervalo no qual os fabricantes asseguram que a temperatura limite da isolação dos enrolamentos não será excedida durante a passagem da corrente de partida. Este parâmetro é intrinsecamente dependente do design da máquina e geralmente é documentado no catálogo ou na ficha técnica fornecida pelo fabricante. Os valores associados são frequentemente expressos como resul-

tados de cálculos, sendo determinados apenas em situações especiais.

Na prática, o tempo de rotor bloqueado é estabelecido da seguinte maneira:

- O rotor é mantido em bloqueio;
- A tensão e a frequência nominais são aplicadas;
- O aumento de temperatura é registrado graficamente através de um registrador conectado a sensores localizados em pontos estratégicos no rotor e no estator;
- O ponto que atinge a temperatura limite de forma mais rápida determina o tempo de rotor bloqueado.

Para partidas com redução de tensão, a correção do tempo de bloqueio do rotor pode ser realizada mediante a implementação das seguintes medidas:

$$t_{rb}(V_R) = t_{rb}(V_n) * \left(\frac{V_n}{V_R} \right)^2$$

Onde:

$t_{rb}(VR)$ é o tempo de rotor bloqueado com tensão reduzida;

$t_{rb}(Vn)$ é o tempo de rotor bloqueado com tensão nominal;

V_n é a tensão nominal;

V_R é a tensão reduzida.

3.34.9 Conjugado motor médio (CMmed)

O conjugado mecânico no eixo do motor é expresso pela equação a seguir:

$$C_{Mm} \zeta d = \frac{3 * R_2 * I_2^2}{2 * \pi * n_s * s}$$

Onde:

R_2 é a resistência de fase do rotor em Ohms;

I_2 é a corrente de fase do rotor em Amperes;

s é o escorregamento do motor em p.u. (por unidade);

n_s é a rotação síncrona.

A formulação apresentada acima, denota a representação gráfica da curva de conjugado do motor, a qual, após procedimentos de simplificação, pode ser concisamente expressa por meio da seguinte equação:

$$C_{Mm} \zeta d = \frac{A - B * n}{C * n^2 - D * n + E}$$

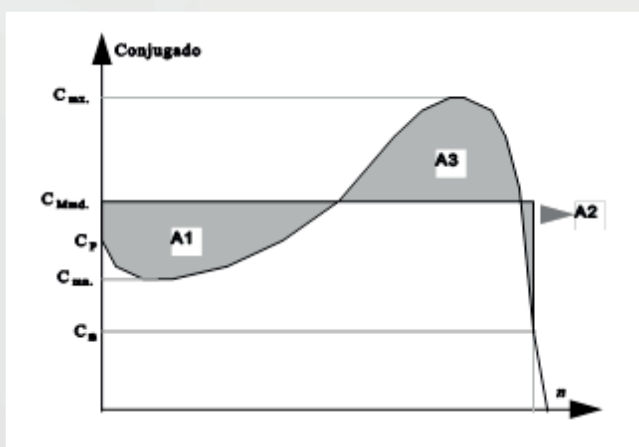
Onde:

$C_{Mm} \zeta d$ é o conjugado motor em Nm (Newton-metro).

n é a rotação do motor em rps (rotações por segundo).

A, B, C, D, E são constantes positivas que dependem do projeto do motor.

A magnitude das constantes mencionadas é intrinsecamente vinculada ao estado de saturação magnética presente no núcleo do motor. Ao representarmos a equação anterior graficamente, obtemos a curva característica correspondente ao conjugado médio do motor, conforme apresentado a seguir:



De maneira analítica, o conjugado médio do motor pode ser determinado por meio da realização da integral:

$$C_{Mméd} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \frac{A - B \cdot n}{C \cdot n^2 - D \cdot n + E} \cdot dn$$

A resolução da presente integral não apresenta uma dificuldade substancial, sendo comumente realizada através do método de integração gráfica. Esta abordagem não demanda uma complexidade

excessiva, sendo suficiente observar que a soma das áreas $A1$ e $A2$ deve equivaler à área $A3$.

De maneira geral, é possível observar a seguinte relação usual:

a) Para motores com categorias N e H, a fórmula para o cálculo do momento médio ($CM_{méd}$) é expressa por:

$$CM_{méd} = 0,45 \cdot \left(\frac{C_p}{C_n} + \frac{C_m}{C_n} \right) \cdot C_n$$

b) No caso de motores categorizados como D, a fórmula para o momento médio ($CM_{méd}$) é dada por:

$$CM_{méd} = 0,6 \cdot \frac{C_p}{C_n} \cdot C_n$$

Essas expressões fornecem uma representação formal e técnica para o cálculo do momento médio, considerando as categorias específicas dos motores mencionados.

Ao expressar o conjugado nominal (C_n) em unidades de quilograma-força metro (kgfm), é suficiente realizar a multiplicação pelo valor da aceleração devido à gravidade, que é $9,81 \text{ m/s}^2$, a fim de converter para newton metro (Nm).

3.34.10 Tempo de aceleração

O intervalo de tempo denominado "tempo de aceleração" refere-se ao período que o motor demanda para energizar a carga, iniciando desde a rotação zero até atingir a rotação nominal. A determinação do tempo de aceleração possibilita a avaliação da capacidade do motor em iniciar o funcionamento da carga, observando as condições estipuladas pela estabilidade térmica do material isolante, garantindo que não ocorram ultrapassagens dos limites de ruptura nas barras ou nas soldas do rotor (entre barras e anel de curto-circuito).

Ademais, o tempo de aceleração configura-se como um parâmetro relevante para a adequado dimensionamento do equipamento de partida e do sistema de proteção. É imperativo que o tempo de aceleração seja inferior ao tempo de bloqueio do rotor (ou ao tempo máximo permitido para aceleração).

No contexto de um movimento de rotação, a seguinte relação é válida:

$$C_a = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Onde:

C_a é o conjugado acelerador em Nm;

J é o momento de inércia do corpo em kgm²;

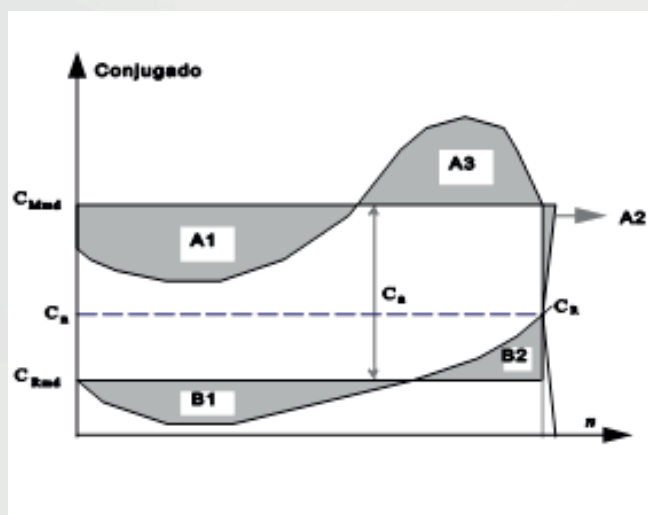
$\frac{d\omega}{dt}$ é a taxa de variação da velocidade angular em relação ao tempo (em rad/s).

A velocidade angular pode ser calculada por:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

O cálculo do conjunto médio de aceleração implica a determinação da diferença entre o conjugado do motor e o conjugado da carga. Idealmente, essa avaliação deve ser conduzida para cada intervalo de rotação, somando-se os intervalos para obter o tempo total de aceleração.

Na prática, entretanto, é suficiente realizar o cálculo gráfico do conjugado médio, ou seja, a diferença entre a média do conjugado do motor e a média do conjugado da carga. Esta média pode ser derivada, observando-se que a soma das áreas A1 e A2 é igual à área A3, e que a área B1 é equivalente à área B2, conforme ilustrado na figura abaixo.



O torque do acelerador tem a possibilidade de ser substituído sem comprometer a precisão, por meio do torque médio do acelerador, conforme expresso por:

$$C_{améd} = C_{Mméd} - C_{Rméd}$$

Como,

$$C_a = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Temos:

$$C_{Mméd} - C_{Rméd} = (J_m + J_{ce}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{dn}{dt}$$

Portanto:

$$dt = 2 \cdot \pi \cdot \frac{J_m + J_{ce}}{C_{Mméd} - C_{Rméd}} \cdot dn$$

Integrando esta última equação, resulta:

$$\int_0^{t_a} dt = \frac{J_m + J_{ce}}{C_{Mméd} - C_{Rméd}} \cdot \int_0^n dn$$

$$t_a = \frac{\pi \cdot n_m}{30} \cdot \left(\frac{J_m + J_{ce}}{C_{Mméd} - C_{Rméd}} \right)$$

Onde:

t_a é o tempo de aceleração em segundos;

n_m é a rotação nominal do motor em rpm;

J_m é o momento de inércia do motor em kgm²;

J_{ce} é a inércia da carga referida ao eixo do motor em kgm²;

$C_{Mméd}$ é o conjugado motor médio em N_m;

$C_{Rméd}$ é o conjugado resistente médio em N_m.

3.34.11 Potência dinâmica ou de aceleração

O tempo de aceleração deve ser sempre menor ou igual ao tempo de rotor bloqueado do motor. A potência dinâmica representa a quantidade de energia necessária para acelerar a carga até a rotação nominal em um intervalo de tempo que não exceda o tempo de rotor bloqueado. É desejável que essa potência dinâmica seja aproximadamente igual à potência nominal do motor, evitando assim um sobredimensionamento do motor. No entanto, devido

às características específicas da carga, como inércia e conjugado, a potência dinâmica pode exceder significativamente a potência nominal. Nesses casos, pode ser necessário dimensionar o motor acima do necessário (quando a potência necessária para acelerar o motor é maior do que a potência requerida em regime) ou, alternativamente, pode ser inviável alcançar a aceleração desejada com o tipo de motor ou acionamento em questão.

Em situações em que as demandas de potência dinâmica são elevadas, é recomendável realizar um estudo técnico-econômico para determinar a viabilidade de empregar acoplamentos hidráulicos, eletromagnéticos ou de fricção (embreagem). Dependendo dos resultados desse estudo, pode ficar evidente que a solução mais eficiente seria a utilização de um tipo diferente de motor, como um motor de anéis ou um motor de gaiola acionado por inversor de frequência.

3.34.12 Regime de partida

Devido à corrente de partida elevada dos motores de indução, a aceleração de cargas com uma inércia considerável resulta em um aumento rápido da temperatura do motor. Se o intervalo entre partidas sucessivas for demasiadamente curto, isso resultará em uma elevação excessiva da temperatura nos enrolamentos, o que pode causar danos ou reduzir a vida útil do motor. A norma NBR 7094 estabelece requisitos para o regime de partida que os motores devem ser capazes de realizar:

Duas partidas sucessivas, sendo a primeira realizada com o motor frio, ou seja, com seus enrolamentos à temperatura ambiente. A segunda partida ocorre imediatamente após o motor ter desacelerado até o repouso.

Uma partida com o motor quente, ou seja, com os enrolamentos à temperatura de regime.

A primeira condição simula o cenário em que a primeira partida do motor falha, por exemplo, devido ao desligamento da proteção, permitindo uma segunda tentativa imediatamente. A segunda condição simula um desligamento acidental do motor durante o funcionamento normal, como por falta de energia na rede, possibilitando a retomada do funcionamento logo após o restabelecimento da energia.

3.34.13 Corrente de rotor bloqueado

3.34.13.1 Valores máximos normalizados

Os limites máximos de corrente em condição de rotor bloqueado, em relação à potência nominal do motor, são universalmente aplicáveis para qualquer número de polos. Esses limites são formalmente apresentados na tabela abaixo, onde são expressos em termos da relação entre a potência aparente absorvida com rotor bloqueado e a potência nominal, medida em kVA/cv ou kVA/kW.

Faixa de Potências Nominais		S_p / P_n	
cv	kW	kVA / cv	kVA / kW
>34≤140	>25≤100	8,1	11
>140≤860	>100≤630	7,4	10

$$\frac{\text{kVA}}{\text{cv}} = \frac{\text{Potência aparente com rotor bloqueado}}{\text{Potência nominal}}$$

$$\frac{\text{kVA}}{\text{cv}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot V}{P(\text{cv}) \cdot 1000} ; \quad \frac{\text{kVA}}{\text{kW}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot V}{P(\text{kW}) \cdot 1000}$$

Onde:

I_p é a corrente de rotor bloqueado, ou corrente de partida;

V é a tensão nominal (V);

P é a potência nominal (cv ou kW).

3.35 Sistema internacional

3.35.1 Generalidades

A busca pela padronização global de unidades e métodos de medida é uma preocupação de longa data, materializando-se por meio de regulamentações estabelecidas em várias e sucessivas reuniões da Convenção Internacional do Metro. A 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, realizada em 1960, foi fundamental para estabelecer as bases do Sistema Internacional (SI).

O Brasil, enquanto membro dessa entidade internacional, promulgou em 12 de setembro de 1968, por meio do decreto-lei nº 63.233, uma legis-

lação abordando essa matéria. Este decreto aprovou o Quadro Geral de Unidades de Medida, proporcionando uma definição precisa da posição do Brasil em relação a outros países que ainda demonstram resistência em compreender as vantagens inerentes à referida uniformização.

O SI é baseado em sete unidades de base, a partir das quais outras unidades são derivadas. As sete unidades de base são:

I - Segundo (s): Unidade de tempo.

II - Metro (m): Unidade de comprimento.

III - Quilograma (kg): Unidade de massa.

IV - Ampere (A): Unidade de corrente elétrica.

V - Kelvin (K): Unidade de temperatura.

VI - Mol (mol): Unidade de quantidade de substância.

VII - Candela (cd): Unidade de intensidade luminosa.

Em 2019, o Sistema Internacional passou por uma revisão significativa, que entrou em vigor em 20 de maio de 2019. Essa revisão redefiniu quatro das sete unidades de base do SI, ligando-as a constantes fundamentais da natureza. As mudanças incluíram:

1. Quilograma (kg): antes, era definido por um cilindro de platina-irídio chamado de Protótipo Internacional do Quilograma. Agora, é definido pela constante de Planck (h), uma constante fundamental da física.

2. Kelvin (K): a definição do kelvin foi ajustada para se alinhar com a constante de Boltzmann (k), outra constante fundamental.

3. Ampere (A): a definição do ampere foi vinculada à carga elementar elétrica (e).

4. Mol (mol): a definição do mol foi ajustada em relação à constante de Avogadro (N_A), que especifica o número de átomos em 12 gramas de carbono-12.

Essas mudanças visam tornar as unidades do SI mais estáveis, precisas e independentes de artefatos físicos específicos. Essa redefinição destaca o compromisso contínuo com a melhoria da precisão das medições e a adaptação às descobertas científicas mais recentes.

O Sistema Internacional de Unidades (SI) desempenha um papel fundamental em máquinas elétricas rotativas, fornecendo uma base consistente e universal para medições. Conhecer o SI é crucial para garantir precisão e uniformidade nas especificações e operações dessas máquinas. As unidades

do SI, como o ampere, volt e watt, são essenciais para descrever corrente elétrica, tensão e potência, respectivamente, proporcionando uma linguagem comum para engenheiros e profissionais da área. Essa uniformização facilita o projeto, a fabricação e a manutenção, promovendo eficiência e interoperabilidade em escala global. Portanto, o entendimento do SI é essencial para a otimização e avanço contínuo na engenharia.

3.35.2 Conversão de unidades

A conversão de unidades no Sistema Internacional de Unidades (SI) refere-se ao processo de transformar uma quantidade de uma unidade de medida para outra, dentro do sistema estabelecido internacionalmente. O SI é uma estrutura padronizada de unidades que fornece uma linguagem universal para expressar grandezas físicas. Essas unidades são inter-relacionadas por fatores de conversão que mantêm a consistência e a precisão nas medições.

Ao lidar com máquinas elétricas, a conversão de unidades torna-se particularmente relevante para garantir que as grandezas envolvidas estejam expressas de maneira apropriada para o dimensionamento, projeto e operação eficiente desses equipamentos. Por exemplo, ao medir potência, torque ou corrente em motores elétricos, é comum realizar conversões para unidades em escalas mais práticas ou relevantes para a aplicação específica.

Essa prática é crucial para garantir que as medições e especificações estejam alinhadas com os requisitos técnicos, normas e padrões da indústria elétrica.

Adquirir conhecimento e domínio na metrologia aplicada ao Sistema Internacional de Unidades (SI) é crucial no contexto de máquinas elétricas, como geradores e motores. Essa expertise é fundamental para garantir medidas precisas e confiáveis, assegurando a conformidade com padrões internacionais. A aplicação eficaz da metrologia contribui para a excelência técnica, qualidade aprimorada em processos produtivos, inovação e competitividade no mercado global.

Em ambientes industriais, a garantia de qualidade em máquinas elétricas é aprimorada por meio do entendimento profundo da metrologia, resultando em operações eficientes, maior confiabilidade e contribuições significativas para o desenvolvimento tecnológico na área.

4

MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

4 MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

A manutenção desempenha um papel crucial na preservação da eficiência, confiabilidade e durabilidade das máquinas elétricas rotativas.

Existem três abordagens principais de manutenção: preventiva, corretiva e preditiva. A manutenção preventiva visa evitar falhas por meio de inspeções regulares e substituição de componentes programada. Já a manutenção corretiva intervéem após a ocorrência de falhas, restaurando o equipamento ao seu estado operacional normal. A manutenção preditiva utiliza monitoramento contínuo e análise de dados para prever falhas e determinar o momento ideal para intervenções, empregando tecnologias como sensores e análise de vibrações. Cada abordagem tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha depende de fatores como a criticidade do equipamento e os recursos disponíveis. Estratégias eficazes muitas vezes combinam esses tipos de manutenção para otimizar a performance e a confiabilidade dos sistemas.

A importância da manutenção é evidente em vários aspectos, destacando-se:

I - Prevenção de falhas: a manutenção preventiva permite identificar e corrigir potenciais problemas antes que se tornem falhas graves. Isso reduz a probabilidade de paradas não programadas, minimizando impactos negativos na produção e operação.

II - Aumento da confiabilidade: uma manutenção regular aumenta a confiabilidade das máquinas elétricas, assegurando que estejam em condições ideais de operação. Isso é especialmente crítico em aplicações industriais, onde a confiabilidade dos equipamentos afeta diretamente a produtividade.

III - Prolongamento da vida útil: procedimentos de manutenção adequados contribuem para prolongar a vida útil das máquinas elétricas. Isso resulta em um retorno mais sustentável do investimento, evitando custos desnecessários de substituição ou reparo prematuro.

IV - Eficiência energética: máquinas elétricas bem mantidas tendem a operar com maior eficiência energética. Isso não apenas reduz os custos operacionais, mas também está alinhado

com práticas sustentáveis, contribuindo para a eficiência global do sistema elétrico.

V - Segurança operacional: a manutenção adequada aborda questões de segurança operacional, garantindo que os equipamentos estejam em conformidade com padrões e regulamentações. Isso reduz riscos de acidentes, protegendo tanto os trabalhadores quanto os ativos da empresa.

VI - Minimização de custos de reparo: a manutenção regular permite a detecção precoce de desgaste ou danos, possibilitando intervenções antes que ocorram falhas catastróficas. Isso minimiza os custos associados a reparos emergenciais e substituições onerosas.

VII - Adaptação a novas exigências: as máquinas elétricas frequentemente operam em ambientes dinâmicos sujeitos a mudanças nas demandas de produção ou regulamentações. A manutenção permite adaptar os equipamentos a essas novas exigências, garantindo que continuem atendendo aos requisitos operacionais.

VIII - Resiliência a condições adversas: em ambientes industriais desafiadores, como locais com alta umidade, temperatura extrema ou presença de poeira, a manutenção é essencial para proteger as máquinas elétricas contra condições adversas que podem acelerar o desgaste e a degradação.

A manutenção não é apenas uma prática corretiva, mas uma estratégia proativa para garantir o desempenho consistente, a segurança e a sustentabilidade ao longo do tempo. Investir em manutenção eficiente não apenas preserva ativos valiosos, mas também fortalece a competitividade e a confiabilidade das operações industriais.

É pertinente destacar que os procedimentos construtivos relativos aos geradores e motores foram previamente abordados em seções anteriores. Dessa forma, a ênfase da presente discussão recairá sobre as intervenções primordiais nas componentes que integram os referidos dispositivos, no âmbito de atividades de manutenção.

4.1 Manutenção mecânica

A eficiência operacional e a longevidade de máquinas dependem, em grande parte, do cuidado dedicado aos seus componentes mecânicos. A manutenção mecânica, abrangendo estratégias preventivas, corretivas e preditivas, desempenha um papel crucial nesse cenário.

Ao explorarmos os principais componentes mecânicos, como elementos fundamentais, compreendemos a importância de práticas de manutenção específicas.

4.1.1 Mancais

Dentre os modelos de mancais adotados em máquinas elétricas rotativas, veremos os pontos mais relevantes relacionados aos mancais de rolamento e deslizamento (bucha).

4.1.1.1 Mancal de rolamento

Os mancais de rolamento, são dispositivos nos quais a carga é transferida por elementos rolantes em movimento de rotação. Nesse contexto, o atrito durante a partida é superior ao experimentado durante a operação (conhecido como atrito de rolamento), mas ainda assim é insignificante em comparação com o atrito em mancais de deslizamento.

4.1.1.1.1 Nomenclatura

A nomenclatura de rolamentos é uma convenção técnica padronizada usada para identificar diferentes tipos de rolamentos e suas características específicas. Geralmente consiste em uma combinação de letras e números que indicam o tipo de rolamento, suas dimensões, capacidades de carga e outras características importantes. Por exemplo, a designação pode incluir informações sobre o diâmetro interno, o diâmetro externo, a largura, o tipo de vedação, a capacidade de carga estática e dinâmica, entre outros parâmetros.

Essa nomenclatura é essencial para facilitar a seleção precisa do rolamento adequado para uma determinada aplicação, garantindo compatibilidade dimensional e de desempenho.



Como exemplo, temos: NU 3 20. Onde a primeira série de letras representa o tipo de rolamento (nesse caso, "NU" se trata de rolamento de rolos cilíndricos). Vale destacar que essa primeira série poderia ser representada por um algarismo. O segundo algarismo representa a largura e diâmetro externo do rolamento (neste caso, "3"). E os dois últimos algarismos multiplicados pela constante 5, representam o diâmetro interno do rolamento em milímetros (Neste caso: $20 \times 5 = 100$ mm).

Para obter dados precisos sobre a nomenclatura dos rolamentos, recomenda-se consultar o fabricante, especificando todas as informações necessárias para a correta seleção do rolamento ideal, conforme a aplicação.

4.1.1.1.2 Folgas internas

Nos rolamentos, as folgas são especificadas em termos de espaço radial entre os elementos rolantes e as pistas. Essas folgas são designadas após a numeração do rolamento, como um sufixo. A sequência crescente de folgas é categorizada como C1, C2, NORMAL, C3, C4 e C5. Por exemplo, um rolamento com a designação 6322 – C3 representa um rolamento de esferas, pertencente à série de largura 3, com um diâmetro interno de 110 mm e uma folga radial C3, que é maior do que a folga considerada normal.

É observado que, no exemplo mencionado, a tipologia do rolamento é indicada por algarismos em vez de letras, em contraste com o modelo anteriormente discutido. Esta disposição numérica reflete a configuração estrutural do rolamento, simplificando sua identificação.

4.1.1.1.3 Armazenagem

Ao armazenar rolamentos, é crucial seguir algumas diretrizes para garantir sua integridade.

É importante manter os rolamentos em sua embalagem original para preservar sua identificação e protegê-los contra danos externos. Escolha um ambiente limpo e seco, livre de vibrações e gotículas, evitando assim a possibilidade de contaminação ou corrosão.

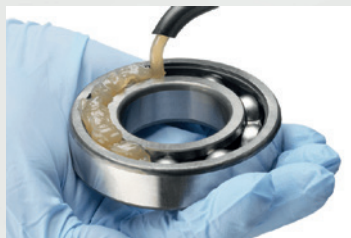


A temperatura de armazenamento deve ser mantida dentro da faixa recomendada, entre 10°C e 30°C, para evitar variações extremas que possam comprometer a qualidade do material. Os rolamentos devem ser afastados de fontes de calor para evitar danos causados por temperatura elevada.

Controle a umidade relativa do ar em torno de 60% para prevenir a corrosão dos componentes. Evite o armazenamento sobre superfícies de madeira verde, paredes ou chão de pedra, que podem causar danos estruturais devido à absorção de umidade.

Evite também armazenar os rolamentos em proximidade a ambientes com produtos químicos, pois estes podem deteriorar os materiais.

Ao empilhar as caixas de rolamentos, limite o número a fim de evitar sobrecarga e danos durante o transporte e manuseio. Além disso, verifique periodicamente a validade dos rolamentos pré-lubrificado e promova a rotatividade do estoque para evitar a deterioração dos componentes devido ao envelhecimento.



Para rolamentos instalados em motores em estoque, é recomendável girar o eixo mensalmente para renovar a lubrificação das pistas e esferas.

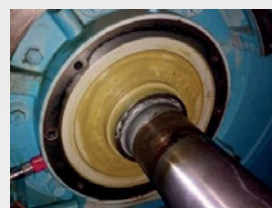
Essas diretrizes são essenciais para manter a qualidade e a funcionalidade dos rolamentos ao longo do tempo.

4.1.1.1.4 Troca de rolamentos

Para iniciar, é imprescindível o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), tais como óculos de segurança, luvas, capacetes e demais dispositivos conforme a aplicação específica.

Durante o processo de substituição dos rolamentos, diversas partes do mancal serão manipuladas, demandando o uso de ferramentas e dispositivos apropriados, como chaves adequadas, extratores de anel de travamento, dispositivos de extração e aquecedor indutivo. Além disso, é necessário o emprego de lubrificação adequada (exceto para rolamentos blindados) e a utilização de rolamentos novos, uma vez que os rolamentos removidos não são reutilizáveis, conforme recomendação do fabricante.

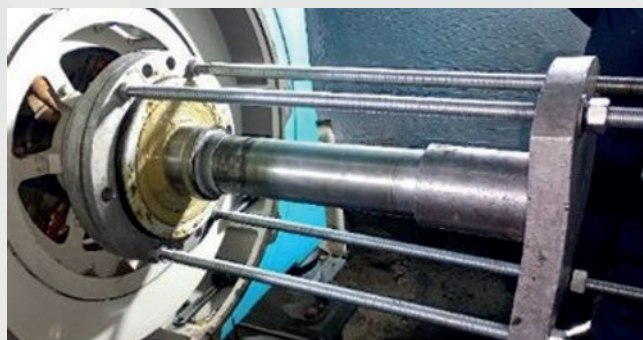
O acesso ao rolamento envolve a remoção da tampa do mancal, centrifugador de graxa, tampa da máquina e a extração do anel de travamento.



Após a remoção do rolamento, pode-se considerar também a retirada da tampa interna para limpeza. Todas as peças são cuidadosamente inspecionadas, limpas e preparadas para a montagem.



Durante a limpeza do rolamento, o excesso de graxa é removido e o dispositivo de extração é posicionado. O aquecimento do rolamento é realizado para expandir a parte em contato com o eixo (anel interno). Combinado ao aquecimento, o rolamento é removido utilizando o dispositivo de extração.



Após a retirada do rolamento antigo, o eixo é limpo em preparação para a instalação do novo rolamento.



No caso de rolamento lubrificado com graxa, a tampa interna do mancal é higienizada, reposicionada e preenchida com $\frac{3}{4}$ de graxa, permitindo a circulação adequada durante a lubrificação. É essencial observar a quantidade precisa de graxa para evitar danos ou vazamentos.



Para a instalação do novo rolamento, é utilizado o aquecedor indutivo para atingir a temperatura ideal na pista interna do rolamento, permitindo sua inserção no eixo de forma adequada.



A temperatura de aquecimento é determinada pelo fabricante, levando em consideração o tamanho e o modelo do rolamento. Por exemplo, para rolamentos do fabricante SKF Modelo 6330 M/C3 com lubrificação a graxa, a temperatura de aquecimento recomendada é de até 110°C, assegurando a dilatação ideal sem prejudicar as esferas e outras partes do rolamento.

No caso de rolamentos lubrificados a óleo, é importante atentar-se a remoção completa do óleo do mancal (evitando vazamentos durante a desmontagem) e retirada do sensor de temperatura do mancal. Após a conclusão, o óleo é reposado em conformidade com o nível ideal para cada modelo.

É importante ressaltar que as orientações fornecidas neste conteúdo são baseadas nas recomendações do fabricante do rolamento e visam garantir a eficiência e a qualidade do processo de substituição, bem como a preservação da vida útil do rolamento. Recomenda-se sempre seguir as instruções específicas do fabricante do rolamento

para garantir resultados excelentes, considerando as diversas técnicas aplicáveis a diferentes modelos e dimensões.

4.1.1.1.5 Lubrificação com graxa

A utilização de graxa oferece diversas vantagens, como a capacidade de lubrificar e vedar as partes móveis, reduzir o ruído operacional e dispensar a necessidade de bombeamento ou circulação constante.

Entretanto, é importante considerar algumas desvantagens associadas ao uso de graxa. Por exemplo, ela não realiza efetivamente a troca de calor nem a remoção de contaminantes, apresenta menor capacidade de penetração em comparação com outros lubrificantes e não flui de forma contínua.

Vários fatores podem influenciar na vida útil da graxa e no desempenho do sistema de lubrificação, incluindo a temperatura de operação, a presença de contaminantes, o nível de carregamento do equipamento, a disposição dos mancais e a qualidade das vedações utilizadas.

É importante destacar que o uso excessivo de graxa pode resultar em resistência ao movimento, aumento da temperatura, redução da vida útil dos rolamentos e do próprio lubrificante. Por outro lado, a falta de graxa pode levar ao rompimento da película lubrificante, aumento do atrito e da temperatura nos rolamentos, descascamento das pistas e até mesmo travamento do equipamento devido ao excesso de temperatura e à falta de folga radial.

Para garantir uma aplicação adequada, a quantidade correta de graxa para cada rolamento deve ser determinada com base nas especificações do fabricante, geralmente fornecidas na placa de identificação de cada máquina. Este procedimento é fundamental para assegurar o funcionamento eficiente e a longevidade dos componentes envolvidos no sistema de lubrificação por graxa, considerando a quantidade e períodos de reposição.

4.1.1.1.6 Relubrificação de rolamentos

Quando a vida útil da graxa utilizada nos rolamentos é inferior à vida útil esperada do rolamento, torna-se crucial proceder com a relubrificação. Isso permite estender a vida útil do rolamento, fornecendo-lhe uma nova quantidade de graxa e possibilitando sua operação até atingir o fim de sua vida útil.

No entanto, a relubrificação inadequada pode acarretar consequências graves. Uma relubrificação adequada envolve a aplicação da quantidade correta de graxa, conforme especificado para cada rolamento, e dentro do período previsto. Além disso, é essencial evitar a contaminação da graxa e garantir que ela seja armazenada em condições que preservem sua qualidade. O descumprimento desses requisitos pode comprometer as propriedades lubrificantes da graxa, levando ao fracasso prematuro do rolamento.

Para realizar a relubrificação e manuseio da graxa de forma adequada, algumas recomendações devem ser seguidas. É essencial manter os recipientes de graxa sempre fechados, nivelar a superfície da graxa, evitar o contato com fontes de ignição e limpar qualquer respingo que possa ocorrer, minimizando o contato com a pele.

No caso de motores com graxeira, isso pode incluir a limpeza da ponta do pino engraxador, a injeção da quantidade recomendada de graxa conforme indicado na placa de identificação, respeitando o tempo e a quantidade de lubrificação especificados, e evitando a mistura de diferentes tipos de graxas. O uso de engraxadeira manual é aconselhável para essa operação.

4.1.1.1.7 Manuseio, saúde e segurança

É crucial adotar medidas de segurança para lidar com lubrificantes, como óleos e graxas, utilizados nos mancais. Embora esses produtos não apresentem perigo quando utilizados adequadamente, é essencial evitar o contato direto com a pele e a inalação de seus vapores.

Exposições repetidas e prolongadas à pele podem resultar em irritação, dermatite e outros distúrbios cutâneos. Portanto, é recomendável

minimizar contatos desnecessários. Em casos de emergência, é fundamental estar ciente dos procedimentos de primeiros socorros.

Em caso de ingestão, não se deve induzir o vômito, e é crucial buscar assistência médica imediata. No caso de contato com os olhos, enxágue abundantemente com água. Para a pele, a lavagem com água e sabão é recomendada. Em situações de derramamento de líquido lubrificante, é necessário aplicar material absorvente, como areia ou serragem, sobre a área afetada. Posteriormente, o material absorvente deve ser adequadamente descartado conforme as regulamentações ambientais vigentes.

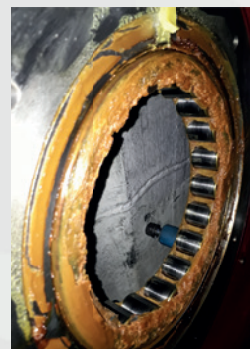
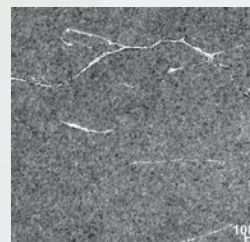
Em casos de incêndio, é imprescindível acionar os bombeiros imediatamente. Durante a combustão, pode-se formar monóxido de carbono, tornando essencial o uso de máscaras de oxigênio em ambientes fechados para evitar a inalação de gases tóxicos.

4.1.1.1.8 Defeitos em rolamentos

As falhas em rolamentos representam um desafio significativo. Esses problemas podem surgir devido a diversas razões, incluindo sobrecarga, deficiências na lubrificação, contaminação e falhas de vedação.

Uma das principais causas de falha em rolamentos é a fadiga do material, que é influenciada por fatores como a frequência de operação, a carga aplicada e a qualidade da lubrificação. A fadiga resulta em micro trincas que se desenvolvem gradualmente sob a superfície do rolamento, eventualmente levando ao desgaste e à falha.

Além disso, a contaminação por partículas estranhas, como poeira, sujeira ou água, pode penetrar nos rolamentos, comprometendo sua integridade e causando atrito excessivo. Isso pode ser agravado por falhas nas vedações, permitindo a entrada de contaminantes no sistema.



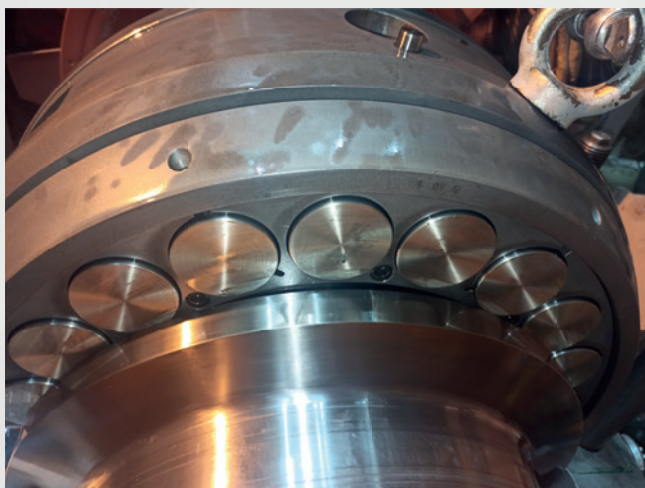
Os rolamentos também podem falhar devido a problemas de alinhamento ou montagem inadequada. Erros durante o processo de instalação podem resultar em cargas desiguais nos rolamentos, aumentando o desgaste e reduzindo sua vida útil.

Para mitigar esses problemas, é fundamental adotar a manutenção preditiva, com ênfase na análise de vibração, realizando inspeções regulares e monitoramento contínuo das condições operacionais, permitindo a detecção precoce de anomalias e a substituição oportuna de rolamentos desgastados.

A determinação da substituição de um rolamento é baseada na premissa de que ele foi identificado como defeituoso. Para esse diagnóstico, empregamos técnicas de análise de vibração. Com a evolução da indústria 4.0, o monitoramento online baseado em condições dos ativos tornou-se a abordagem mais recomendada. Mais adiante, abordaremos detalhadamente esse tópico, especialmente enfocando a análise de vibração com monitoramento online.

4.1.1.2 Mancal de deslizamento

A manutenção em mancais de deslizamento consiste em monitorar regularmente ruídos, vibrações, temperatura e a eficiência do sistema de lubrificação, bem como as condições operacionais dos componentes internos. Essa vigilância ajuda a prevenir falhas e otimizar o funcionamento dos equipamentos, contribuindo para sua durabilidade e confiabilidade.



Os mancais de deslize variam em suas características construtivas de acordo com o modelo e aplicação específica. Por exemplo, em geradores de pequenas centrais hidrelétricas (PCH), é necessário suportar grandes cargas axiais devido à pressão exercida pela água na turbina, que é transferida para os mancais do gerador. Nesses casos, os casquilhos são projetados com sapatas axiais para absorver esses esforços axiais, garantindo o funcionamento adequado do equipamento.

Essa configuração específica é crucial para a eficiência e durabilidade dos componentes, proporcionando um desempenho consistente ao longo do tempo. Isso representa um ponto de atenção especial para a inspeção nesses componentes.

4.1.1.2.1 Inspeção interna dos mancais

A manutenção preventiva desses mancais, estão associadas a desmontagem, inspeção e montagem dos componentes internos.



As medições das folgas entre o casquilho e o eixo são realizadas utilizando chumbo medidor em processo de esmagamento e medição utilizando micrômetro. Os cálculos de velocidade periférica são feitos com base nas especificações dos fabricantes dos mancais, como Zollern e Renk, por exemplo. Esses cálculos consideram a relação entre a velocidade periférica e o diâmetro do man-

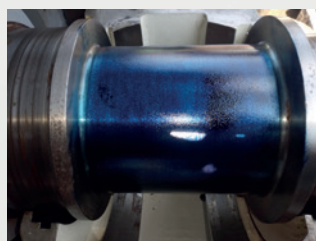
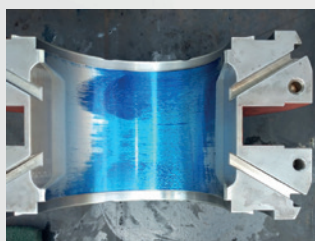
cal, e as folgas recomendadas também podem ser fornecidas pelos fabricantes.

Para a inspeção visual dos mancais, as partes superiores das caixas dos mancais Lado Acionado (LA) e Lado Oposto ao Acionado (LOA), os casquilhos superiores e inferiores, os selos labirintos flutuantes, a mangueira de elevação de eixo, os anéis de bronze e outros componentes (dependendo do modelo de mancal) são removidos para inspeção, polimento e limpeza.

Todos os componentes são desmontados e inspecionados. O casquilho inferior é verificado quanto a riscos, marcas e danos possivelmente causados pela operação, presença de contaminantes no óleo, folgas inferiores ou superiores as recomendações do fabricante, desalinhamento e outras possíveis causas de falhas.



Técnicas como teste de contato, polimento e rasquetamento são empregadas conforme necessário, porém, devem ser realizadas por especialistas para evitar danos ao material patente do casquilho.



A mangueira do sistema de levantamento de eixo é removida e avaliada quanto à sua construção física, incluindo o material isolante para evitar corrente parasita nos casquilhos, proteção externa e possíveis danos ou obstruções em seus orifícios de entrada e saída de óleo.

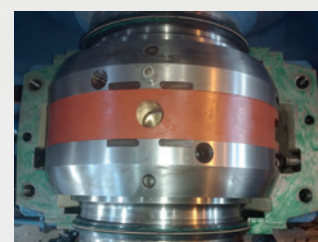


Os selos flutuantes são removidos, limpos e avaliados quanto a qualquer anomalia em sua forma física, obstruções nos canais de retorno de óleo e condições da trava antigiro.



Os sensores PT100 são verificados quanto à sua condição física, contatos elétricos, fixação correta e vedação eficiente contra vazamentos de lubrificante.

Durante o fechamento do mancal, é aplicado o material selante nas faces das caixas do mancal (Curil T2, por exemplo) para preencher pequenas imperfeições nas superfícies usinadas.



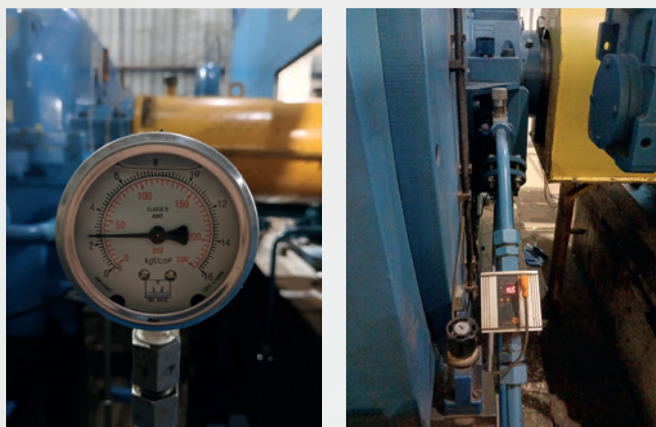
Por último, é aplicado o torque adequado nos parafusos de fixação dos mancais, seguindo as recomendações do fabricante.

4.1.1.2 Pressão e Vazão do sistema de lubrificação

Esses sistemas garantem a adequada lubrificação entre o eixo e os casquilhos, formando uma fina camada de óleo (Filme de óleo) necessária para reduzir o atrito e o desgaste, além de contribuir para o resfriamento, dissipando o calor gerado pelo atrito.

Em muitos casos, são empregados sistemas de circulação forçada para garantir a distribuição uniforme do óleo. Equipamentos modernos podem contar com sistemas automáticos de lubrificação, monitorando e controlando a eficiência e a quantidade do óleo fornecido aos mancais através de dispositivos eletro-hidráulicos.

Se faz necessário que a pressão (psi) e vazão (L/min) do óleo sejam ajustadas, garantindo o fluxo ideal e mantendo o nível de óleo dentro do recomendado. Essas informações estão disponíveis na placa de lubrificação dos mancais.



Fazendo parte de alguns modelos de mancais de máquinas de grande porte, cujo a massa do rotor principal pode provocar arraste de material patente durante a partida, temos a mangueira de elevação de eixo. O teste de levantamento deve ser realizado antes da partida do equipamento ajustando a pressão ideal, definindo o levantamento do eixo entre 0,10 e 0,15 milímetros utilizando um relógio comparador para medição.



Durante o processo de partida do equipamento, o sistema de levantamento de eixo é acionado, a máquina entra em rampa de aceleração, e após alcançar a rotação nominal, o sistema de levantamento é desligado.

4.1.1.3 Lubrificação forçada

A lubrificação forçada é um método avançado de lubrificação em que o lubrificante é pressionado diretamente nos pontos de contato ou superfícies de fricção dos componentes mecânicos por meio de uma bomba ou outro dispositivo mecânico. Esse tipo de sistema é especialmente importante em máquinas de alta velocidade, grandes cargas ou onde uma distribuição uniforme do

lubrificante é crítica para a operação segura e eficiente. A lubrificação forçada é diferenciada de outros métodos de lubrificação, como a lubrificação por gotejamento, salpico ou banho de óleo, pela sua capacidade de fornecer um fluxo contínuo e controlado de lubrificante, independentemente da orientação ou velocidade de operação da máquina.

4.1.1.3.1 Características e aplicações

A lubrificação forçada assegura que todas as partes móveis recebam uma quantidade adequada de lubrificante, independentemente de sua localização ou dificuldade de acesso, garantindo a distribuição uniforme e proteção contra o desgaste.

Sistemas de lubrificação forçada permitem um controle preciso sobre a quantidade de lubrificante fornecida, ajustando-se facilmente às necessidades específicas da máquina ou ao ambiente operacional.

Além de minimizar o atrito, a lubrificação forçada ajuda na dissipação de calor gerado pelo funcionamento da máquina, contribuindo para a manutenção da temperatura operacional dentro de limites aceitáveis.

É comumente utilizada em turbo geradores elétricos de médio e grande porte, onde as condições de operação excedem as capacidades dos sistemas de lubrificação por gravidade ou salpico.

Ao garantir uma lubrificação adequada e contínua, os componentes mecânicos sofrem menos desgaste, resultando em uma vida útil prolongada. A eficácia na prevenção de desgastes e superaquecimentos reduz a necessidade de manutenções corretivas e substituição de peças, diminuindo o atrito e permitindo que a máquina opere com maior eficiência energética.

4.1.1.3.2 Componentes do sistema de lubrificação forçada

Vamos destacar os principais componentes que compõem esse sistema.

Bomba de lubrificante: o coração do sistema, responsável por fornecer a pressão necessária para circular o lubrificante através do sistema.



Reservatório de lubrificante: armazena o lubrificante que será distribuído para os componentes da máquina.



Filtros: removem impurezas do lubrificante para garantir que apenas o fluido limpo seja aplicado aos componentes da máquina.

Reguladores de pressão: garantem que o lubrificante seja distribuído com a pressão adequada, evitando excesso que poderia levar a vazamentos ou insuficiência que comprometeria a lubrificação.

Sistema de refrigeração: em alguns casos, um sistema de refrigeração é integrado para controlar a temperatura do lubrificante, mantendo-o dentro de um intervalo ideal para a operação.

Tubulações e bicos de Injeção: Conduzem o lubrificante aos pontos específicos de aplicação, com bicos de injeção projetados para otimizar a cobertura e penetração do lubrificante.



4.2 Manutenção elétrica

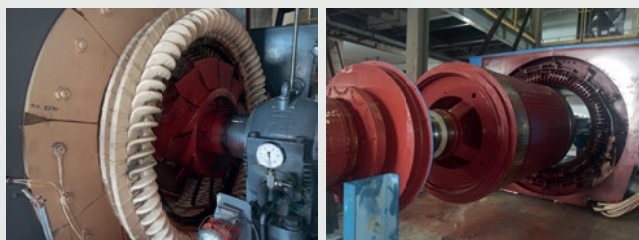
A manutenção elétrica de motores e geradores elétricos abrange procedimentos destinados à detecção e correção de problemas elétricos, bem como a prevenção de falhas com o objetivo de prolongar a vida útil desses equipamentos. Isso inclui inspeção regular dos componentes elétricos, como: cabos, conexões, enrolamentos, escovas e sistemas de proteção.

São realizadas atividades como limpeza, ajuste e substituição de componentes elétricos. Testes de funcionamento e medições de parâmetros elétricos, como corrente, tensão, resistência ôhmica, resistência de isolamento e outros, são conduzidos para verificar o desempenho e identificar possíveis problemas. Os ensaios elétricos ainda serão abordados em um item específico adiante, desde os mais rotineiros aos mais específicos.

A manutenção elétrica apropriada é crucial para minimizar o risco de falhas catastróficas, reduzir o tempo de inatividade não planejada e garantir a operação segura e eficiente das máquinas elétricas rotativas.

4.2.1 Inspeção no conjunto principal

A avaliação envolve uma inspeção visual minuciosa de todas as partes acessíveis do estator e rotor principal, levando em consideração a condição de instalação do equipamento. Quando o rotor principal está inserido dentro do estator, o acesso pode ser limitado. No entanto, se o conjunto rotor e estator principal estiver separado, é possível realizar uma avaliação mais detalhada.

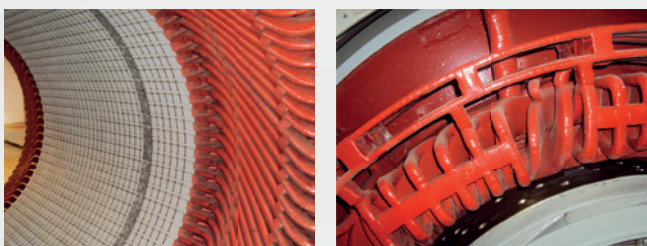


Durante o processo de inspeção, são examinados as bobinas, amarrações, isolantes, calços, canais de ventilação, ligações, cunhas de travamento e outros componentes adicionais, dependendo do modelo da máquina. Além disso, é realizada uma análise quanto à contaminação, sinais

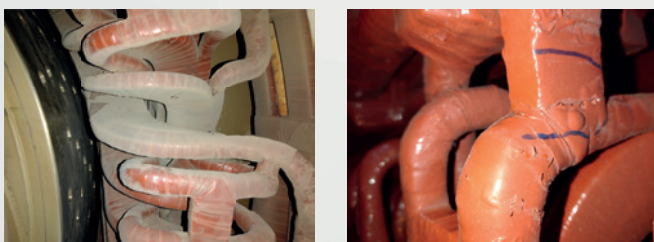
de aquecimento, movimentação de massa e outras possíveis implicações que afetem a operação do equipamento. Essa inspeção trata-se de manutenção preventiva realizada de forma programada em busca de identificar possíveis falhas antes que aconteçam, permitindo a intervenção de correção ou substituição de partes e peças.

4.2.1.1 Estator Principal

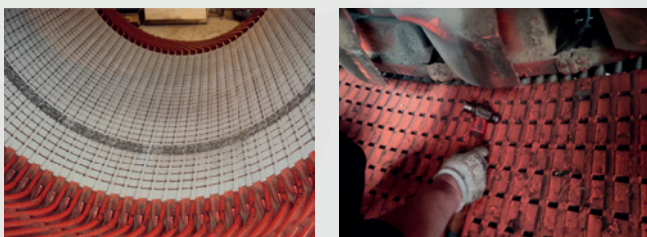
Durante a inspeção visual interna dos enrolamentos do estator principal, o objetivo é identificar danos ou anomalias em qualquer parte de seus componentes. Diversos pontos são examinados com atenção durante essa inspeção.



Os enrolamentos são minuciosamente verificados em relação a danos na isolamento, sinais de superaquecimento, descamação de tinta, níveis de contaminação, condições das amarrações e possível presença de pontos com efeito corona (detalharemos esse efeito mais adiante).



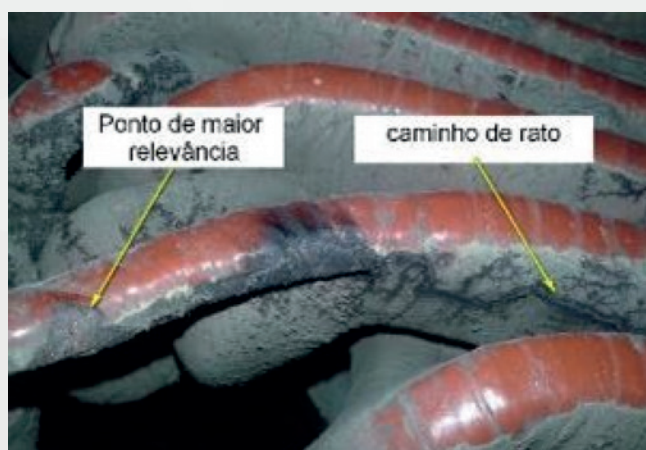
Quando o estator está separado do rotor, é possível realizar o mapeamento das cunhas do pacote de chapas. Essa etapa visa identificar possíveis cunhas soltas, causadas por falhas de fabricação ou pela vibração da máquina durante a operação.



A inspeção visual do núcleo do estator é realizada em relação a trincas, pontos de fixação e soldas, buscando qualquer sinal de desgaste ou deterioração.

Além disso, os canais de ventilação são cuidadosamente verificados para garantir que não haja obstruções que possam prejudicar o fluxo de ar e a eficiência do sistema de refrigeração.

A presença de contaminação nos enrolamentos requer especial atenção, pois pode resultar em diversos problemas operacionais. Uma inspeção visual é fundamental para determinar o nível de sujeira nos enrolamentos e identificar possíveis problemas adicionais. A contaminação dos enrolamentos pode causar aumento da deterioração térmica devido ao bloqueio da ventilação, ataques químicos, aceleração do efeito corona e ocorrência de tracking elétrico.



O fenômeno do tracking elétrico ocorre quando correntes fluem através das superfícies dos isolamentos, especialmente nas extremidades das bobinas, resultando na degradação e eventual falha da camada externa de isolamento das bobinas. Este problema é mais comum em máquinas que operam em média tensão, mas mesmo gerador de baixa tensão pode ser afetado, especialmente se estiverem sujos ou com excesso de umidade.

Uma abordagem eficaz para prevenir o tracking elétrico é garantir a qualidade do ar de refrigeração, evitando a contaminação do circuito de ar por agentes externos presentes no ambiente, como fuligem, poeira, sal, insetos, entre outros. Estes agentes, juntamente com o vapor de óleo, podem aderir às bobinas e criar condições para a condução de corrente elétrica, especialmente nas bobinas de inversão de fases, onde o diferencial de potencial é maior.

As amarrações e separadores de bobinas são compostos por materiais isolantes. No entanto, quando o enrolamento está contaminado, esses componentes podem acumular agentes contaminantes, criando um caminho de condução para a corrente ao longo da superfície das bobinas.

Quando os enrolamentos estão contaminados, é necessário proceder com a descontaminação. Para esse fim, diversos métodos de limpeza podem ser adotados, visando restaurar a integridade e eficiência do sistema. Veremos com mais detalhes essa intervenção de limpeza no item mais adiante.

4.2.1.1 Pontos com efeito corona

No contexto máquinas elétricas, a isolamento das bobinas está sujeita a uma variedade de estresses que atuam de forma simultânea. Esses estresses podem ser categorizados em várias naturezas, incluindo elétrica, térmica, mecânica, química, eletromagnética e ambiental. Por exemplo, aumentos na temperatura de operação podem significativamente reduzir a vida útil da isolamento, sendo que um acréscimo de 10°C pode resultar em uma redução de 50%. Similarmente, um aumento de apenas 1% na tensão aplicada pode diminuir a vida útil em 10%. Além disso, a vibração das bobinas pode provocar abrasão na isolamento, com a taxa de desgaste aumentando exponencialmente com a amplitude da vibração.

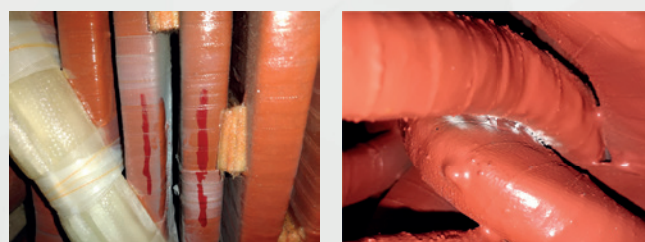
Os espaçamentos reduzidos entre as bobinas podem propiciar o início de descargas parciais, também conhecidas como efeito corona, levando à erosão e eventual falha da isolamento. Esse efeito ocorre em níveis de tensões acima de 5 kilo-Volts.



Problemas no processo de sobreposição das fitas condutivas e semi-condutivas também podem contribuir para o aparecimento do efeito corona. Em ambientes refrigerados a ar, a presença de ozônio e ácido nítrico pode resultar na formação de um pó branco sobre as superfícies próximas ou em contato. Quanto menor o espaçamento entre as bobinas, maior será a degradação.



O efeito corona (descarga parcial que não resulta em uma ruptura completa da isolamento) é iniciado por correntes capacitivas entre os condutores. Conforme o efeito corona avança, pontos de aquecimento começam a surgir na região afetada, provocando a degradação do isolante. Esses pontos de aquecimento podem atingir temperaturas elevadas à medida que a corrente entre os condutores aumenta. A potência dissipada devido a esse fenômeno está relacionada à equação $I^2 \times R$, onde I representa a corrente proveniente da descarga parcial e R é a resistência do isolamento.



Portanto, a inspeção dos enrolamentos do estator principal requer uma atenção especial para detectar a degradação inicial do isolante, visando antecipar a falha por ruptura completa do isolante. Os locais mais propensos a esse tipo de degradação incluem as áreas de troca de fase (entre bobinas de fases distintas), saída das ranhuras, luva anticorona e pacote de chapas.

É importante ressaltar que essa degradação pode ser identificada visualmente na parte

externa dos enrolamentos, seguindo da superfície para o interior da isolação. No entanto, também pode ocorrer na parte interna, onde não é visível a olho nu, seguindo do interior para a superfície, e só pode ser detectada por meio de ensaios elétricos especializados, como o DIAGNOSE (DIELEC), que será discutido posteriormente no item de ensaios elétricos.

4.2.1.1.2 Recuperação de Pontos com efeito corona

Após a identificação desses pontos, alguns métodos de recuperação são adotados de acordo com a criticidade da degradação do isolante.

Os pontos são devidamente marcados e mapeados para os devidos registros. Todos os locais são devidamente limpos e posteriormente é realizado a correção/atenuação dos pontos utilizando materiais específicos para essa aplicação e seguindo procedimentos necessários, de acordo com o nível de degradação do ponto.



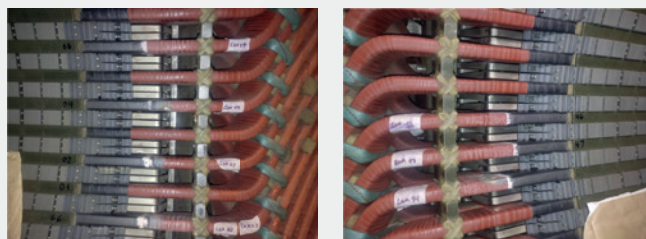
Vamos abordar dois métodos de recuperação com mais detalhes. Os materiais principais utilizados incluem, mas não se limitam: Tinta Semi-Condutiva; Tinta Condutiva; Resina Lackterm A +B de secagem ao ar; Tinta de Acabamento; Fita Isoseal; Alcool Isopropílico.

a) Recuperação da luva anti corona

Para realizar a recuperação da corona em luva anti-corona de um enrolamento de alta tensão de uma máquina elétrica, primeiramente, deve-se raspar a pintura de acabamento do núcleo até expor a chapa magnética na região adjacen-

te à barra, garantindo a visibilidade da superfície metálica. Um risco em linha paralelo entre o dedo depressão e a barra é suficiente para assegurar o contato da pintura de grafite com o núcleo e, conseqüentemente, o aterramento elétrico do sistema anti-corona.

Em seguida, deve-se lixar as laterais e a parte frontal da barra, a partir do núcleo até acima da parte curva, utilizando lixas de madeira com granulação 80 e 100.



Este processo visa remover a superfície brilhante do verniz isolante ou da resina aplicada indevidamente, criando uma rugosidade que melhora a aderência das novas camadas de pintura, além de eliminar todas as impurezas causadas pelo efeito corona.

Após o lixamento, é necessário remover os resíduos e limpar a barra e a região adjacente com álcool isopropílico.

A barra deve ser demarcada com fita crepe conforme as medidas especificadas. Uma primeira demão de pintura condutora deve ser aplicada nas laterais e na parte frontal da barra demarcada.



Após um período de pré-cura de cerca de 30 minutos, deve-se aplicar uma segunda demão de pintura condutora, assegurando que a tinta condutora esteja em contato com a região exposta da chapa do núcleo para otimizar a ligação à terra. A cura deve ser realizada por, no mínimo, 10 horas.

Posteriormente, após a secagem do processo anterior, a bobina deve ser novamente demarcada com fita crepe, deixando exposta a parte a ser pintada com tinta semi-condutiva. A primeira demão de pintura semi-condutora deve ser aplicada nas laterais e na parte frontal da barra demarcada, sobrepondo de 10 a 20 mm à tinta condutiva. Após um período de pré-cura de cerca de 30 minutos, deve-se aplicar uma segunda demão de pintura semi-condutora, e a cura deve ser realizada por, no mínimo, 10 horas.

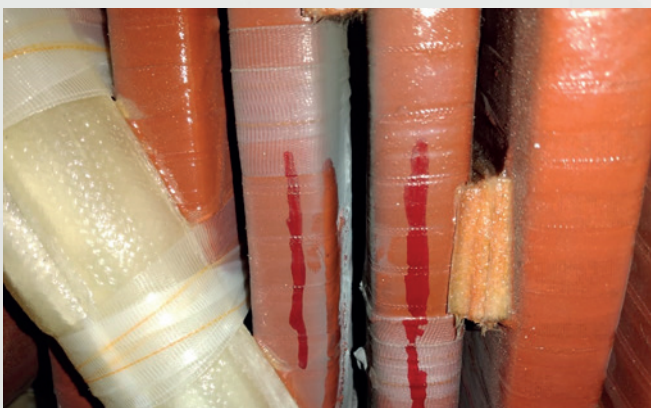
Finalmente, após a secagem do processo anterior, a bobina deve ser demarcada novamente com fita crepe, deixando exposta a área pintada com tinta semi-condutiva.



A pintura de acabamento anti-flash deve ser aplicada sobre a superfície da tinta semi-condutiva para completar o processo de recuperação.

b) Recuperação entre bobinas

A metodologia propõe que o ponto de descarga entre bobinas seja preenchido, de forma a igualar ou, no mínimo, aproximar o potencial superficial das bobinas adjacentes, evitando assim a ocorrência de descargas.



Inicialmente, deve-se remover os resíduos da superfície das bobinas na região afetada pela incidência de corona, utilizando lixas de madeira com grãos 100 e 80. É aceitável lixar suavemente a fita de proteção mecânica que reveste as bobinas, mas o lixamento deve ser pontual e leve para evitar atingir a mica. Pequenas lixas cintas podem ser utilizadas nos pontos de difícil acesso. Após o lixamento, a poeira resultante deve ser aspirada.



Em seguida, com um pano limpo embebido em álcool isopropílico, limpe a superfície lixada das bobinas e a região adjacente ao ponto trabalhado. Após aguardar a evaporação completa do álcool, utilize um soprador térmico para eliminar quaisquer fiapos remanescentes. É importante proteger as bobinas para evitar danos causados pelo excesso de calor.

Isolar as bobinas formando uma base para receber o material a ser colocado entre elas.

Prepare uma mistura de resina Lacktherm 1364A+B, adicionada de pó ou flocos de mica (papel de mica picado), para formar uma massa.

Aplique a massa na região preparada, preenchendo toda a altura entre os calços de amarração e separadores. Utilize um soprador térmico para acelerar a cura da massa.



Após a cura da massa, lixe a superfície até que esteja lisa, garantindo que não existam pontas ou gotas. Com um pincel, aplique a tinta de proteção anti-flash na região reparada.



Proteja a região reparada com fita vermelha Iseal, impregnando a fita com resina Lacktherm 1364A+B. Após a cura da resina, que leva aproximadamente 12 horas, aplique uma camada de tinta anti-flash sobre a área reparada.

4.2.1.2 Rotor Principal

Para avaliar as condições rotóricas, é fundamental compreender a construção física do rotor para identificar os pontos que requerem inspeção devido a suas distinções. Como exemplo: rotores de polos lisos e polos salientes, no caso de geradores; rotor de gaiola e rotor bobinado, no caso de motores.

A avaliação deve abordar diversos componentes, dependendo do modelo de rotor. Entre eles estão:

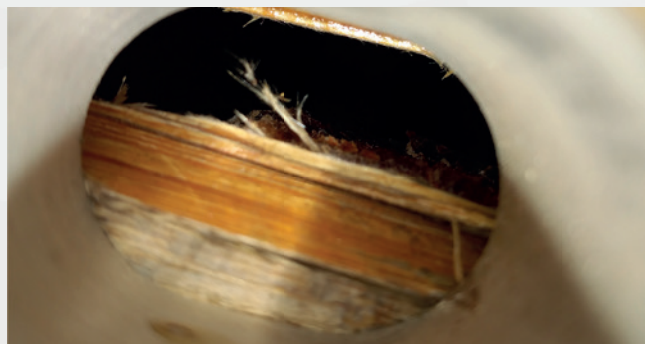
I. Amarrações: são elementos fundamentais para garantir a integridade do conjunto, utilizado para o travamento e separação das bobinas, devendo ser inspecionadas quanto a possíveis danos ou folgas.



II. Bandagens: é essencial verificar a condição das bandagens, que têm a função de proteger o bobinado do rotor contra danos mecânicos e elétricos.



III. Furos de ventilação da capa de aço: devem ser examinados para garantir a adequada ventilação do rotor, prevenindo o superaquecimento.



IV. Integridade dos calços do rotor: os calços devem ser verificados quanto a desgaste ou danos que possam comprometer o alinhamento e funcionamento do rotor.



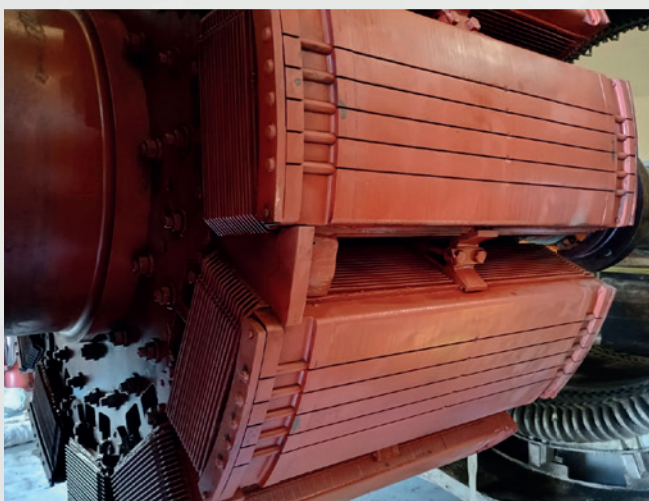
V. Cabo de ligação na saída do eixo para os enrolamentos: é importante garantir a integridade dos cabos para evitar problemas quanto a superaquecimento e/ou rompimento total da isolação, ocorrendo curto-circuito para massa.



VI. Fixação dos calços, parafusos, isoladores e suportes (VBlocks): é necessário verificar a fixação desses elementos para evitar movimentos indesejados do rotor.



VII. Polos: os polos devem ser inspecionados quanto a danos, desgaste ou deformações que possam afetar o desempenho do rotor.



VIII. Ventilador: é essencial verificar as condições das palhetas e das soldas para garantir uma adequada dissipação de calor.



VIX. Pesos de balanceamento: devem ser inspecionados quanto à fixação adequada para evitar desequilíbrios que possam comprometer o funcionamento do rotor.



X. Movimentação de massa: é importante verificar se não há indícios de movimentação.

XI. Contaminações, principalmente abaixo da capa de aço: é necessário verificar se não há acúmulo de contaminantes que possam causar danos ao rotor ou comprometer a sua eficiência operacional interferindo diretamente em seu isolamento elétrico.



Essas verificações devem ser realizadas periodicamente como parte de um programa de manutenção preventiva, visando garantir o funcionamento seguro e eficiente dos motores e geradores.

4.2.2 Inspeção dos cabos de alimentação do estator e rotor principal

A verificação dos cabos envolve a realização de ensaios elétricos para detectar possíveis falhas na isolamento, bem como inspeções visuais para identificar anomalias, como indícios de superaquecimento, degradação ou ruptura da isolamento dos cabos, estado dos terminais de conexão, organização dos cabos desde os enrolamentos até os barramentos de alimentação, e outros tipos de danos que possam surgir.



Quando ocorre a detecção de danos nos terminais de conexão, seja por ruptura ou superaquecimento, é viável remover a parte afetada do cabo e instalar um novo terminal, desde que o comprimento remanescente do cabo seja adequado.



Em determinadas situações, devido às especificidades e limitações de cada equipamento, torna-se necessário substituir os cabos integralmente. Cada caso deve ser tratado individualmente com a tomada de decisão a partir de um especialista.

A seguir, serão detalhados os procedimentos para essa substituição, distinguindo entre a troca dos cabos do estator e do rotor, devido às consideráveis diferenças entre os processos. É importante ressaltar que o método adotado para a substituição dos cabos varia de acordo com o modelo e as dimensões da máquina, considerando a condição do local de instalação. Estamos considerando nesta postila, apenas os procedimentos adotados pela ECOVIS para a execução dessas ati-

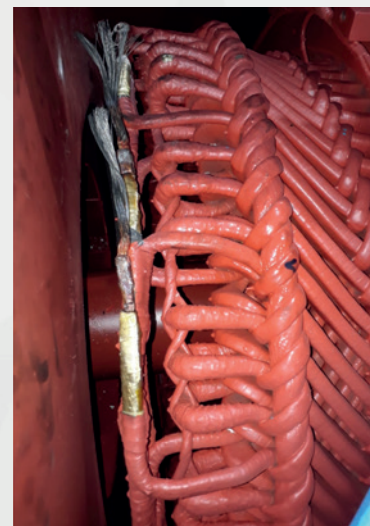
vidades em campo (no cliente), sem a necessidade de deslocamento do conjunto para realização em fábrica.

4.2.2.1 Substituição dos cabos do estator

Para ilustrar os procedimentos dessa atividade, adotamos como exemplo um gerador elétrico fabricado pela empresa CANTAREY, modelo SLX710 IA6, utilizado em parque eólico.



Após desmontar todas as partes do gerador para acessar os pontos de solda dos enrolamentos, inicia-se o processo de substituição dos cabos danificados. Isso envolve remover as isolações e os cabos danificados utilizando um conjunto oxiacetileno.



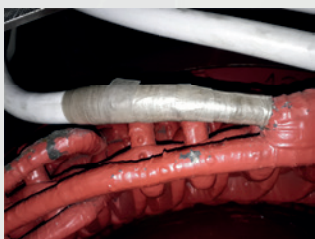
Uma vez retirados os cabos danificados, prepara-se a barra de conexão para a soldagem do novo cabo. Antes da solda, a integridade da barra é avaliada quanto a trincas, e se constatada sua integridade, procede-se com a limpeza da barra. O novo cabo é preparado, criando uma ponta de lápis no isolamento do cabo para um acabamento mais adequado.



Em seguida, as bobinas do estator principal são isoladas termicamente com papel umedecido em água, permitindo a soldagem dos novos cabos sem danificar o isolamento. Os cabos são posicionados e soldados utilizando solda prata por brasagem.



Após a conclusão da soldagem, os pontos de ligação são isolados eletricamente. O processo de isolamento segue os critérios estabelecidos pelas normas, aplicando 12 camadas sobrepostas de fita de mica impregnada com resina. A cada duas camadas de mica, aplica-se calor com um soprador térmico para aquecimento e impregnação da resina. Para proteção mecânica e acabamento superficial, utiliza-se poliéster, resina e tinta vermelha.



Para manter os cabos com as distâncias adequadas, são utilizados separadores de fibra fixados com poliéster e resina.



Na placa de passagem, são instalados prensa-cabos para garantir um melhor travamento e evitar contato com partes metálicas ou entre os cabos, mantendo-os organizados.

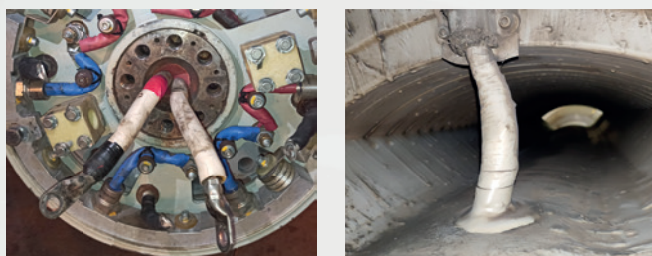


São instalados terminais de padrão brasileiro para cabos de 50mm² com furação M16. Após a prensagem dos terminais, é aplicado estanho para garantir melhor contato elétrico e fixação mecânica entre o cabo e o terminal.

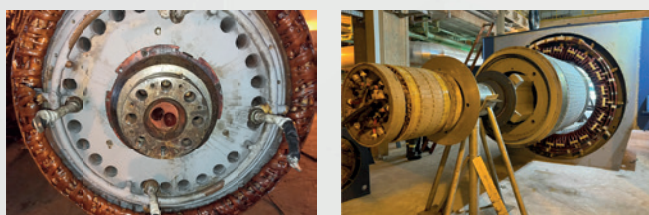


4.2.2.2 Substituição dos cabos do rotor

Nesta situação, para ilustrar este procedimento, tomaremos como exemplo o gerador fabricado pela empresa WEG, sendo o modelo SPW1250. A característica construtiva deste equipamento envolve a passagem dos cabos do rotor principal através do furo no centro do eixo, desde a conexão com o conjunto retificador até a ligação com os enrolamentos. O diâmetro do furo no eixo é suficiente para a passagem dos dois cabos de alimentação (positivo e negativo), porém, com espaço estreitamente limitado, evidenciando que as técnicas empregadas para realizar tais operações no local de instalação (na usina do cliente) devem ser executadas exclusivamente por profissionais especializados, devido à complexidade do processo. Os detalhes serão expostos a seguir.



Para executar estas tarefas, é imprescindível desmontar integralmente o gerador, removendo-o da base de instalação para o piso zero da casa de força e separando o Rotor e o Estator Principal. Além disso, é necessário desmontar o conjunto de excitação, retirando a roda de diodos.



Com a desmontagem concluída, o processo de substituição dos cabos é iniciado cortando-se o cabo próximo à conexão com o barramento, e em seguida removendo o cabo utilizando uma talha manual.



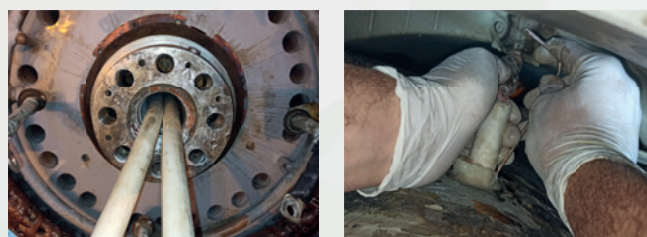
A resina que fixa os cabos dentro do furo do eixo é completamente removida, seguida pela limpeza do furo com álcool isopropílico. O objetivo desta limpeza é preparar o eixo para a passagem dos novos cabos, assegurando a ausência de rebarbas e contaminantes que possam danificar os cabos novos.



Os pontos de conexão dos cabos com os enrolamentos, onde será realizada a soldagem, são preparados removendo-se o restante do cabo antigo com oxiacetileno, deixando o ponto de conexão dos enrolamentos limpo e pronto para a soldagem dos cabos novos.



Em seguida, os novos cabos são inseridos no furo do eixo. Filtro com resina é utilizado para preencher o espaço entre o cabo e o furo de passagem dos cabos na saída para o ponto de solda, garantindo a fixação ideal do cabo e prevenindo sua movimentação devido à centrifugação.

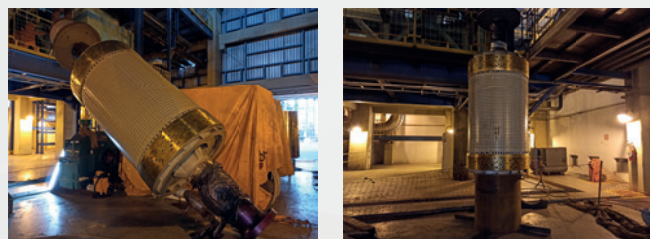


A conexão é soldada utilizando solda prata, seguida pelo isolamento com fita de mica, fita de poliéster e resina.





Posteriormente, o rotor é movido e posicionado verticalmente para que a resina seja inserida no furo de passagem dos cabos no eixo, assegurando a fixação ideal dos cabos e aguardando o tempo necessário para a cura da resina.



Por fim, os terminais de conexão são prensados e estanhados, e o acabamento é realizado utilizando termo retrátil.

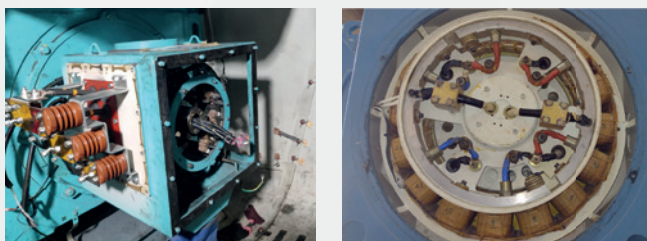


Todos os componentes utilizados neste processo devem ser cuidadosamente selecionados. O modelo e tipo de resina, fitas e ferramentas necessárias são determinados de acordo com a necessidade, levando em consideração diversos critérios técnicos.

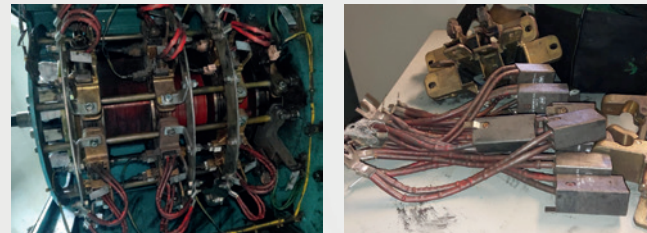
4.2.3 Sistema de excitação

A manutenção no sistema de excitação de um gerador envolve a execução de testes elétricos e inspeção visual para avaliar a integridade e eficiência dos componentes.

Existem dois principais tipos de sistemas de excitação encontrados em geradores elétricos: o sistema por conjunto porta escovas e o sistema por excitatriz estática.



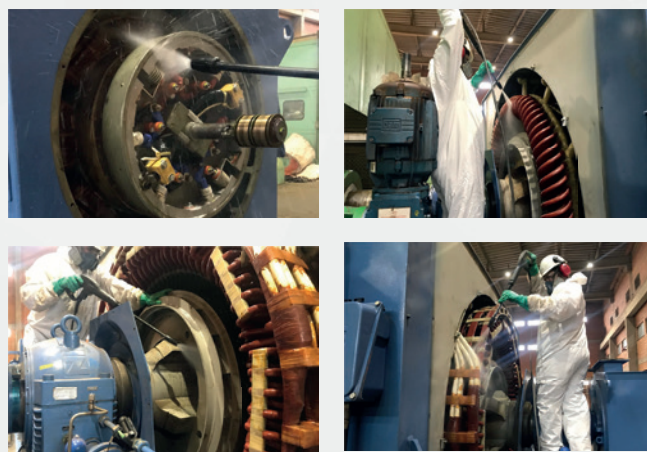
No sistema por conjunto porta escovas, é crucial examinar minuciosamente os alojamentos, escovas, molas, anéis coletores, bem como quaisquer conexões elétricas. A inspeção visa identificar qualquer desgaste, danos ou acumulação de resíduos que possam comprometer o funcionamento eficiente do sistema.



Por outro lado, no sistema por excitatriz estática, a atenção recai sobre a integridade física da própria excitatriz e seus componentes. Isso inclui verificar os diodos retificados e a fiação associada, assegurando-se de que não haja danos ou falhas que possam afetar a geração e regulação adequadas da corrente de excitação.



mulo de contaminantes entre os orifícios de ventilação, por exemplo, sendo o efeito contrário ao objetivo inicial.



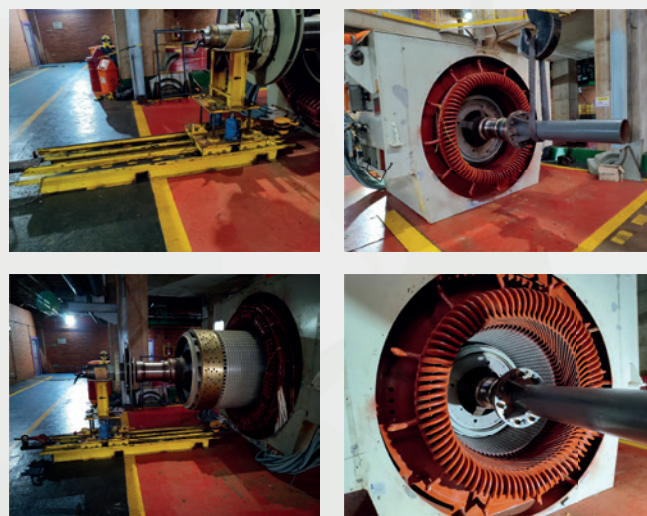
Os testes elétricos são parte fundamental do processo de manutenção e devem ser realizados de forma regular. Eles incluem a verificação da resistência de isolamento dos enrolamentos da excitatriz ou anel coletor, a continuidade dos circuitos elétricos, a polaridade dos diodos retificados na excitatriz estática, entre outros testes específicos pertinentes ao tipo de sistema de excitação utilizado.

Enquanto, na revisão completa, é recomendado a desmontagem completa do equipamento em campo, ou seja, remoção do gerador da base, içamento para o piso zero da casa de força e a realização da desmontagem utilizando dispositivos apropriados para tal execução, conforme exemplificado pelas imagens a seguir.

Quando algum dos componentes se encontram danificados, se faz necessário sua substituição imediata.

4.3 Limpeza e secagem dos enrolamentos

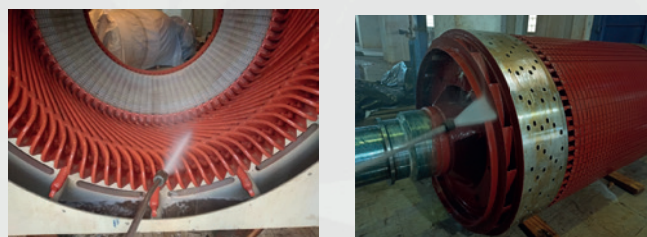
Quando os enrolamentos já se encontram contaminados, alguns métodos de limpeza devem ser adotados. O método mais indicado é a limpeza com solvente dielétrico especialmente desenvolvido para essa aplicação (não sendo um solvente dielétrico comum), com posterior secagem em estufa com temperatura controlada.



As atividades são realizadas conforme o escopo de serviço, sendo dois tipos a considerarmos: revisão parcial e revisão completa.

Nesse escopo, todas as partes do conjunto são limpas individualmente, sendo todas acessíveis.

Na revisão parcial, a máquina está na base de operação, sem a remoção do rotor de dentro do estator. Ou seja, a limpeza é realizada nas partes acessíveis dos enrolamentos principais, bem como do conjunto de excitação. Nesse caso, o núcleo do estator e o pacote do rotor não são acessíveis, sendo necessário o devido cuidado para evitar molhar em excesso essas partes, já que não será possível sua devida limpeza, o que poderia ocasionar acú-





Vale ressaltar o método de aplicação do solvente dielétrico, considerando fatores como o nível de contaminação, dimensão da máquina e os efeitos do solvente em contato com a superfície contaminada. O tempo ideal para ação do solvente é determinante para garantir a eficiência do produto. Em níveis mais elevados, devem ser utilizados panos para intensificar a ação do solvente, facilitando a remoção de contaminantes incrustados.

Cada caso é avaliado individualmente, em acordo com o local de instalação e as condições adversas a serem consideradas. Somente uma equipe especializada pode definir o método ideal de acordo com o cenário existente.

Para o processo de secagem, é utilizado lonas que suportam altas temperaturas, cobrindo a máquina e formando uma estufa. Então é realizado a instalação de sopradores térmicos com temperatura controlada, sendo devidamente posicionados de forma a direcionar a ventilação para o centro do núcleo da máquina, evitando o direcionamento diretamente para as bobinas. A temperatura é monitorada de forma automática, mantendo o ambiente interno da estufa em nível ideal para remover a presença de umidade, até que os níveis de resistência de isolamento sejam considerados satisfatórios. O tempo e a temperatura de secagem dependem do modelo e dimensões da máquina.



Após o processo de limpeza e secagem, a condição de operação do equipamento é evidenciada através de ensaios elétricos.

4.4 Manutenção em motores com rotor bobinado

4.4.1 Preparação para Manutenção

Antes de iniciar qualquer procedimento de manutenção, uma inspeção visual detalhada de todos os componentes é essencial para identificar possíveis desgastes ou danos. A limpeza minuciosa das peças remove detritos que podem afetar o desempenho e a segurança do conjunto.

Assegure-se de que todas as ferramentas necessárias estão disponíveis e em bom estado. Utilize equipamentos de proteção individual adequados para prevenir acidentes durante a manutenção.

4.4.2 Segurança e Conformidade

A manutenção deve ser realizada em conformidade com as normas técnicas relevantes, garantindo que todos os procedimentos sejam seguros e eficazes.

Certifique-se de que o sistema esteja completamente desenergizado antes de iniciar qualquer trabalho de manutenção, para evitar choques elétricos e outros riscos.

4.4.3 Processo de Desmontagem

O processo de desmontagem requer atenção meticulosa aos detalhes e uma abordagem sistemática para evitar danos aos componentes.

4.4.3.1 Desmontagem do Conjunto Anel Coletor

Comece desenergizando e isolando o sistema. Remova cuidadosamente o disco de proteção e os cabos de ligação, com atenção para não danificar os terminais e o próprio anel (com atenção especial para as pistas de contato).

Proceda com a remoção dos componentes do anel coletor, incluindo o desacoplamento do flange e a retirada da chaveta, garantindo que todas as peças sejam armazenadas de maneira organizada para facilitar a montagem subsequente.

4.4.3.2 Desmontagem do Conjunto de Acionamento do Porta-Escovas

Antes de iniciar a desmontagem, limpe a área de trabalho e prepare recipientes para organizar as peças desmontadas.

Com cuidado, remova os rolamentos, anéis de retenção e o eixo de acionamento, observando a ordem e a orientação para uma montagem correta posteriormente.

4.4.3.3 Desmontagem do Conjunto Porta-Escovas

Solte cuidadosamente as abraçadeiras ou mecanismos de fixação e retire as escovas do porta-escovas. Verifique cada escova quanto a desgaste ou danos.

Remova os discos isoladores e anéis de contato, limpando-os e inspecionando-os para qualquer sinal de desgaste elétrico ou físico.

Após a desmontagem, é crucial realizar uma inspeção detalhada de todos os componentes desmontados, identificando peças que necessitam de limpeza adicional, reparo ou substituição. A organização das peças desmontadas e a documentação dos procedimentos são essenciais para uma montagem eficiente e para manter um registro preciso do estado de manutenção do conjunto porta-escovas.

4.4.4 Processo de Montagem

4.4.4.1 Preparação e Montagem do Conjunto Anel Coletor

Suspenda a caixa de proteção das escovas utilizando uma ponte rolante, posicionando seu flange sobre o rebaixo usinado na caixa de proteção do ventilador.



Aplique graxa protetiva no eixo e cubo do anel coletor para proteção contra corrosão e facilidade de movimento.



Utilizando uma cinta e ponte rolante, posicione o coletor de anéis até o encosto no eixo, atentando-se à posição da chaveta.

Com o auxílio de um relógio apalpador, verifique o alinhamento do anel externo do coletor, garantindo que o batimento não exceda 0,03 mm.

Aperte os parafusos do Imetex em etapas, utilizando o torque especificado e seguindo uma ordem de 120° entre eles, para assegurar a uniformidade do torque aplicado.

Coloque o disco de proteção do coletor de anéis e proceda com a instalação dos cabos, cor-

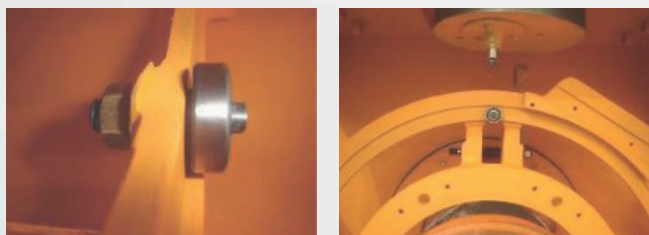
tando-os no comprimento adequado e fixando-os com terminais conforme especificações técnicas.

Garanta a fixação segura dos cabos nos parafusos de ligação do coletor de anéis, utilizando arruelas isolantes e porcas.

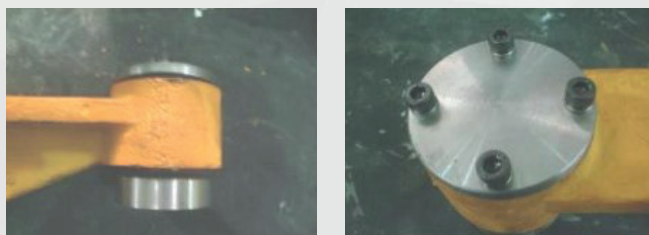
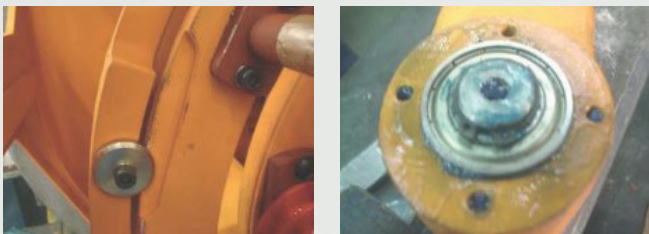
4.4.4.2 Montagem do Conjunto de Acionamento do Porta-Escovas

Antes de iniciar a montagem, limpe todas as peças do conjunto de acionamento com solvente, utilizando um pincel, e finalize com ar comprimido para remover qualquer impureza.

Com o eixo de acionamento apoiado verticalmente, proceda com a montagem dos rolamentos, assegurando-se de não aplicar força excessiva ou pancadas que possam danificá-los.



Após a instalação dos rolamentos e anéis de retenção, introduza o eixo de acionamento no cubo do flange do conjunto, atentando-se para a correta fixação de todos os componentes, incluindo a carcaça do dispositivo de travamento e o disco batente.

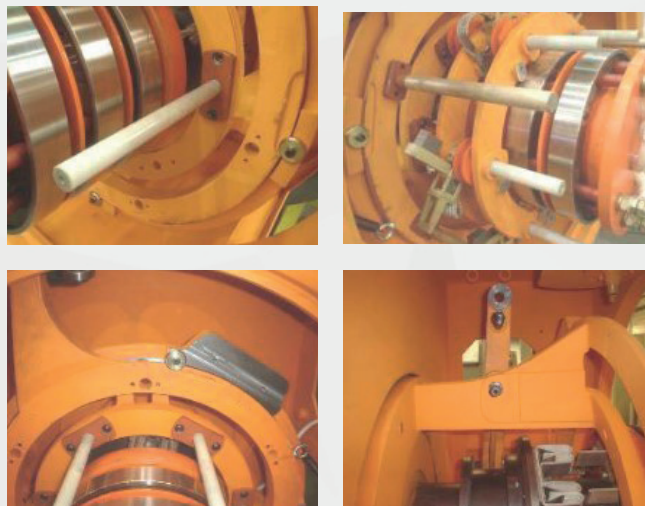


Realize os ajustes necessários no conjunto de acionamento, assegurando o alinhamento correto.

Verifique a posição final e faça os ajustes na rótula com base no movimento da bucha de curto-circuito, garantindo que o rolete movimentador da bucha esteja no centro da pista da bucha para evitar contato desnecessário após a operação.

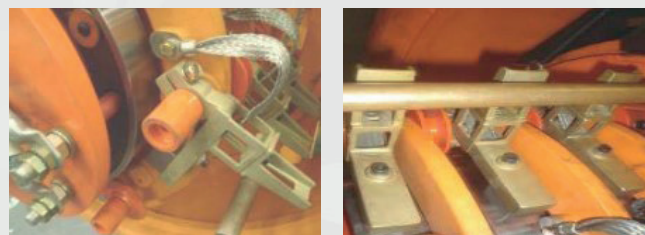
4.4.4.3 Montagem do Conjunto Porta-Escovas

Inicie a montagem introduzindo os pinos isoladores no suporte, fixando as escovas em seus alojamentos e assegurando-se de que estão bem fixadas e alinhadas conforme as especificações.



Proceda com a montagem dos discos isoladores e anéis de contato, observando a limpeza e a correta colocação dos componentes para garantir uma boa isolação elétrica.

Ajuste a posição das hastas das escovas e verifique o movimento do disco de levantamento, assegurando que as escovas estejam uniformemente alinhadas e a uma distância correta do anel coletor.





NOTA: Após a montagem, é fundamental realizar uma verificação minuciosa de todos os componentes e ajustes, incluindo o alinhamento dos contatos da bucha e anel coletor, para garantir a operação segura e eficiente do motor.

4.4.5 Escovas

A seleção de escovas para motores de anéis requer uma análise detalhada das características operacionais da máquina e das condições ambientais em que se encontra. Aspectos como a densidade de corrente, velocidade periférica do comutador ou anel coletor, e o tipo de alimentação são determinantes na escolha do tipo de escova mais adequado. Além disso, fatores ambientais como a umidade relativa do ar e a presença de vapores ou impurezas atmosféricas exigem atenção, visto que podem afetar significativamente o desempenho e a durabilidade das escovas.

Para a efetiva aplicação das escovas, é crucial assegurar a uniformidade das escovas em termos de qualidade e dimensões. As escovas devem deslizar livremente dentro dos porta-escovas, permitindo um contato consistente e eficiente com o comutador ou anel coletor. O procedimento de assentamento das escovas, realizado com lixa de granulação fina, é essencial para otimizar a superfície de contato e minimizar o desgaste inicial.



Conhecer o tipo de escova e suas especificidades são cruciais.

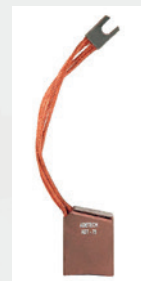
- **Grafíticas / Baquelite Grafite:** indicadas para motores de corrente contínua alimentados por conversores CA/CC tiristorizados de entrada monofásica, destacam-se pela alta capacidade de comutação e densidade de corrente admissível.



- **Eletrografite:** preferencialmente utilizadas em motores de corrente contínua com alimentação por baterias ou conversores CA/CC trifásicos de baixo ripple. Apresentam boa capacidade de comutação e são adequadas para uma ampla gama de densidades de corrente.

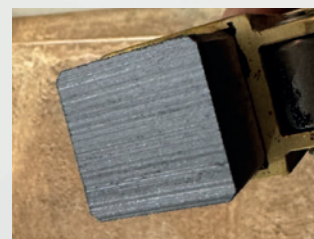


- **Metal Grafite:** Apropriadas para motores alimentados por baterias de baixa tensão e motores de indução com anéis de aço, estas escovas oferecem baixa resistividade e capacidade de comutação razoável, suportando densidades de corrente elevadas.



A formação de pátina sobre o comutador ou anel coletor é um indicativo vital das condições de comutação. Uma pátina uniforme e de espessura ideal é desejável, enquanto variações na sua aparência podem sugerir ajustes necessários nas condições operacionais. O faiscamento observado na interface escova-comutador/anel é influenciado por múltiplos fatores, incluindo a qualidade da escova, pressão das molas, e ajuste correto dos porta-escovas.

A análise dos aspectos visuais das faces das escovas fornece informações valiosas sobre o estado operacional do motor. Desde superfícies impecáveis, indicativas de condições ótimas de funcionamento, até a presença de queimaduras ou depósitos indicativos de sobrecargas elétricas ou comutação inadequada, é fundamental para diagnosticar e remediar prontamente quaisquer irregularidades.



A atenção aos detalhes na escolha, aplicação e monitoramento contínuo das escovas é essencial para o aproveitamento máximo do potencial dos motores elétricos em aplicações industriais.

4.5 Acoplamento

Os acoplamentos são elementos essenciais no design de sistemas mecânicos. Eles são cruciais não apenas para a transmissão eficaz de potência entre a máquina acionadora e a acionada, mas também para garantir a operação eficiente e prolongar a vida útil dos equipamentos. A seleção apropriada e a manutenção de acoplamentos são fundamentais para evitar danos provocados por desalinhamento, minimizar o desgaste e reduzir as falhas operacionais.

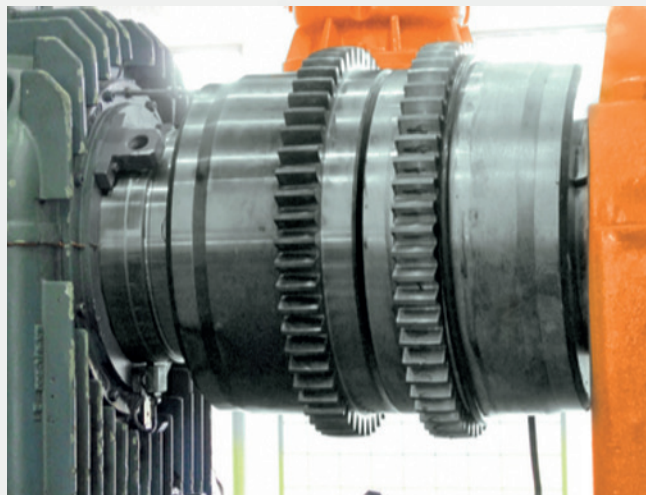
A seleção de acoplamentos deve considerar vários fatores, incluindo o tipo de carga, a necessidade de compensação de desalinhamento, e condições operacionais específicas, como ambiente corrosivo ou variações de temperatura. Uma vez selecionados, a manutenção adequada, incluindo inspeção regular, correto alinhamento e lubrificação (quando necessário).

Dentre os diversos modelos existentes, podemos destacar os principais a seguir.

I. Acoplamento direto: preferido por sua simplicidade e custo-benefício, o acoplamento direto é ideal para aplicações onde não há necessidade de compensação de desalinhamento. No entanto, requer um alinhamento preciso dos eixos para evitar estresse excessivo nos componentes.



II. Acoplamento por engrenagens: permite a transmissão de torque entre eixos que não estão alinhados perfeitamente. Embora ofereça compensação de desalinhamento e alta capacidade de torque, requer manutenção cuidadosa, incluindo lubrificação adequada, para evitar desgaste excessivo.



III. Acoplamento por polias e correias: utilizado comumente para ajustar a relação de velocidade entre o motor e a carga. Requer atenção na tensão da correia e no alinhamento das polias para prevenir desgaste e garantir eficiência na transmissão de potência.



IV. Acoplamento rígido: oferece uma conexão fixa entre dois eixos, garantindo a transmissão de torque sem flexibilidade para compensar desalinhamentos. Apesar de sua robustez e simplicidade, a precisão no alinhamento é crucial para evitar cargas axiais e radiais indesejadas nos eixos e mancais, considerando o projeto de alinhamento do conjunto, já que em alguns casos, a dilatação térmica deve ser considerada e compensada durante o alinhamento.



V. Acoplamento flexível: projetado para tolerar algum grau de desalinhamento entre os eixos, absorvendo vibrações e choques na transmissão. A manutenção envolve a inspeção regular para verificar desgaste ou danos nos elementos flexíveis e, se necessário, sua substituição para manter a operação eficaz.



A manutenção de acoplamentos envolve procedimentos detalhados para cada tipo, incluindo a verificação de desgaste, a correta desmontagem sem danificar componentes, e a lubrificação adequada para acoplamentos que requerem. Essas práticas são vitais para garantir a longevidade e a eficiência dos sistemas mecânicos. Compreender as características específicas e os requisitos de manutenção de cada tipo de acoplamento ajuda a otimizar a transmissão de potência e a minimizar os riscos de falhas. O projeto do fabricante deve ser consultado, garantindo que as especificações estejam sendo devidamente consideradas.

4.5.1 Lubrificação de acoplamentos

A lubrificação em acoplamentos minimiza o contato direto entre superfícies metálicas, reduzindo significativamente o atrito e o desgaste. Isso não apenas aumenta a eficiência operacional, mas também diminui a necessidade de manutenção frequente e substituição de peças, resultando em economias consideráveis de tempo e recursos.

Os lubrificantes utilizados em acoplamentos podem ser classificados em três categorias principais: óleos, graxas e lubrificantes sólidos.

I. Óleos: São frequentemente utilizados em acoplamentos de alta velocidade devido à sua capacidade de fluir entre as partes móveis, proporcionando uma camada contínua de lubrificação. Os óleos também ajudam na dissipação do calor, mantendo a temperatura de operação dentro de limites seguros.

II. Graxas: Preferidas em acoplamentos que operam em velocidades moderadas ou em ambientes onde a contaminação é uma preocupação. A graxa, sendo mais espessa, permanece no local de aplicação por períodos mais longos, oferecendo uma proteção duradoura contra o desgaste. No entanto, sua capacidade de dissipar calor é inferior à dos óleos.

III. Lubrificantes Sólidos: Usados em condições extremas de temperatura ou em ambientes onde lubrificantes líquidos não são viáveis. Exemplos incluem grafite e bisulfeto de molibdênio, que proporcionam uma lubrificação eficaz mesmo sob altas cargas e temperaturas elevadas.

Os sistemas de lubrificação para acoplamentos podem ser manuais ou automáticos, cada um com suas próprias vantagens e aplicações específicas.

A lubrificação manual requer que o operador aplique lubrificante nos componentes do acoplamento em intervalos regulares. Embora seja simples e econômica, a lubrificação manual pode ser inconsistente e dependente da experiência e da diligência do operador.

A lubrificação automática utiliza dispositivos automáticos, como bombas e injetores, para fornecer uma quantidade controlada de lubrificante aos componentes do acoplamento em intervalos regulares.

los predeterminados. Isso garante uma lubrificação consistente e reduz o risco de erro humano.

É crucial escolher o lubrificante com base no tipo de acoplamento, velocidade de operação, carga, temperatura e ambiente. A consulta de manuais técnicos e normas de fabricantes é essencial. Se faz necessário estabelecer um cronograma de lubrificação baseado nas recomendações do fabricante e nas condições operacionais.

Inspeções regulares e testes de desempenho ajudam a identificar necessidades de manutenção preventiva e ajustes na lubrificação. A análise de óleo pode fornecer insights valiosos sobre a condição do acoplamento e a eficácia da lubrificação.

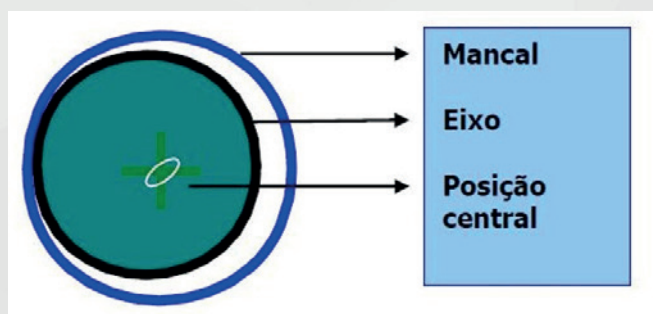
4.6 Vibração

4.6.1 Definição

A vibração é o movimento alternado de um corpo em relação ao seu centro de equilíbrio que pode se repetir de forma regular ou irregular, em um intervalo de tempo. Logo, a vibração pode ser proposital ou indesejada.

Vibrações mecânicas podem ser intencionalmente geradas para realizar trabalho útil em aplicações como alimentadores, britadores, compactadores e ensaios de fadiga, configurando o que chamamos de vibração proposital. Por outro lado, existem vibrações indesejadas, comumente observadas em máquinas rotativas, que resultam de fontes de vibração intrínsecas ao funcionamento da máquina. Embora essas vibrações não possam ser completamente eliminadas, é possível controlá-las dentro de limites aceitáveis através de técnicas de manutenção e ajuste adequados.

Em relação às vibrações indesejadas, um exemplo comum ocorre na dinâmica entre um eixo e seu mancal.



Idealmente, um eixo deveria manter-se centralizado em seu mancal durante a rotação. Nesse cenário ideal, o rotor giraria exatamente no centro do mancal, minimizando o atrito e produzindo apenas a vibração natural inerente a qualquer corpo em movimento, resultando em um nível baixo de vibração. No entanto, na prática, isso é quase impossível de alcançar devido a diversos fatores que aumentam o atrito entre o eixo e o mancal.

4.6.2 Fontes vibratórias

As fontes vibratórias mais comuns são causadas por efeitos dinâmicos, que incluem: tolerâncias na construção física da máquina, folgas nos mancais e em elementos rotativos. Outras fontes importantes de vibração incluem desbalanceamento de massa, desalinhamento entre os conjuntos acionados e acionadores, falta de rigidez mecânica, e ressonância. Estes são apenas alguns exemplos dentre várias outras causas possíveis que podem influenciar o comportamento vibratório de sistemas mecânicos.

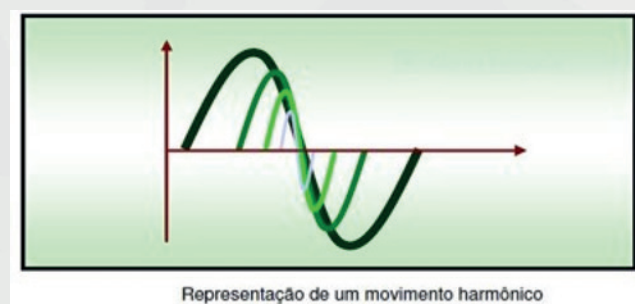
4.6.3 Grandezas físicas

Agora que compreendemos a existência das vibrações, é importante entender suas principais grandezas físicas: frequência, amplitude e fase.

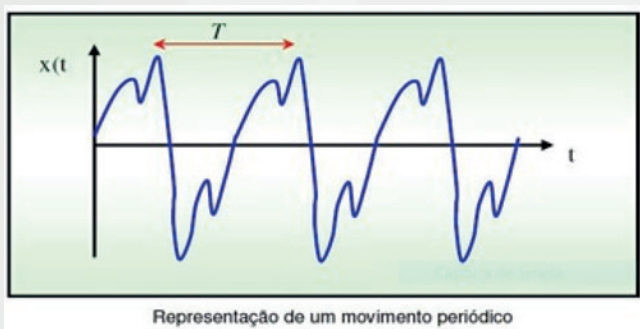
Frequência refere-se ao número de ciclos completados por segundo, medida em hertz (Hz). A frequência é crucial para identificar as fontes de vibração através da análise dos sinais.

Existem diferentes tipos de movimentos associados à frequência:

a) o movimento harmônico, que é regular e se repete dentro de um mesmo ciclo;



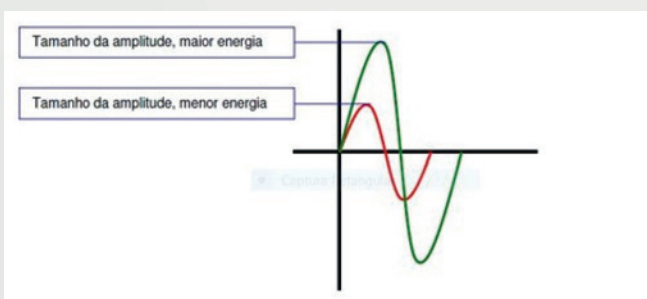
b) o movimento periódico, que se repete em intervalos de tempo iguais;



c) o movimento randômico, que é irregular e conhecido como ruído.

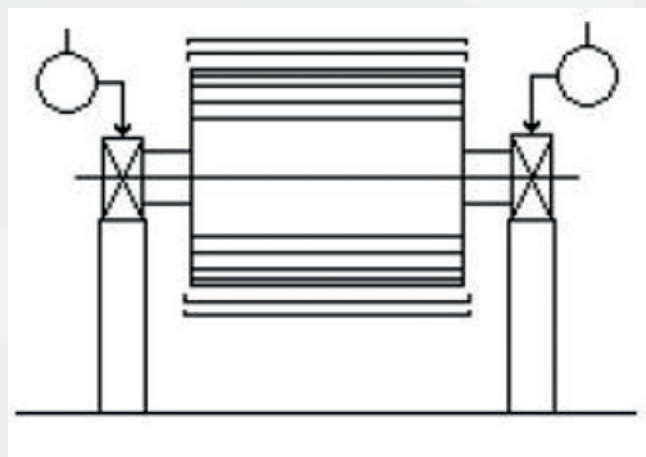
Importante notar que todo movimento harmônico é periódico, porém, nem todo movimento periódico é harmônico. A relação entre RPM (rotações por minuto) e frequência é direta: uma máquina que opera a 3600 RPM realiza 60 ciclos por segundo, ou seja, 60 Hz.

Amplitude está relacionada com a quantidade de energia do sinal vibratório. Em um sistema de coordenadas cartesianas, com o tempo no eixo X e a amplitude no eixo Y, a amplitude da onda reflete a energia da vibração.

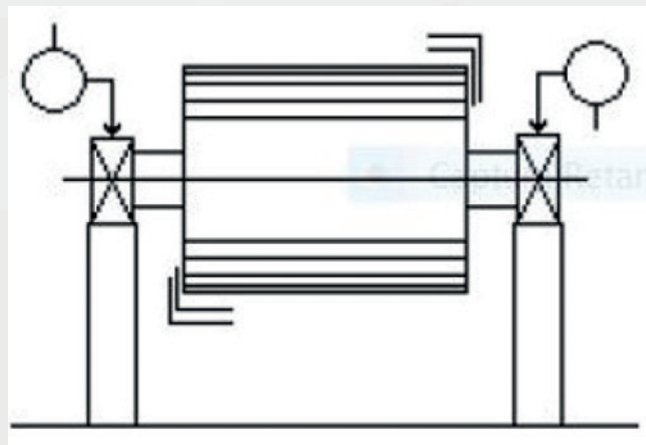


Maior amplitude indica maior energia e, potencialmente, maior impacto destrutivo da vibração.

Fase descreve a relação temporal entre as forças atuantes e a resposta física da máquina. Utilizando o exemplo de um rotor desbalanceado, se a massa desbalanceada está no mesmo ângulo em ambos os lados, dizemos que está em fase.

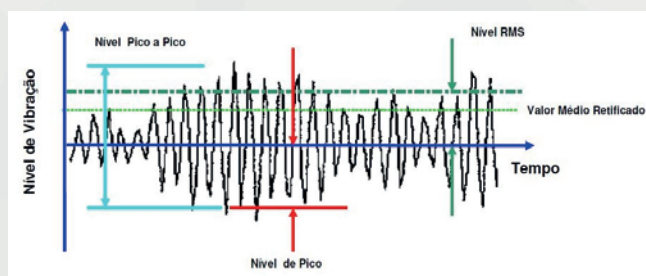


Se a massa está em ângulos opostos, as forças estão 180 graus fora de fase, indicando direções opostas de atuação das forças. A análise da fase é fundamental para entender o comportamento da máquina e identificar fontes vibratórias para correção.



4.6.4 Níveis de vibração

Ao analisar um espectro de vibração em função do tempo, podemos definir os níveis de vibração como pico a pico, valor de pico, RMS (Root Mean Square) e valor médio retificado.



Valor Médio Retificado: essa é uma média dos valores absolutos das amplitudes ao longo do tempo. Embora seja um indicador da magnitude

geral da vibração, ele é menos utilizado na análise prática porque não reflete diretamente nenhuma quantidade física que indique a severidade da vibração.

Valor Pico-a-Pico: indica a diferença entre o valor máximo e o mínimo alcançado pela vibração. É útil para identificar a excursão total da vibração, mas pode não representar adequadamente a energia total envolvida.

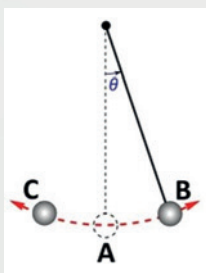
Valor de Pico: refere-se ao máximo valor absoluto alcançado pela vibração. Este valor é importante para identificar picos de vibração, que podem indicar problemas pontuais ou transientes.

Valor RMS: Esta medida é crucial pois considera tanto a magnitude quanto a duração de cada ciclo de vibração, fornecendo uma medida que corresponde à energia total e, portanto, ao potencial destrutivo da vibração. É o parâmetro mais relevante para a análise de vibração.

4.6.5 Parâmetros de vibração

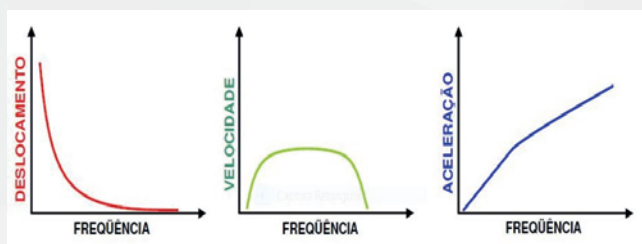
Os parâmetros de vibração são fundamentais na análise de vibrações em máquinas rotativas. Existem três parâmetros principais: deslocamento, velocidade e aceleração. Na prática, medimos o deslocamento em micrômetros (μm), a velocidade em milímetros por segundo (mm/s) e a aceleração em G, onde 'G' representa a aceleração devido à gravidade, aproximadamente 10 metros por segundo ao quadrado.

Deslocamento é medido como a amplitude máxima da oscilação de um objeto em relação à sua posição de repouso. Por exemplo, em um pêndulo, o deslocamento seria a distância entre a extremidade do arco e o ponto central.



Velocidade refere-se à rapidez com que o objeto se move dentro deste arco de oscilação, medindo quão rápido o pêndulo se move de um ponto a outro, por exemplo.

Aceleração descreve a variação da velocidade ao longo do tempo, ou seja, a rapidez com que o pêndulo ganha ou perde velocidade, por exemplo.



Cada parâmetro é mais eficaz em diferentes faixas de frequência. O deslocamento é mais eficiente em baixas frequências (abaixo de 10 Hz), onde as amplitudes tendem a ser maiores. A velocidade é ideal para frequências intermediárias, de 10 a 1000 Hz, pois é menos sensível às variações de amplitude em diferentes frequências. Por fim, a aceleração é mais indicada para altas frequências, de 1000 a 10.000 Hz, pois capta melhor os componentes de alta frequência.

A escolha do parâmetro e do tipo de sensor a ser utilizado depende dessas características e do objetivo da medição.

4.6.6 Sensores

Sensores de vibração são dispositivos projetados para coletar dados críticos de máquinas em operação, especificamente frequência e amplitude das vibrações. Esses dados são transmitidos para equipamentos analisadores aos quais os sensores estão conectados, permitindo a monitoração e análise em tempo real das condições mecânicas das máquinas.

Existem vários tipos de sensores de vibração, cada um adequado para diferentes aplicações e faixas de frequência, dos quais podemos destacar:

- **Acelerômetros:** medem a aceleração da vibração. São extremamente versáteis e eficazes para detectar uma ampla gama de frequências, o que os torna ideais para monitorar máquinas de alta velocidade.



- **Velocímetros:** especializados em medir a velocidade das vibrações, sendo mais adequados para frequências médias e são úteis para máquinas que operam em velocidades mais constantes.



- **Sensores de Deslocamento:** dedicados ao deslocamento físico dos componentes da máquina. São mais eficazes em baixas frequências, onde o movimento real é mais perceptível e crítico para a análise.



A seleção de um sensor de vibração adequado para uma máquina rotativa deve considerar vários fatores, como por exemplo:

- **Faixa de Frequência:** é crucial escolher um sensor que possa capturar as frequências específicas das vibrações emitidas pela máquina. Acelerômetros são melhores para altas frequências, enquanto velocímetros e sensores de deslocamento são recomendados para médias e baixas frequências, respectivamente.

- **Ambiente de Operação:** o sensor deve ser capaz de operar de forma eficaz no ambiente em que a máquina está instalada. Fatores como temperatura, umidade, e presença de contaminantes podem afetar o desempenho do sensor.

- **Sensibilidade e Precisão Desejada:** dependendo da precisão necessária e da sensibilidade às vibrações menores, o tipo de sensor e suas especificações técnicas devem ser cuidadosamente avaliados. Sensores mais sensíveis são necessários para detectar falhas sutis ou para uso em equipamentos de alta precisão.

Ao considerar esses aspectos, é possível escolher o sensor mais adequado que não apenas atenda às necessidades técnicas, mas também otimize o desempenho e a manutenção da máquina.

4.6.7 Equipamento (Analisador de vibração)

Analisadores de vibração são instrumentos cruciais no monitoramento e diagnóstico de condições de máquinas industriais. Eles coletam dados de vibração dos sensores e utilizam processamento de sinal para transformar essas informações brutas em espectros de frequência, que são essenciais para a análise detalhada.

Os analisadores começam recebendo dados dos sensores de vibração. Esses dados normalmente incluem medidas de aceleração, velocidade ou deslocamento ao longo do tempo. Utilizando

técnicas de Transformada de Fourier, especialmente a Transformada Rápida de Fourier (FFT), os analisadores convertem os sinais de tempo em sinais de frequência. Este processo divide o sinal vibratório em seus componentes de frequência individuais, revelando as características distintas das vibrações da máquina.

Os dados convertidos são então exibidos como espectros em gráficos de frequência. Estes gráficos mostram a amplitude das vibrações em várias frequências, permitindo que os técnicos identifiquem padrões específicos de fontes vibratórias.

Os analisadores de vibração modernos também oferecem recursos como:

- **Análise de Tendências:** monitoramento da evolução das condições da máquina ao longo do tempo.

- **Diagnósticos Automatizados:** uso de algoritmos avançados para sugerir potenciais problemas e suas soluções.

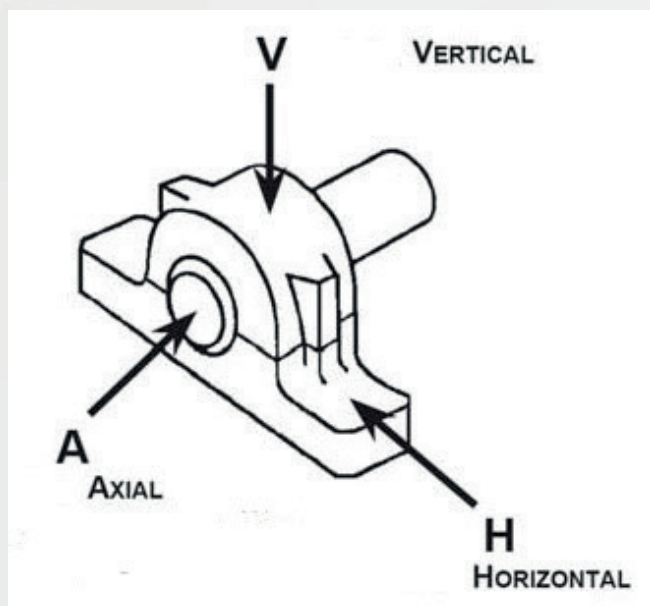
- **Integração com Sistemas de Manutenção:** permite que os dados de vibração sejam integrados a sistemas de gestão de manutenção para ações proativas.

Esses dispositivos são essenciais para a manutenção preditiva em indústrias, ajudando a evitar paradas não planejadas e a maximizar a eficiência operacional. Eles são parte integrante de um sistema de monitoramento de condição que ajuda a manter a saúde das máquinas e a segurança das operações industriais.

Posteriormente, abordaremos o sistema mais avançado disponível no mercado, ressaltando seus benefícios e capacidade de realizar monitoramento online, bem como suas diversas funcionalidades.

4.6.8 Pontos de medição

Na medição de vibração em máquinas rotativas, como motores ou geradores, a coleta é comumente realizada nos mancais, especificamente nos lados Acionado e Oposto ao Acionado. Em cada mancal, as medições são coletadas em três direções principais: Horizontal, Vertical e Axial.



Estas representam os três eixos principais de medição. Na prática, o eixo axial corresponde à direção do movimento axial da máquina; o eixo horizontal é medido na lateral do mancal; e o eixo vertical é obtido no ponto mais alto do mancal.

4.6.9 Limites

Ao realizar a análise de vibração em um mancal de deslizamento de uma máquina rotativa, a primeira informação que observamos é o nível de vibração em RMS, que reflete a amplitude da energia contida no sinal vibratório coletado. Historicamente, a norma ISO 2372 de 1974 era usada para especificar os limites de vibração com base apenas na potência da máquina e no tipo de fundação.

LIMITES DE VIBRACAO - Nivel Global				
VELOCIDADE (mm/s) - RMS				
ISO 2372 - ANO 1974				
Máquinas pequenas Classe I	Máquinas Médias Classe II	Máquinas Grandes		Severidade
		suporte rígido Classe III	suporte flexível Classe IV	
1,8 mm/s	2,8 mm/s	4,5 mm/s	7,1 mm/s	A/B
4,5 mm/s				
7,1 mm/s	11,2 mm/s	18 mm/s	18 mm/s	C
				D

No entanto, é importante notar que o comportamento de cada máquina é único. Portanto, os níveis de vibração aceitáveis são melhor determinados pela própria tabela do fabricante, que leva em consideração o comportamento da máquina em testes realizados na fábrica.

De acordo com a ISO 2372, os níveis de vibração são classificados em várias classes de severidade dependendo da potência e do tipo de fundação das máquinas:

- **Classe I:** inclui máquinas pequenas com potência de até 15 kW.
- **Classe II:** abrange motores elétricos e máquinas de dimensões médias, com potências de 15 a 75 kW em bases rígidas e até 300 kW em bases flexíveis.
- **Classe III:** para máquinas grandes solidárias a um único bloco de fundação, com potência acima de 75 kW.
- **Classe IV:** inclui máquinas turbinadas de grande porte, sem uma faixa de potência específica, onde os limites devem ser observados conforme recomendado pelo fabricante.

Na prática industrial, especialmente para máquinas grandes com potências acima de 1 MW em bases rígidas, normalmente utiliza-se a referência de classe III. Os níveis de severidade são divididos em:

- **A/B:** Valores de até 7,1 mm/s são considerados aceitáveis para operação prolongada.
- **C:** Valores entre 7,1 mm/s e 18 mm/s indicam que o equipamento pode operar por um período limitado.
- **D:** Valores acima de 18 mm/s são considerados perigosos, sugerindo que a máquina está sujeita a danos e deve ser parada para reparos.

Além disso, definem-se dois níveis de alerta para o monitoramento:

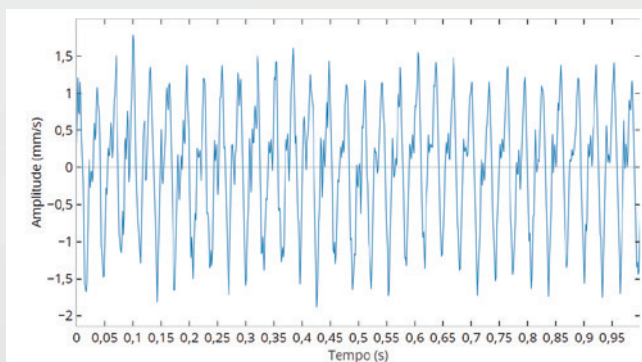
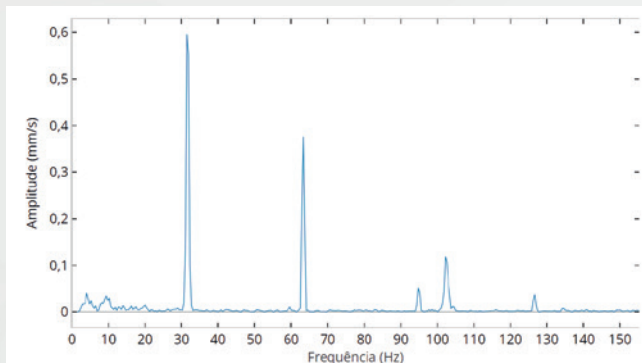
- **Alerta 1:** Corresponde à severidade C.
- **Alerta 2:** Inicia-se quando os níveis alcançam a severidade D.

Esses parâmetros e classificações fornecem uma base geral para os limites definidos em normas técnicas.

4.6.10 Análise de espectros

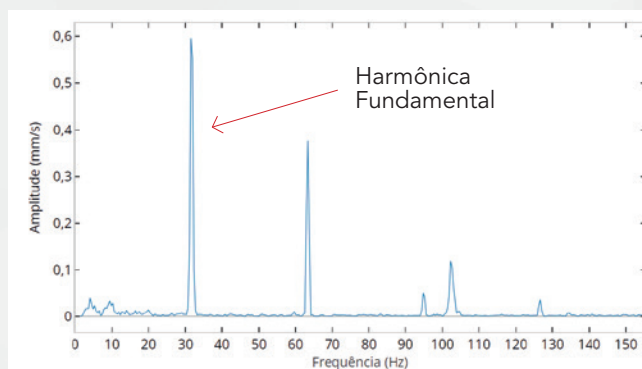
Entendidos os fundamentos técnicos até aqui, vamos agora explorar a análise de vibração de espectros.

Ao converter o sinal captado pelos sensores em espectros, a energia do sinal (amplitude) pode ser expressa em relação ao tempo ou à frequência, cada um útil para tipos específicos de análise.

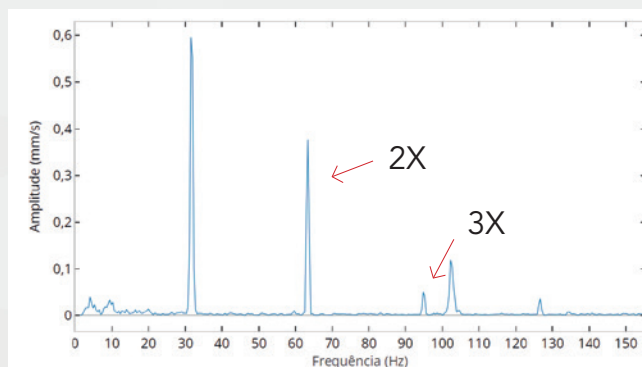


Um espectro de frequência medido em termos de velocidade inclui componentes chamados harmônicas. Para entender isso, é essencial lembrar que, por exemplo, uma máquina girando a 1800 RPM tem sua vibração natural em 30 Hz. Isso ocorre porque convertendo rotações por minuto (RPM) em ciclos por segundo (Hz), como discutido anteriormente, resulta nesse valor.

Analisando o espectro de uma máquina com essas características, notamos uma amplitude proeminente exatamente em 30 Hz, conhecida como harmônica fundamental. Esta representa a vibração inerente à frequência natural do equipamento. Além da fundamental, outras harmônicas podem ser identificadas em diferentes frequências, originadas de várias fontes vibratórias.



Para avaliações, considera-se essencial observar as harmônicas duas e três vezes a fundamental. Ou seja, se a fundamental está em 30 Hz, as harmônicas em 60 Hz e 90 Hz devem ser examinadas, pois estão associadas a outras fontes vibratórias.



Na identificação das harmônicas de um espectro, considera-se:

- O plano de referência primário, que pode ser radial ou axial, associado aos eixos de medição. Radial corresponde às posições vertical e/ou horizontal; axial ao ponto de medição axial.
- A detecção dos parâmetros relevantes.
- As frequências dominantes, que são as harmônicas com base na fundamental.
- A relação de fases referenciando dois sensores, um no mancal lado acionado e outro no oposto.

Vamos agora aplicar esse conhecimento analisando um caso prático de fonte vibratória. É crucial conhecer a máquina em estudo, considerando os efeitos aos quais está sujeita. Por exemplo, em um gerador elétrico, as principais fontes de vibração são desbalanceamento, desalinhamento e problemas elétricos, cada uma com características distintas em um espectro de vibração. O desbalanceamento ocorre quando o eixo de massa não alinha com o eixo rotativo, criando forças centrí-

fugas desbalanceadas, categorizadas em estático, conjugado e dinâmico.

Quando vibrações destrutivas resultam de desbalanceamento, a análise predominante é no plano radial, embora possa ser axial e radial dependendo da causa. Neste exemplo, as amplitudes mais proeminentes são observadas radialmente. O desbalanceamento pode ser detectado nos três parâmetros e domina a frequência de 1x a harmônica fundamental.

A relação de fases varia de acordo com a causa raiz. A compreensão da fase, essencial para avaliação precisa, depende da coleta simultânea de medições em dois mancais, considerando a orientação do sensor nas medições axiais. Se a harmônica predominante é 1x a frequência fundamental no plano radial, com 0° de diferença de fase entre os mancais, a fonte vibratória é provavelmente o desbalanceamento estático.

Com esse caso, podemos aprender o básico para análise vibração. Existem diversos casos a serem analisados. Lembrando que o que vimos até aqui foi para análise em mancais de deslize utilizando o parâmetro de velocidade.

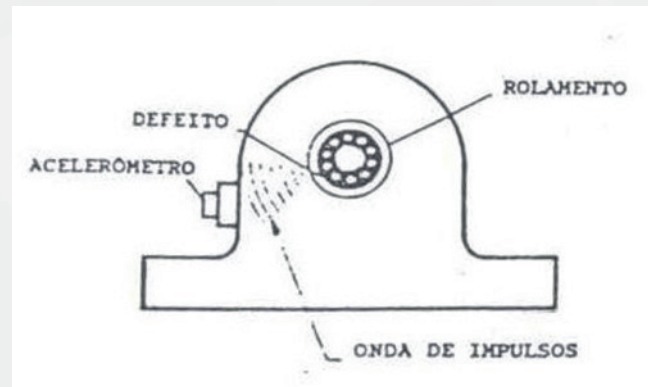
Para mancais de rolamento, a análise envolve uma complexidade adicional. Ainda assim, o princípio fundamental permanece o mesmo: avaliamos o parâmetro de aceleração, que é crucial para rolamentos; a amplitude, que representa a energia dos sinais; e as frequências nas quais as fontes vibratórias se manifestam, sendo o elemento chave. Em mancais de rolamento, é necessário atentar para as vibrações que estimulam frequências mais altas. Assim, consideramos uma frequência máxima de coleta de 13.500 Hz e utilizamos o método mais empregado na análise de rolamentos, conhecido como envelope de aceleração.

4.6.11 Envelope de aceleração

A técnica de envelope é um método avançado para demodulação de sinais de alta frequência, amplamente reconhecida como uma das abordagens mais eficazes para avaliar as condições de rolamentos. Ela permite monitorar a evolução de falhas potenciais desde o início, facilitando decisões preventivas.

Essa técnica baseia-se no princípio de que cada vez que uma esfera passa por um defeito na

pista externa de um rolamento, ocorre um choque. Se o rolamento tiver 8 esferas e a distribuição entre elas for uniforme, resultará em 8 choques por rotação, repetindo-se periodicamente.



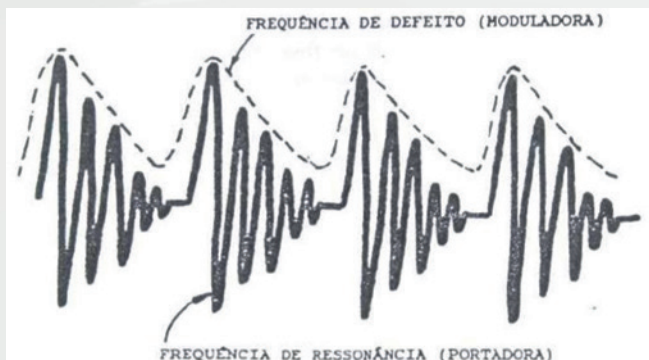
Esses choques de curta duração e baixa frequência excitam as frequências de ressonância do mancal ou da estrutura do equipamento, permitindo que defeitos no rolamento produzam uma série de choques periódicos em frequências características, que podem ser calculadas a partir das dimensões geométricas do rolamento.

Em termos de implementação, os impactos dos elementos do rolamento geram frequências baixas que se localizam próximas às frequências de rotação do equipamento e seus harmônicos no espectro.



Estas frequências baixas se propagam sem perda de intensidade, o que pode mascarar as frequências de defeito e dificultar o diagnóstico. No entanto, esses impactos excitam as frequências de ressonância, resultando em picos de amplitude em alta frequência.

Na prática, isso se traduz em uma modulação de amplitude, onde a frequência de ressonância da estrutura atua como portadora e a frequência de defeito como moduladora.



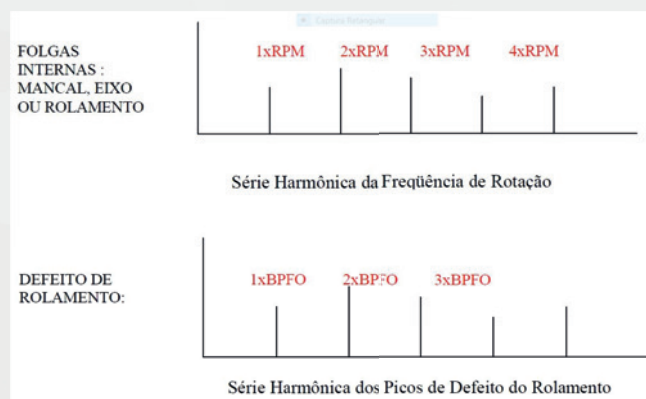
As carcaças dos mancais, sendo estruturas muito rígidas, têm uma resposta dinâmica em altas frequências que é pouco influenciada por outras fontes de vibração, minimizando o mascaramento dos sinais de rolamento que ocorre em frequências mais baixas. Isso resulta em uma análise de alta qualidade dos sinais de alta frequência.

O processo de envelope é eletrônico, onde os sinais de defeito, destacados em alta frequência, são convertidos para uma faixa de baixa frequência para análise mais clara. Os sinais coletados pelo acelerômetro são amplificados e os de alta frequência são isolados por um filtro de passa-banda alta. Esses sinais de alta frequência, modulados pelos de baixa, passam por um processo de demodulação, que envolve a retificação para separar e analisar as frequências moduladoras isoladamente no espectro.

Após essa demodulação, os resultados são apresentados em unidades de gravidade de envelope (gE), permitindo o uso de tabelas para definir limites baseados em RMS global.

A análise da tabela anterior ajuda a classificar a condição do rolamento como aceitável, insatisfatório ou inaceitável, dependendo do range usado, do diâmetro e da velocidade do equipamento.

A avaliação de defeitos pós-aplicação da técnica de envelope requer o conhecimento prévio das especificidades construtivas do rolamento e do equipamento. Cada tipo de rolamento tem suas frequências características de defeitos, que podem incluir problemas elétricos, folgas internas, entre outros, manifestando-se em séries harmônicas específicas, como a frequência elétrica de 120 Hz ou a frequência de rotação para folgas internas.



A BPFO (Frequência de Passagem de Elementos Rolantes por um Ponto da Pista Externa) é um exemplo de defeito que aparece em série harmônica relacionada à pista externa.

LIMITES ENVELOPE DE ACELERAÇÃO (gE)					
Range Recomendado		Diâmetro entre 200 e 500 mm	Diâmetro entre 50 e 300 mm	Diâmetro entre 20 e 150 mm	
500 Hz	1000 Hz	Rotação < 500 RPM	Rotação entre 500 e 1800 RPM	Rotação entre 1800 e 3600 RPM	
0,75	1	ACEITÁVEL (A/B)	ACEITÁVEL (A/B)	ACEITÁVEL (A/B)	
1,5	2	INSATISFATÓRIO (C)	ACEITÁVEL (A/B)	ACEITÁVEL (A/B)	
3,5	4	INSATISFATÓRIO (C)	INSATISFATÓRIO (C)	ACEITÁVEL (A/B)	
7,5	10	INACEITÁVEL (D)	INACEITÁVEL (D)	INSATISFATÓRIO (C)	
				INACEITÁVEL (D)	

4.6.12 Monitoramento de Vibração Online

O mercado mundial disponibiliza uma vasta gama de dispositivos para a análise de vibração que integram sensores, comunicação e plataforma dedicada ao monitoramento online.

O sensor, um acelerômetro, coleta pulsos elétricos que correspondem à amplitude da vibração e tem a capacidade de medir os três eixos com uma única leitura. Esse sensor se comunica com a plataforma na nuvem através do Gateway ou aplicativo.



A plataforma online oferece monitoramento de diversos equipamentos em um único ambiente, diagnósticos avançados com inteligência artificial, integração de dados via API, e a capacidade de gerir manutenções com um sistema CMMS integrado. Além disso, permite a ativação de sensores e a análise de vibração em tempo real, fornecendo notificações diárias sobre o estado dos ativos e backup de parâmetros de dispositivos conectados.

O monitoramento online de vibração permite a detecção precoce de falhas, reduzindo paradas não planejadas e prolongando a vida útil dos equipamentos. Com essa tecnologia, as manutenções podem ser realizadas de forma mais estratégica, baseadas nas necessidades reais do equipamento, o que resulta em economia de custos e otimização de recursos. Além disso, garante que as máquinas operem dentro de parâmetros seguros, aumentando a segurança no local de trabalho e melhorando a eficiência operacional.

A documentação detalhada gerada, ajuda em análises futuras e conformidade regulatória, tornando o monitoramento de vibração uma ferramenta valiosa para qualquer setor que dependa de maquinário rotativo.

4.7 Alinhamento

O alinhamento refere-se ao ajuste preciso da posição relativa de máquinas ou componentes, para garantir que eles estejam em uma linha reta ou de acordo com as especificações técnicas requeridas.

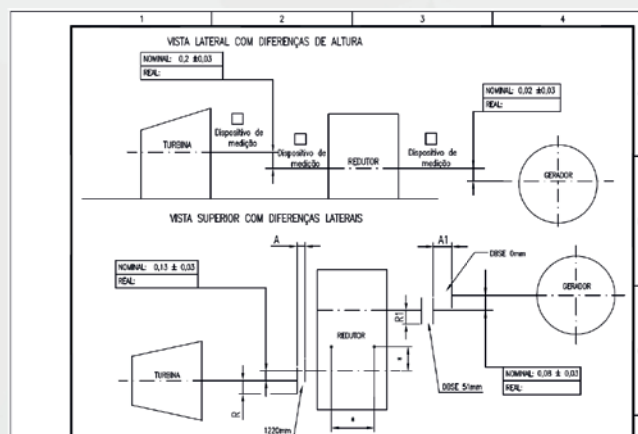
Em motores e geradores, certas partes e componentes requerem alinhamento entre si: o

eixo deve estar alinhado com a linha de centro da máquina acionada ou acionadora; os mancais devem estar alinhados com o eixo; e deve haver uma folga adequada entre as partes móveis e estacionárias, como o pacote do rotor e do estator; entre outros.

Vários fatores são cruciais para a execução de um alinhamento eficiente: todas as superfícies, incluindo bases de máquinas e flanges de acoplamento, devem estar limpas e livres de detritos; é essencial garantir a inexistência de desgaste, danos ou folgas nos componentes; a base da máquina deve estar nivelada para evitar tensões desnecessárias nos componentes; e a fundação deve estar sólida e livre de rachaduras ou movimentos que possam comprometer o alinhamento.

4.7.1 Projeto de alinhamento

Um projeto de alinhamento é um plano detalhado e sistemático para ajustar o posicionamento de componentes mecânicos, como eixos, mancais e/ou engrenagens, entre outros.



As tolerâncias de alinhamento são determinadas pelo fabricante, definindo os limites aceitáveis. Diferentes tipos de máquinas, seja motores ou geradores, têm requisitos específicos de alinhamento baseados em suas funções e cargas operacionais.

As condições em que o equipamento opera, como temperatura, carga e velocidade, influenciam as tolerâncias de alinhamento, pois fatores como expansão térmica ou carga dinâmica podem afetar o alinhamento ideal.

NOMINAL: 0,02 ±0,03
REAL:

Equipamentos destinados a operações de longa duração podem exigir tolerâncias mais estritas para garantir durabilidade e eficiência ao longo do tempo.

Considerações sobre os riscos de falha e as consequências dessas falhas ajudam a determinar quão rigorosas as tolerâncias de alinhamento devem ser para minimizar riscos operacionais.

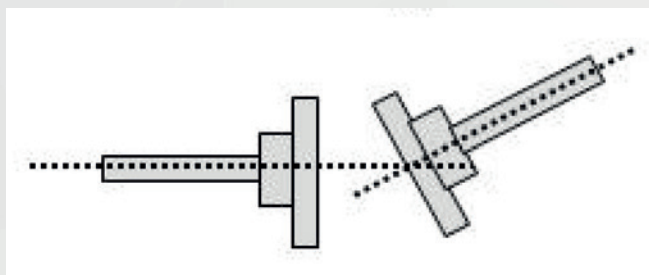
Normas internacionais e práticas recomendadas da indústria (como as da ISO) também fornecem diretrizes para definir tolerâncias de alinhamento.

Ao considerar todos esses fatores, um protocolo de alinhamento pode ser gerado para definir limites e tolerâncias que garantem o desempenho otimizado e seguro dos equipamentos envolvidos, disponibilizando essas determinações para a instalação do equipamento no cliente.

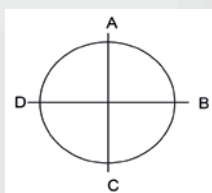
4.7.2 Alinhamento de eixo

Existem três principais tipos de alinhamento entre eixos: alinhamento axial (GAP); alinhamento angular; e alinhamento radial (ou paralelo). Cada tipo deve ser cuidadosamente verificado para evitar impactos negativos no equipamento que podem resultar em falhas durante a operação.

O **alinhamento angular** ocorre quando os eixos de duas máquinas formam um ângulo entre si ao longo do plano vertical ou horizontal.



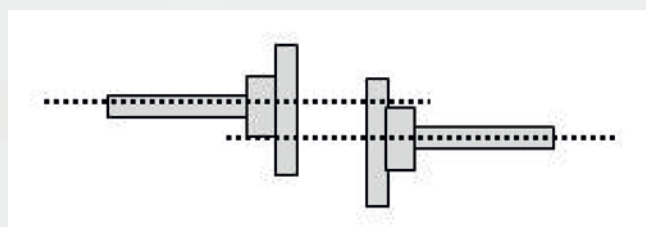
É identificado medindo-se a diferença de espessura entre as faces dos acoplamentos nos ângulos de 0, 90, 180 e 270 graus do perímetro do acoplamento.



Posição	ANGULAR
A	0,00 mm
B	0,00 mm
C	-0,02 mm
D	-0,01 mm

Um eixo está angularmente desalinhado em relação ao outro quando há uma variação significativa nestas medidas. Isso pode causar cargas irregulares nos mancais e aumentar o desgaste dos acoplamentos e dos eixos, além de potencialmente provocar vibrações indesejadas.

O **alinhamento radial** ocorre quando os centros dos eixos das duas máquinas estão em paralelo, mas há um deslocamento lateral entre eles.

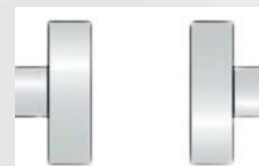


Pode ser medido verificando a coincidência dos centros dos eixos ao longo de sua extensão.

Posição	RADIAL
A	+0,03 mm
B	0,00 mm
C	0,00 mm
D	+0,10 mm

Desalinhamentos radiais também provocam carga excessiva em mancais e acoplamentos, levando ao aumento do desgaste e possíveis falhas mecânicas.

O **alinhamento axial**, também chamado de **GAP**, refere-se à distância entre as faces dos acoplamentos no ponto de junção dos eixos de duas máquinas (gerador e um redutor, por exemplo). Este espaço é essencial para permitir a expansão térmica e a movimentação axial do rotor sem causar tensão nos eixos ou nos próprios acoplamentos. O GAP correto evita o contato metal com metal, que pode causar desgaste e falhas prematuras.

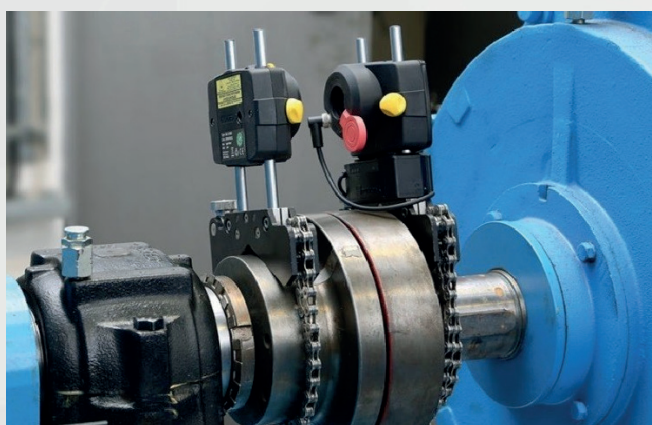


Diversos equipamentos e ferramentas são utilizados no processo de alinhamento, cada um com suas próprias características e aplicações. Dentre eles, podemos citar:

Relógios comparadores ou apalpadores: são dispositivos de medição analógicos que usam um ponteiro para indicar pequenas diferenças de posição quando aplicados a um referencial fixo. São comuns para medir o alinhamento radial e angular, medindo várias posições ao redor do acoplamento do eixo a ser rotacionado.



Sistemas de alinhamento a laser: equipamentos modernos que utilizam a tecnologia laser para medir com precisão o desalinhamento entre eixos. Oferecem leituras mais rápidas e precisas do que métodos mecânicos tradicionais. Um emissor laser é montado em um eixo e um receptor no outro. À medida que os eixos giram, o sistema mede o deslocamento do feixe laser para determinar o desalinhamento em termos radiais e angulares.



Aplicativos e softwares de alinhamento: possuem softwares especializados que auxiliam na interpretação das medições de alinhamento, fornecendo guias visuais e cálculos automáticos para ajustes. Usados em conjunto com ferramentas de medição, esses programas podem guiar o usuário através do processo de alinhamento, sugerindo ajustes e registrando os resultados.



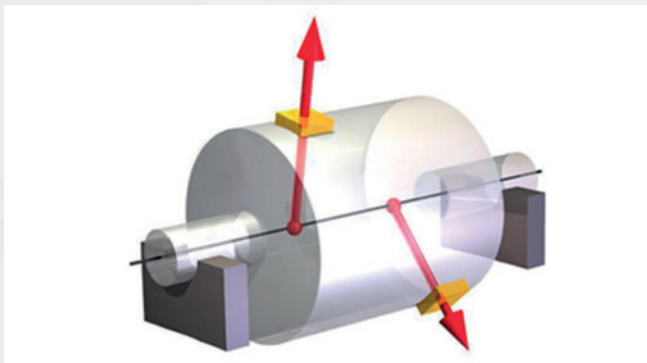
Calços e calibradores: pequenos blocos ou folhas de metal que são usados para ajustar a altura ou posição das máquinas durante o processo de alinhamento. Colocados sob as bases das máquinas ou equipamentos para garantir que sejam nivelados e corretamente posicionados.



4.8 Balanceamento

O balanceamento em máquinas elétricas rotativas é o processo de ajustar a distribuição de massa de um rotor para que ele gire em seu eixo sem causar vibrações indesejadas.

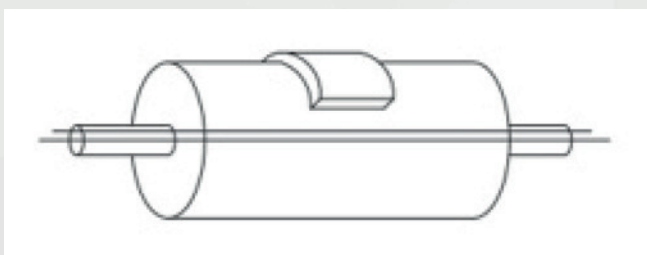
Quando um rotor está desbalanceado, significa que sua massa não está uniformemente distribuída em relação ao eixo de rotação. À medida que o rotor gira, a massa desigual gera uma distribuição desigual de forças centrífugas.



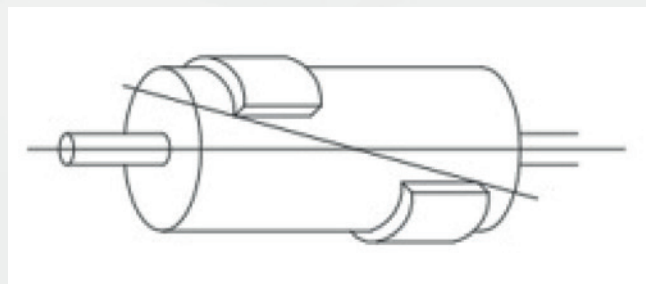
Essas forças centrífugas resultam da aceleração radial (direcionada para fora do centro) das massas do rotor. Isso faz com que o rotor exerça vibração e movimento oscilatório ao redor do eixo, levando a desgastes, ruídos e possíveis falhas mecânicas. Em um rotor perfeitamente balanceado, estas forças se cancelam mutuamente ao longo do eixo de rotação.

O processo de balanceamento pode ser complexo e envolve várias etapas e equipamentos específicos. Ele é geralmente realizado em um ou mais planos, dependendo da configuração e do comprimento do rotor.

Balanceamento de plano único: adequado para rotores mais curtos onde o desbalanceamento pode ser corrigido em um único plano, sendo comum em rotores com comprimentos significativamente menores do que seu diâmetro.



Balanceamento de múltiplos planos: necessário para rotores mais longos, onde desbalanceamentos em diferentes seções do rotor podem interagir de maneira complexa. Isso envolve a correção em dois ou mais planos ao longo do eixo do rotor.



É utilizado um equipamento especializado que mede as vibrações e a força centrífuga enquanto o rotor gira, sendo escolhidos com base no tipo e tamanho do rotor. São compostos por sensores e transdutores que fornecem dados precisos sobre a quantidade e a localização do desbalanceamento.

Software de análise é utilizado para interpretar os dados coletados pelos sensores, sugerindo correções precisas em termos de quantidade e localização do peso a ser adicionado ou removido.

A execução se resume em:

- **Realizar a medição inicial:** os sensores registram as vibrações ou forças geradas pelo desbalanceamento com o a máquina em operação.
- **Análise dos dados:** os dados são analisados para determinar a localização e a magnitude do desbalanceamento em cada plano necessário.
- **Adição ou remoção de massa:** peso é adicionado ou removido conforme necessário. Isso pode envolver a adição de pesos de balanceamento, remoção de material por usinagem, ou a utilização de grampos e parafusos para ajustar a massa.
- **Teste de verificação:** após a correção, o rotor é testado novamente para verificar se as vibrações foram reduzidas a níveis aceitáveis.
- **Ajustes finais:** se necessário, são feitos ajustes adicionais para assegurar o equilíbrio ideal do rotor.

4.9 Plano de manutenção

A importância de um plano de manutenção reside na capacidade de garantir a confiabilidade operacional, maximizar a eficiência e prolongar a vida útil do equipamento. Um plano de manuten-

ção bem estruturado é fundamental para prevenir falhas inesperadas, que podem resultar em paradas custosas e impactar negativamente a produção.

Para o planejamento e programação da manutenção é essencial desenvolver um cronograma que leve em conta não apenas as horas de operação, mas também os ciclos de carga e as condições ambientais. A alocação adequada de recursos, incluindo uma equipe técnica qualificada e a disponibilidade de ferramentas e peças de reposição, é crucial. O plano deve ser revisado e atualizado periodicamente, com base no feedback operacional e nos avanços tecnológicos, para assegurar que as práticas de manutenção estejam sempre alinhadas com as necessidades atuais do equipamento.

A documentação e os registros são componentes vitais de qualquer plano de manutenção. Manter registros detalhados de todas as inspeções, intervenções e substituições de peças não só ajuda a manter o controle sobre o estado de saúde das máquinas, mas também facilita análises de tendência e a identificação precoce de potenciais problemas. Relatórios bem elaborados são fundamentais para garantir a conformidade com as normas de segurança e as regulamentações ambientais, além de servirem como uma ferramenta indispensável para a gestão e auditoria da manutenção.

A análise de falhas e a melhoria contínua são processos que devem ser integrados ao ciclo de vida da manutenção. A investigação detalhada das causas de falhas é essencial para prevenir recorrências. Medidas corretivas devem ser implementadas com base nessas análises, e sugestões de melhoria devem ser continuamente buscadas e aplicadas, visando a otimização contínua das práticas de manutenção e do desempenho do equipamento.

Por fim, a gestão da manutenção pode ser significativamente aprimorada com a implementação de sistemas como o CMMS (Computerized Maintenance Management System). Esses sistemas não apenas automatizam as atividades de manutenção, mas também proporcionam um melhor controle e visibilidade de todo o processo de manutenção. O uso de tecnologia na gestão de manutenção permite uma programação mais precisa, monitoramento em tempo real das atividades de manutenção e, crucialmente, a capacidade de tomar decisões baseadas em dados confiáveis.

4.10 Armazenamento, transporte e estoque

4.10.1 Cuidados com armazenamento

Durante o armazenamento, as máquinas elétricas estão sujeitas a uma variedade de estresses ambientais, como variações atmosféricas, exposição a contaminantes e flutuações térmicas, que podem comprometer componentes vitais. A formação de condensação dentro das partes internas da máquina, por exemplo, pode resultar em corrosão em mancais e uma redução significativa na resistência de isolamento dos enrolamentos.

Para mitigar esses riscos, o local de armazenagem deve ser cuidadosamente escolhido e preparado. Idealmente, as máquinas devem ser armazenadas internamente em um ambiente controlado, protegido contra umidade, variações de temperatura e contaminantes. O ambiente deve estar equipado com um sistema de ventilação eficaz, controle de umidade abaixo de 50%, além de sistemas de detecção de incêndio e iluminação adequada. É crucial que o local também disponha de eletricidade para permitir a operação de resistências de aquecimento que ajudam a manter a máquina sem a presença de umidade, preservando a resistência de isolamento.

Em casos em que o armazenamento externo é inevitável, medidas adicionais devem ser tomadas para proteger o equipamento. A máquina deve ser acondicionada em embalagens resistentes e coberta com materiais impermeáveis para protegê-la de elementos externos, como poeira, umidade e variações climáticas extremas. A embalagem deve ser posicionada de forma elevada para evitar o contato direto com a umidade do solo.

Quanto às peças separadas, como caixas de ligação e trocadores de calor, estas devem ser embaladas com o mesmo rigor.

A resistência de isolamento dos enrolamentos deve ser checada e documentada a cada três meses para monitorar qualquer deterioração. Se houver queda nos valores, investigações devem ser conduzidas imediatamente para determinar a causa e corrigir o problema.

Superfícies usinadas, como pontas de eixo e flanges, requerem atenção especial. Elas devem

ser protegidas com agentes inibidores de corrosão e essa proteção deve ser renovada a cada seis meses ou sempre que a cobertura anterior estiver comprometida.

Para os mancais, independentemente do tipo de lubrificação (graxa ou óleo), é fundamental que o eixo seja girado manualmente a cada dois meses para garantir que os mancais permaneçam em boas condições. Após períodos de armazenagem mais longos, como seis meses, uma lubrificação completa é recomendada antes da máquina entrar em operação.

As escovas, se presentes, devem ser levantadas dos porta-escovas durante o armazenamento para evitar o contato com os anéis coletores e prevenir oxidação.

A inspeção das caixas de ligação é essencial para assegurar que estas estejam secas, limpas e livres de corrosão. A integridade das vedações e a correta selagem das entradas de cabos são críticas para evitar a entrada de umidade e contaminantes.

4.10.2 Cuidados com transporte

Durante o processo de transporte, é essencial garantir que as máquinas elétricas e seus componentes estejam devidamente protegidas e seguras. A embalagem deve ser robusta e adequada ao tipo de transporte, protegendo os equipamentos contra impactos, vibrações e pressões externas. A utilização de materiais amortecedores e de preenchimento é crucial para minimizar o movimento e absorver impactos dentro da embalagem.

Além disso, a máquina deve ser selada contra umidade e contaminantes, com uma cobertura adicional como lona ou plástico impermeável, especialmente em rotas que envolvem exposição a condições climáticas adversas. Escolher transportadores confiáveis e com experiência no manejo de cargas delicadas é fundamental, assim como planejar a logística para evitar rotas com riscos de atrasos ou danos.

Ao chegar ao destino, uma inspeção imediata deve ser realizada para verificar a integridade do equipamento e identificar possíveis danos ocorridos durante o transporte, garantindo assim a pronta intervenção e manutenção se necessário.

4.10.3 Peças sobressalentes

A manutenção de um inventário apropriado de peças sobressalentes constitui uma prática essencial para assegurar a continuidade operacional e a eficácia na gestão de manutenção em ambientes industriais que dependem intensamente de maquinário. Esta estratégia não apenas minimiza o tempo de inatividade resultante de falhas mecânicas ou desgastes inesperados, mas também se mostra economicamente vantajosa ao otimizar os custos associados às operações de manutenção a longo prazo.

Peças sobressalentes são cruciais tanto para intervenções preventivas quanto corretivas, possibilitando que reparos necessários sejam efetuados imediatamente, sem dependência de prazos de entrega que podem comprometer o fluxo de produção. Esta disponibilidade é particularmente crítica em linhas de produção de alto rendimento, onde períodos de inatividade podem resultar em prejuízos financeiros substanciais.

Adicionalmente, a presença de peças sobressalentes facilita a execução de manutenções programadas durante interrupções operacionais planejadas, reduzindo assim o impacto sobre as atividades regulares e assegurando que as máquinas mantenham performance otimizada. Este cuidado prolonga a vida útil do equipamento e mantém sua eficiência energética e operacional em níveis ideais.

Do ponto de vista econômico, embora a aquisição de peças sobressalentes represente um investimento inicial significativo, essa despesa se justifica ao considerar a diminuição dos custos relacionados a reparos emergenciais. Tais reparos frequentemente acarretam gastos elevados devido à urgência na aquisição de componentes e à mobilização de recursos técnicos especializados.

Em termos de gerenciamento de riscos, o estoque de peças sobressalentes é um mecanismo eficaz para mitigar os desafios associados à obsolescência de equipamentos, particularmente aqueles de modelos mais antigos ou fora de linha. Com um planejamento estratégico adequado, é possível sustentar a operacionalidade de maquinário vital, evitando substituições onerosas.

A implementação de uma política robusta de gestão de peças sobressalentes é indispensável para qualquer operação industrial dependente

de equipamentos mecânicos. Tal prática não apenas proporciona uma capacidade de resposta ágil diante de contratempos técnicos, mas também reforça a habilidade de uma organização em manter suas operações fluindo de maneira contínua e eficaz, contribuindo decisivamente para sua sustentabilidade e competitividade no mercado.

5



ENSAIOS ELÉTRICOS

5 ENSAIOS ELÉTRICOS

Os ensaios elétricos constituem um componente indispensável na manutenção e otimização operacional de máquinas elétricas rotativas, tais como geradores e motores de diversos portes. Estes procedimentos de teste são fundamentais para assegurar a operação eficiente e segura, mediante a análise meticulosa de componentes vitais como enrolamentos de estatores e rotores. A execução desses ensaios possibilita a identificação precoce de deteriorações, falhas em materiais isolantes e outras anomalias potenciais que poderiam comprometer a funcionalidade da máquina.

A implementação sistemática de ensaios elétricos permite aos técnicos acumular um conjunto de dados valioso, facilitando a avaliação da conformidade das máquinas com as normas técnicas estabelecidas e antecipando necessidades de manutenção antes que ocorram falhas significativas. Tal prática não apenas prolonga a vida útil dos equipamentos, mas também eleva seu rendimento, assegurando uma operação mais confiável e eficaz.

A gama de ensaios elétricos disponíveis para aplicação em máquinas rotativas abrange desde testes básicos até procedimentos altamente especializados. Cada um destes ensaios é concebido para identificar e diagnosticar tipos específicos de defeitos ou falhas que podem surgir nos componentes das máquinas. Esta diversidade de testes garante que cada aspecto da máquina seja rigorosamente examinado para manter sua operacionalidade e segurança inabaláveis.

Os ensaios elétricos são intrinsecamente vinculados às normas regulamentadoras, que asseguram a segurança, eficiência e durabilidade desses equipamentos. Estabelecidas por organizações internacionais, como a IEC e a IEEE, e por órgãos nacionais, essas normas oferecem diretrizes precisas para os procedimentos de teste, critérios de desempenho e limites aceitáveis.

A observância das normas é vital para garantir a segurança de operadores e equipamentos, minimizando os riscos durante os ensaios. Elas promovem consistência metodológica nos testes, viabilizando comparações precisas entre diferentes equipamentos e fabricantes, e asseguram que os ensaios elétricos detectem falhas que possam com-

prometer a confiabilidade das máquinas, exigindo rigorosas documentações dos procedimentos de ensaios, resultados e análises, essenciais para auditorias, manutenção preventiva e rastreabilidade em caso de falha.

Nas seções subseqüentes desta apostila, será realizada uma exploração detalhada dos variados tipos de ensaios elétricos. Serão abordadas as metodologias empregadas, os defeitos específicos que cada ensaio é capaz de detectar, e as práticas recomendadas para sua execução. Esta análise detalhada nos permitirá compreender como esses ensaios são realizados, e ainda discernir como eles contribuem para a melhoria contínua da performance e segurança dos ativos.

5.1 Tipos de ensaios

Os ensaios elétricos podem ser classificados de várias formas, de acordo com seu objetivo e complexidade, aplicados a cada modelo de máquina.

Alguns envolvem procedimentos básicos realizados periodicamente para avaliar o estado geral das máquinas, como resistência ôhmica, resistência de isolamento e Surge Test, também chamados de **ensaios de rotina**.

Existem os ensaios mais detalhados que focam em identificar falhas específicas, como descargas parciais, tangente delta, PDCA, entre diversos outros, também chamados de **ensaios especializados**.

Ainda temos ensaios de comissionamento, aplicados durante a partida ou após a instalação de novas máquinas para verificar a integridade dos sistemas de proteção e controle, também chamados de **ensaios elétricos específicos**.

Em meio aos tipos de ensaios elétricos existentes, é importante conhecer alguns conceitos em que estão inseridas.

Importante compreender a diferença entre ensaios **offline** que ocorre enquanto a máquina está parada, permitindo testes mais intrusivos e os ensaios **online** que ocorrem enquanto a máquina

está em operação, proporcionando análises em tempo real.

Também temos os ensaios destrutivos, não destrutivos, tensão aplicada, ensaios em corrente contínua e ensaios em corrente alternada. Cada um possui seu propósito e está relacionado a algum critério de aplicação. Vamos resumir suas definições a seguir.

Ensaio destrutivo são aqueles que causam danos permanentes ao equipamento testado, geralmente para avaliar seus limites de desempenho. Em motores e geradores elétricos, eles podem incluir testes de sobretensão extrema e sobrecorrente, onde o equipamento é sujeito a condições operacionais além do que normalmente experimentaria para verificar sua capacidade de suportar falhas. Normalmente, esses ensaios são realizados apenas em protótipos ou amostras de teste, e não em equipamentos em serviço.

Ensaio não destrutivo são projetados para avaliar a condição de um equipamento sem causar danos. Esses testes incluem medições de resistência ôhmica, resistência de isolamento, surto teste, descargas parciais e outros.

Os **ensaios de tensão aplicada** envolvem a aplicação de uma tensão ao equipamento para avaliar sua resistência de condução e isolamento. Um exemplo é o teste de sobretensão, onde uma tensão maior do que a nominal é aplicada para verificar a capacidade do isolamento de resistir a picos de tensão. Esse tipo de ensaio é frequentemente usado para garantir que o equipamento possa suportar condições transitórias encontradas em serviço.

Nos **ensaios de corrente contínua (CC)**, uma corrente contínua é aplicada ao equipamento para verificar sua resistência e comportamento elétrico. Um exemplo comum é o teste de resistência de isolamento, onde uma tensão CC é usada para medir a resistência do isolamento dos enrolamentos. Ensaio de corrente contínua também são utilizados para testar diodos e outros componentes que requerem polarização específica.

Ensaio de corrente alternada (CA) utilizam corrente alternada para testar o comportamento elétrico sob condições de serviço normais. Um exemplo é o teste de impedância, que mede a impedância de um enrolamento sob uma determinada frequência. Testes de perda dielétrica tam-

bém são realizados com corrente alternada para avaliar a qualidade do isolamento em condições operacionais reais.

Essa categorização geral nos permite entender o panorama dos tipos de ensaios elétricos disponíveis para máquinas rotativas. Nos próximos tópicos, abordaremos detalhadamente alguns desses ensaios, descrevendo seu conceito e aplicação.

5.2 Verificação dos acessórios

Os testes nos acessórios têm como objetivo verificar seu funcionamento e registrar as medições obtidas. Cada acessório presente em uma máquina elétrica possui características e funções específicas, portanto, os ensaios elétricos aplicáveis variam para cada um.

No caso dos sensores de temperatura, como o PT100, estes são termorresistores que apresentam uma variação previsível de resistência ôhmica conforme a temperatura, permitindo a conversão da resistência em temperatura.

A verificação consiste em medir a resistência ôhmica, assegurando que o circuito esteja fechado e que não haja danos ou rupturas nos cabos.



Os cabos do sensor geralmente incluem três fios: dois comuns e um principal. Portanto, a coleta de valores concentra-se na comparação entre um fio comum e o principal, para garantir o funcionamento adequado.



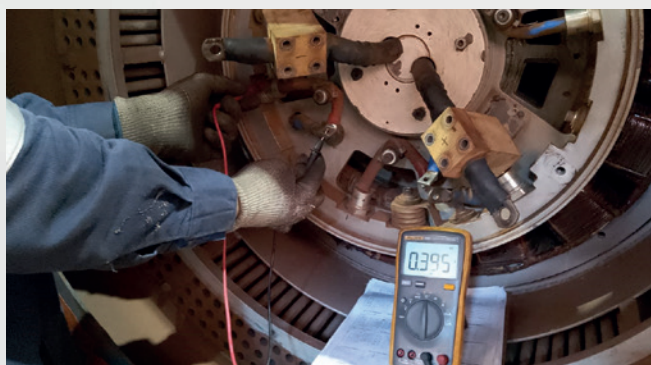
Já as resistências de aquecimento atuam como resistores. Nesse caso, devem ser medidas as grandezas principais: tensão, corrente e resistência. Também é possível verificar a resistência de isolamento, aplicando a tensão nominal de alimentação do resistor para avaliar a condição do isolamento do circuito.

Dada a faixa de valores de resistência encontrados nesses acessórios, é possível realizar esses testes utilizando um multímetro e um alicate amperímetro.

5.2.1 Testes e verificação em diodos

Em geradores elétricos, um dos sistemas de excitação adotados é o Brushless, conforme abordado em tópicos anteriores. Os diodos são componentes essenciais nesse sistema, atuando de acordo com princípios de condução e polaridade.

Durante o teste elétrico, é utilizado um multímetro na função de condução para medir individualmente cada diodo e verificar se os valores atendem às especificações do fabricante. Além disso, o teste de polaridade é conduzido para assegurar que o diodo catodo (negativo) esteja conduzindo no sentido inverso ao anodo (positivo), uma vez que, em alguns modelos, a inversão de polaridade depende apenas da posição de montagem.



5.3 Resistência ôhmica

A resistência ôhmica de um enrolamento está diretamente relacionada à sua construção física, considerando o tamanho, espessura, comprimento e material condutor. O valor da resistência do enrolamento está entre os fundamentos básicos da eletricidade, correlacionando-se com a tensão e a corrente para determinar a potência elétrica. Os enrolamentos são projetados na fábrica para alcançar valores finais equilibrados entre si, como no caso dos três enrolamentos de uma máquina trifásica. Por isso, o teste é conhecido como "equilíbrio de fases". Vale ressaltar que a resistên-

cia também varia com a temperatura, mas quando o objetivo do ensaio é avaliar o balanço entre as fases, a compensação de temperatura não é necessária, dispensando a correção para 20°C mencionada nas normas.

Com base nisso, a norma IEEE 115 estabelece que a diferença de resistência entre enrolamentos semelhantes deve ser inferior a 5%.

% Desbalanço de fase	Ação Recomendada
< 1% desbalanço	Máquinas novas: ideal, tendência
1-2,5% desbalanço	Máquinas usadas: tendência
2,5-5% desbalanço	Investigar quando possível, tendência atenta
> 5% desbalanço	Investigar imediatamente, não ignorar

Ela também define métodos padronizados para medir a resistência ôhmica, assegurando medições precisas e consistentes, fornecendo diretrizes sobre a compensação para diferenças de temperatura e especificando limites aceitáveis para verificar se os enrolamentos estão dentro das especificações de projeto.

A medição da resistência ôhmica é eficiente para detectar falhas nas conexões série e paralelo dos enrolamentos. Resultados anormais podem indicar pontos quentes durante a operação, que devem ser evitados. A IEEE 115 destaca que variações na resistência ôhmica também podem indicar enrolamentos queimados, conexões soltas, curtos-circuitos entre espiras, interrupções nos enrolamentos, deterioração do condutor ou degradação do isolamento. Um aumento na resistência implica maiores perdas térmicas, reduzindo a eficiência operacional.

A norma recomenda medições regulares da resistência ôhmica para identificar variações ao longo do tempo, permitindo detectar problemas precocemente e implementar intervenções preventivas antes de falhas críticas.

Materiais condutores têm baixa resistência, normalmente expressa em ôhms, mili-ôhms ou micro-ôhms, associada à ideia de que quanto menor a resistência, melhor a condução — como no caso do ouro, que é considerado o melhor condutor.

Para medir a resistência ôhmica de um condutor, é normalmente utilizado um microhmímetro devido aos baixos níveis de resistência. Este equipamento aplica uma corrente constante elevada através do condutor e mede a tensão resultante. A resistência é calculada a partir da tensão medida e

da corrente aplicada (Lei de Ohm). Quanto maior a corrente, maior a precisão da medição.

Estator	RCC (mΩ)
Fases U	10,33
Fases V	10,33
Fases W	10,38
Desbalanço Máximo	0,4832

O princípio de funcionamento do microhmímetro baseia-se na Ponte Kelvin, que elimina os erros causados pela resistência dos fios de medição, usando quatro pontos de contato: dois para aplicar a corrente e dois para medir a tensão. Isso permite medir apenas a resistência do condutor, excluindo qualquer influência da resistência dos fios.



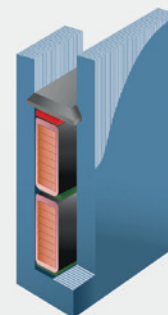
A seleção correta do equipamento depende do valor esperado da resistência. Antes da medição, os terminais do condutor devem ser limpos para garantir um contato adequado e os cabos devem ser conectados corretamente, com atenção especial para a posição dos fios de corrente e de tensão ao usar a técnica de quatro fios, como a Ponte Kelvin.

Após a medição, o valor da resistência pode ser lido diretamente no instrumento, sendo importante corrigir a temperatura de referência, se necessário. Para obter resultados precisos, os contatos devem ser firmes, o instrumento calibrado e capaz de medir a resistência esperada, e os cabos e terminais devem ser devidamente isolados para evitar erros de medição causados por correntes de fuga.

5.4 Resistência de isolamento

A resistência de isolamento é um indicador essencial para avaliar a condição elétrica de motores e geradores.

Para ilustrar esse conceito, considere uma máquina elétrica onde os enrolamentos de cobre estão embutidos nas ranhuras do estator. Entre cada enrolamento e o corpo metálico do estator (núcleo), há uma camada de material isolante, como verniz ou resina epóxi. Este material não apenas separa fisicamente o cobre do metal, mas também oferece propriedades elétricas que resistem ao fluxo de corrente. Essa característica garante que a energia elétrica seja transmitida eficientemente ao longo do enrolamento, evitando riscos de curto-circuito ou perda de energia através do núcleo.



Materiais isolantes são caracterizados por uma resistência alta, medida em kilo, mega, giga ou tera ôhms.

Teraohms	TΩ	10 ¹²
Gigaohms	GΩ	10 ⁹
Megaohms	MΩ	10 ⁶
Kilohms	KΩ	10 ³
Ohms	Ω	---
Miliohms	mΩ	10 ⁻³
Microhms	μΩ	10 ⁻⁶
Nanohms	nΩ	10 ⁻⁹
Picohms	pΩ	10 ⁻¹²

Em teoria, a resistência de isolamento de um material isolante deveria ser infinitamente alta, já que sua função é bloquear qualquer fluxo de corrente elétrica direto entre o condutor e o núcleo metálico, mantendo a corrente restrita aos caminhos desejados dentro dos enrolamentos.

Na prática, a resistência de isolamento pode ser influenciada por fatores como o envelhecimento do material, exposição a calor excessivo, umidade ou contaminação química, que podem degradar as propriedades isolantes e, consequentemente, diminuir o valor da resistência de isolamento. Um valor anormalmente baixo de resistência de isolamento indica que o isolamento pode

estar comprometido, o que sugere a possibilidade de falhas iminentes ou redução da eficiência operacional da máquina.

O equipamento utilizado para medir a resistência de isolamento é o megômetro, que aplica uma tensão contínua aos enrolamentos para medir a corrente de fuga em relação ao ponto de aterramento (núcleo ou carcaça).



A resistência é calculada com base na corrente medida, fornecendo um indicador da integridade do isolamento. Este processo assegura que o isolamento entre os enrolamentos e o núcleo metálico esteja em condições adequadas para evitar falhas elétricas.

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

O megômetro é equipado com três cabos essenciais para a medição: um positivo, um negativo e um cabo guard. O cabo positivo, geralmente de cor vermelha, é conectado ao enrolamento sob teste. O cabo negativo, de cor preta, é ligado ao ponto de aterramento da carcaça da máquina. O uso do cabo guard é crucial, pois ele é responsável por eliminar correntes de fuga superficiais que poderiam afetar a precisão da medição, isolando a influência de fatores externos que poderiam alterar os resultados.

Antes de iniciar o teste, o equipamento é meticulosamente configurado para a tensão específica que será aplicada, conforme as diretrizes da norma IEEE 43:2013, que leva em consideração a tensão nominal do equipamento em teste. O período durante o qual a tensão é aplicada é também cuidadosamente definido para permitir a correta avaliação dos índices de absorção e polarização, os quais fornecem informações valiosas sobre a condição atual do isolamento. É importante notar que a metodologia exata do teste varia dependendo do modelo do megômetro utilizado e das características específicas da máquina elétrica em avaliação, incluindo a configuração dos seus componentes e seu modo de operação.



As medições coletadas devem ser ajustadas para a temperatura padrão de 40°C, conforme recomendado pela norma IEEE 43-2013. Este ajuste é necessário para normalizar os resultados, dado que a resistência de isolamento é sensível a variações de temperatura.

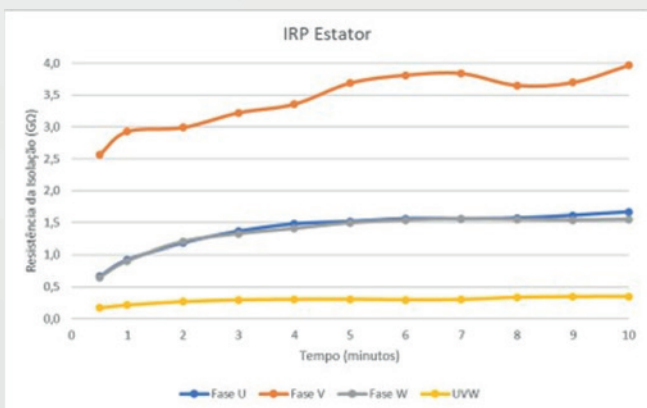
A correção para uma temperatura de referência garante que as medições sejam consistentes e comparáveis, independentemente das flutuações térmicas durante os testes.

Ao finalizar o teste de resistência de isolamento, é crucial proceder com o descarregamento seguro da energia acumulada. Muitos equipamentos modernos de teste incluem um mecanismo automático de descarga, simplificando o processo ao permitir que o próprio equipamento dissipe a carga elétrica residual. Nesses casos, basta aguardar o tempo especificado pelo fabricante do equipamento de teste para o descarregamento completo. Independentemente do método, é essencial usar equipamento de proteção individual e manter

uma distância segura dos componentes durante o processo para evitar acidentes por descargas elétricas.

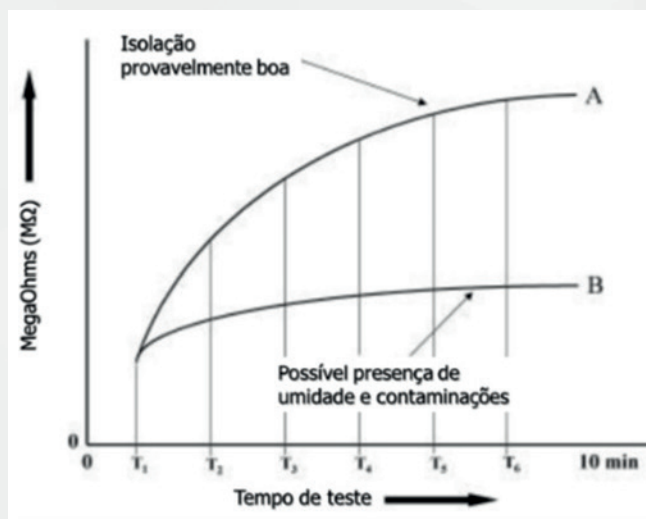
Resistência da Isolação	Estator (GΩ) U x VWM	Estator (GΩ) V x UWM	Estator (GΩ) W x UVM	Estator (GΩ) UVW x M
Tensão de teste (V)	5000	5000	5000	5000
R30s	0,662	2,559	0,647	0,171
R1min	0,922	2,926	0,904	0,215
R2min	1,181	2,989	1,199	0,267
R3min	1,360	3,222	1,324	0,294
R4min	1,477	3,356	1,405	0,302
R5min	1,512	3,687	1,494	0,304
R6min	1,557	3,812	1,539	0,296
R7min	1,557	3,839	1,557	0,300
R8min	1,566	3,651	1,548	0,334
R9min	1,611	3,696	1,539	0,342
R10min	1,665	3,964	1,548	0,345
IP	1,806	1,355	1,713	1,608
IA	1,392	1,143	1,397	1,257

De acordo com o Anexo D da norma IEEE 43, é possível elaborar um gráfico denominado Perfil da Resistência de Isolação (IRP), que representa a resistência de isolamento em função do tempo.



Este gráfico é uma ferramenta valiosa para análise detalhada da condição do sistema de isolamento, pois permite visualizar a evolução da resistência ao longo do tempo durante a aplicação de tensão contínua.

O IRP é particularmente útil para identificar tendências na resistência de isolamento que podem indicar a presença de fatores de degradação, como umidade, contaminação ou envelhecimento do material isolante. Por exemplo, em condições normais, espera-se que a resistência de isolamento inicialmente aumente ou permaneça estável; uma queda contínua pode sugerir problemas.



Esse perfil também é crucial quando as resistências de isolamento são excepcionalmente altas, excedendo 5000 MΩ, ou preocupantemente baixas, pois ambos os extremos podem indicar condições anormais que requerem investigação adicional.

Além disso, o IRP pode ajudar a verificar a eficácia das medidas de manutenção e limpeza, mostrando melhorias ou deteriorações na qualidade do isolamento ao longo do tempo. Avaliações regulares usando o IRP permitem um acompanhamento contínuo da saúde do isolamento, facilitando a identificação precoce de potenciais falhas antes que elas resultem em danos significativos ao equipamento.

5.4.1 Índice de polarização

A norma IEEE 43-2013 estabelece padrões rigorosos para a medição da resistência de isolamento, incluindo métodos de medição e limites aceitáveis para diferentes classes de isolamento. Um dos principais testes descritos é o Índice de Polarização (IP), que é a razão entre a resistência medida após 10 minutos de aplicação de tensão (R10) e após 1 minuto (R1). O IP é uma medida da capacidade da isolação de absorver a corrente de polarização, sendo que um baixo valor de IP pode indicar problemas como contaminação ou umidade nos enrolamentos.

Índice de Polarização *			
Entre	0	1	Perigoso
Entre	1	1,5	Pobre
Entre	1,5	2	Questionável
Entre	2	3	Confiável
Entre	3	4	Bom
Maior que	4		Excelente **

Isolações em boas condições apresentam um IP elevado, enquanto isolações deterioradas têm valores baixos. O IP é influenciado por fatores como contaminação, umidade, temperatura e tensão de teste. Segundo a IEEE 43-2013, os valores mínimos aceitáveis de IP são: 1,5 para a Classe A e 2,0 para as Classes B, F e H. Valores acima de 4 podem indicar isolação excelente, mas valores muito altos, superiores a 7, podem sugerir que o isolamento está quebradiço ou rachado. Um aumento súbito no IP superior a 20% sem manutenção pode indicar a necessidade de intervenção.

5.4.2 Índice de absorção

O Índice de Absorção (IA) é uma variante do IP, também descrita na IEEE 43-2013. Ele é usado principalmente em sistemas de isolamento modernos, onde a corrente de absorção cai para quase zero em 2 a 3 minutos. O IA é calculado como a razão entre as resistências medidas em dois períodos, geralmente 1 minuto contra 30 segundos.

Índice de Absorção Dielétrica			
Entre	0	1	Perigoso
Entre	1	1,1	Pobre
Entre	1,1	1,25	Questionável
Entre	1,25	1,4	Confiável
Entre	1,4	1,6	Bom
Maior que	1,6		Excelente

O IA fornece informações sobre o grau de contaminação ou absorção de umidade no isolamento. Valores baixos de IA indicam que o isolamento pode estar contaminado por umidade, impurezas ou resíduos de óleo. No entanto, a norma ressalta que não existem critérios acordados para aprovação ou reprovação, como há para o IP. Um aumento súbito no IA superior a 20%, sem manutenção, deve ser visto como um sinal de alerta. Tal como o IP, o IA pode ser influenciado por contaminação, temperatura, umidade e tensão de teste.

5.5 Surge Test

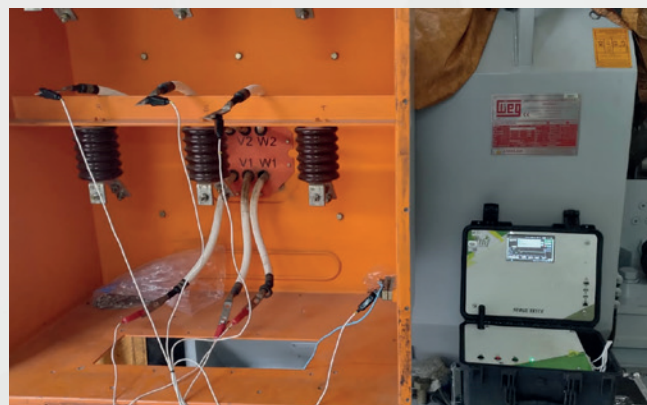
O teste de surto, ou "surge test", é uma técnica fundamental na avaliação de enrolamentos de máquinas elétricas rotativas. Esta análise é particularmente crucial para a integridade das espiras dentro das bobinas, uma vez que falhas de

isolamento podem levar a curtos-circuitos e danos significativos durante a operação.

Dentro de um motor ou gerador elétrico, os enrolamentos são compostos de espiras de fio condutor, geralmente cobre, enroladas em torno de um núcleo ou diretamente sobre si mesmas. Cada espira é isolada das outras por uma fina camada de verniz ou outro material isolante, dependendo do modelo e dimensões da máquina. Esse arranjo é propenso a diversos efeitos eletromagnéticos, como a indução de correntes parasitas e a geração de campos magnéticos, que podem afetar a operação do equipamento. Qualquer falha no isolamento das espiras pode causar curtos-circuitos, que potencialmente degradam o equipamento ao longo do tempo.



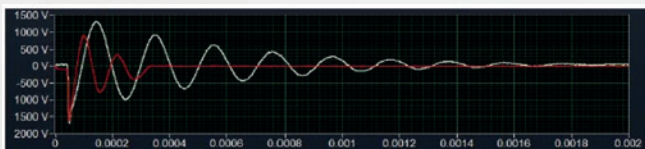
O Surge Test é realizado aplicando-se um breve surto de alta tensão sobre os enrolamentos. Esse surto gera um gradiente de tensão ao longo do bobinado, criando uma diferença de potencial entre espiras que estressa momentaneamente o isolamento.



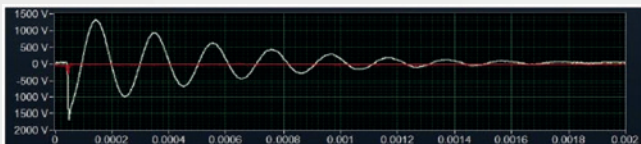
A aplicação dessa alta tensão serve para simular condições extremas que podem ocorrer devido a surtos elétricos externos, permitindo a identificação de pontos fracos na isolação que são invisíveis em condições normais de operação.

Esse teste é capaz de detectar várias falhas em um enrolamento, como:

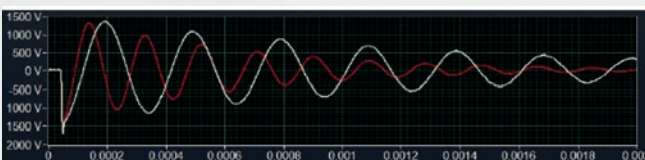
- **Curto-circuito entre espiras:** defeitos onde o isolamento entre espiras adjacentes falha, permitindo que a corrente flua entre elas, reduzindo a eficiência e aumentando o risco de falhas.



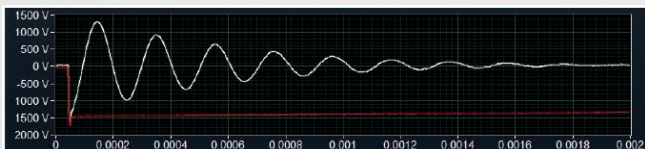
- **Falhas entre fase e carcaça:** quando o isolamento entre os enrolamentos e a carcaça do motor falha, potencialmente causando curtos para terra.



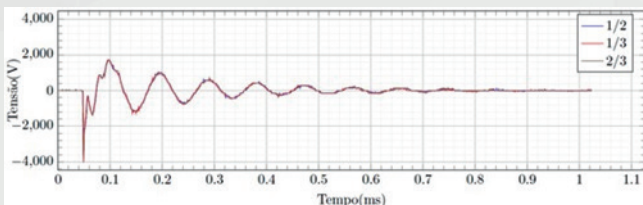
- **Diferenças de resistência elétrica entre fases:** Variações que podem indicar desgaste ou defeitos não uniformes nos enrolamentos.



- **Problemas no núcleo magnético e soldas internas:** defeitos estruturais que podem afetar o desempenho.



O equipamento utilizado para o teste aplica uma corrente com uma taxa de aumento elevada ao longo da bobina, e, pelo princípio da indução, uma tensão é gerada ao longo do enrolamento. Essa tensão responde ao surto em uma forma de onda senoidal amortecida, que pode ser capturada e analisada através de um osciloscópio.



A análise desta forma de onda permite identificar falhas baseadas em distorções características. Equipamentos modernos podem realizar esses testes de forma automática, comparando as respostas de diferentes bobinas ou fases e identificando desvios do padrão esperado.

Durante a realização do teste, é imperativo observar rigorosas medidas de segurança, dada a alta tensão envolvida. Operadores devem ser treinados e utilizar EPIs adequados, como sapatos de segurança com solado de borracha. É essencial que o equipamento seja alimentado apenas em tomadas aterradas para evitar riscos de choque elétrico, e todos os testes devem manter o operador afastado das partes energizadas.

5.6 Ensaio de tensão aplicada (HIPOT)

O ensaio elétrico de tensão aplicada, comumente conhecido como teste HiPot (High Potential Test), é realizado para assegurar que o isolamento de máquinas elétricas rotativas ofereça segurança suficiente, tanto para os operadores quanto para a aplicação em que estão instaladas. É um procedimento crítico que aumenta a confiança na operacionalidade e segurança dos sistemas elétricos, abordando diretamente a capacidade do isolamento de resistir a tensões significativamente mais altas do que as normais de operação.

Conforme estabelecido pela norma NBR 7094, o valor de tensão a ser aplicado em uma máquina nova é calculado pela fórmula $U_a = 2 \times U_n + 1000V$, onde U_n representa a tensão nominal. Para máquinas parcialmente rebobinadas, a norma permite uma adaptação na tensão aplicada, que pode ser ajustada para $U_a = (2 \times U_n + 1000V) \times 0,75$, refletindo uma redução para acomodar a condição menos íntegra do isolamento. Já para máquinas revisadas, sugere-se uma aplicação de $U_a = 2 \times U_n \times 1,5$, indicando um aumento na tensão para testar a durabilidade do isolamento após a revisão.

Este teste pode ser executado usando tanto corrente contínua (DC) quanto corrente alternada (AC), sendo que a escolha do método depende das especificações da máquina e do tipo de falha que se espera identificar. As diretrizes internacionais como IEEE 95 e ANSI/EASA AR100 oferecem fórmulas semelhantes para a aplicação de tensões de teste, geralmente recomendando valores de $2E + 1000V$ para testes DC, e 125%–150% da tensão RMS nominal para testes AC. Esses valores são ajustados para máquinas usadas, geralmente sendo reduzidos para 65%–75% do valor aplicado a novos equipamentos para evitar danos ao isolamento já possivelmente comprometido.

É crucial ressaltar que o teste HiPot é degradante e pode estressar o isolamento de maneira significativa, podendo até danificar o material isolante se realizado repetidamente ou com configurações inadequadas. Por isso, este teste é considerado destrutivo e deve ser executado com parcimônia, geralmente como parte de uma inspeção detalhada ou após reparos significativos. Os equipamentos utilizados para o teste HiPot devem ser manuseados por pessoal treinado e capacitado, observando-se todas as medidas de segurança, incluindo o uso de equipamento de proteção individual e o cumprimento rigoroso dos procedimentos operacionais padrão.

A duração do teste é um aspecto crítico. A norma IEEE 95 recomenda que a tensão seja aplicada por um período suficiente para assegurar que qualquer fraqueza no isolamento seja detectada. O tempo de teste típico varia, mas geralmente é de um minuto. No entanto, para aplicações específicas, o tempo pode ser ajustado conforme necessário para garantir uma avaliação precisa da integridade do isolamento.

Durante o procedimento, os terminais do equipamento de teste HiPot são conectados aos enrolamentos do motor ou gerador, e a tensão de teste é aplicada de maneira controlada.



Qualquer aumento súbito na corrente indica uma falha no isolamento, e o teste deve ser interrompido imediatamente para evitar danos adicionais ao equipamento.

5.7 Loop-Test

O Loop-Test, ou teste de circuito fechado, é uma técnica utilizada para avaliar a integridade do núcleo magnético do estator de máquinas elétricas rotativas, antes de realizar seu rebobinamento. Este teste visa identificar a presença de pontos quentes no núcleo de chapas e determinar as perdas específicas (W/Kg) no pacote de chapas.

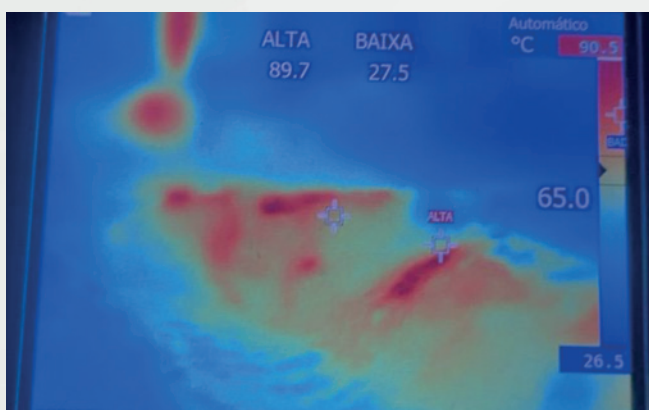
A principal finalidade do Loop-Test é garantir que o núcleo magnético do estator não apresente falhas que possam comprometer a operação da máquina elétrica após o rebobinamento. Um ponto quente ocorre quando o isolamento elétrico entre as lâminas do estator é danificado, resultando em correntes parasitas elevadas que geram superaquecimento localizado. Se um motor com pontos quentes for rebobinado e colocado em operação por exemplo, ele apresentará aquecimento anormal da carcaça e dos enrolamentos, levando a possíveis falhas mecânicas e elétricas sem um aumento significativo na corrente elétrica, o que pode não acionar a proteção térmica.

Os pontos quentes no núcleo de chapas resultam de danos no isolamento devido a curto-circuito dentro da ranhura, arraste do rotor, ou sobrecargas violentas que carbonizam o material isolante. Esses danos provocam superaquecimento localizado que não é detectado por relés térmicos, pois a corrente não aumenta de forma significativa. Portanto, a identificação e correção de pontos quentes são críticas para evitar falhas futuras.

O Loop-Test envolve a criação de um campo magnético no núcleo de chapas do estator pela aplicação de tensão em um solenóide. O solenóide é cuidadosamente calculado e montado, e a tensão (U) é aplicada aos seus terminais.



A temperatura é monitorada em vários pontos do núcleo durante aproximadamente 30 minutos. Se a temperatura em qualquer ponto exceder em pelo menos 10°C a dos outros pontos, este ponto é considerado um ponto quente, indicando a necessidade de substituição ou reembaralhamento do núcleo magnético.



O reembaralhamento consiste em desmontar e remontar o pacote de chapas, redistribuindo as chapas problemáticas.

Conforme normas internacionais, como a IEEE 62.2-2004, IEC 60034-1 e as diretrizes ANSI/EASA AR100, o Loop-Test é uma prática recomendada para assegurar a integridade do núcleo magnético antes do rebobinamento. O teste deve ser realizado com o núcleo dentro da carcaça e o estator limpo, sem o bobinado queimado. Essas normas fornecem diretrizes específicas para a realização de testes, garantindo que os métodos aplicados sejam consistentes e precisos.

Durante o Loop-Test, é fundamental observar rigorosas práticas de segurança devido à aplicação de altas tensões. O pessoal deve ser devidamente treinado e utilizar Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), incluindo sapatos de segurança com solado de borracha. O equipamento deve ser conectado a tomadas aterradas para evitar choques elétricos, e todas as conexões devem ser verificadas cuidadosamente antes do teste.

5.8 Ensaios Elétricos Especializados – Diagnose (DIELEC)

Além dos ensaios elétricos convencionais discutidos anteriormente, há um conjunto de ensaios elétricos especializados (DIELEC) que oferecem uma análise abrangente e precisa sobre a condição e a vida útil de máquinas elétricas rotativas. Esses testes avançados, quando avaliados em conjunto, proporcionam uma visão detalhada do desempenho e da integridade dos componentes elétricos.

O DIELEC é uma das ferramentas mais avançadas e eficazes disponíveis no mercado atual. Este pacote inclui testes especializados que, combinados, fornecem uma avaliação profunda e precisa das condições operacionais e dos possíveis pontos de falha dos ativos.

Esse conjunto também incorpora testes básicos, como o de isolamento, resistência ôhmica e Surge Test, já abordados anteriormente. Estes testes são fundamentais para uma análise inicial, mas os ensaios especializados (DIELEC) permitem uma investigação mais detalhada e específica, identificando problemas que os testes básicos não podem detectar.

Ao aprofundarmos no DIELEC, destacaremos como cada um dos testes contribui para uma avaliação completa. Este conjunto abrangente de ensaios é crucial para a manutenção preventiva, permitindo intervenções antecipadas que evitam falhas catastróficas e prolongam a vida útil dos equipamentos.

5.8.1 Ensaio de Polarização e Despolarização (PDCA)

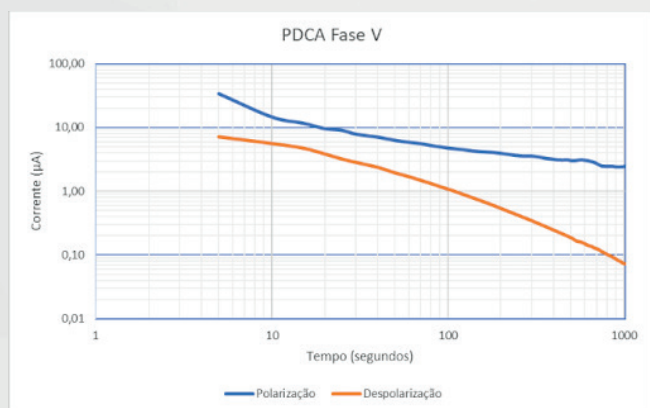
A Análise da Corrente de Polarização-Despolarização (PDCA) é um método especializado para avaliar a integridade do isolamento em enrolamentos de máquinas elétricas. Este teste envolve a aplicação de uma tensão contínua (CC) por até 1000 segundos, durante a qual a corrente resultante é medida. Posteriormente, o enrolamento é aterrado através de um circuito de descarga, e a corrente de despolarização é registrada. Este procedimento é útil para identificar problemas de contaminação e delaminação da isolação principal.

A corrente de polarização é composta por correntes de absorção, que ocorrem devido a fenômenos de polarização, como degradação dielétrica por oxidação, calor ou contaminantes. Também inclui correntes de condução, que são principalmente atribuídas à umidade, e correntes de fuga de superfície, causadas por contaminantes condutores. Já a corrente de despolarização consiste exclusivamente em correntes de absorção, que tendem a aumentar com a deterioração do dielétrico ao longo dos anos de serviço.

Os resultados das medições de PDCA são apresentados em gráficos "log-log" no domínio do tempo, mostrando tanto as correntes de polarização quanto de despolarização. Uma diferença anormalmente alta entre essas correntes pode indicar problemas internos na isolação, como falhas na cura das resinas, deterioração térmica, danos mecânicos ou umidade na isolação.

Os cuidados ao realizar o teste PDCA incluem garantir que a temperatura dos enrolamentos esteja estabilizada para obter medições precisas. O procedimento deve ser realizado conforme descrito na norma IEEE 43 Anexo C, que fornece diretrizes detalhadas para a execução do teste.

Abaixo, apresentamos um gráfico exemplificando os resultados obtidos durante o teste de PDCA em uma das fases de um gerador elétrico de alta tensão (Fase V).



A conclusão dos resultados deve ser determinada exclusivamente por um especialista.

5.8.2 Step Voltage

O teste de tensão em passos, também conhecido como Step Voltage, é uma variante im-

portante dos testes de resistência de isolação, projetado para avaliar a robustez do isolamento em diferentes níveis de tensão. Neste procedimento, várias tensões são aplicadas sequencialmente ao isolamento, cada uma por um período fixo, geralmente de 60 segundos. A resistência de isolação é medida e registrada para cada tensão aplicada, permitindo uma análise detalhada da resposta do isolamento sob condições de estresse elétrico variado.

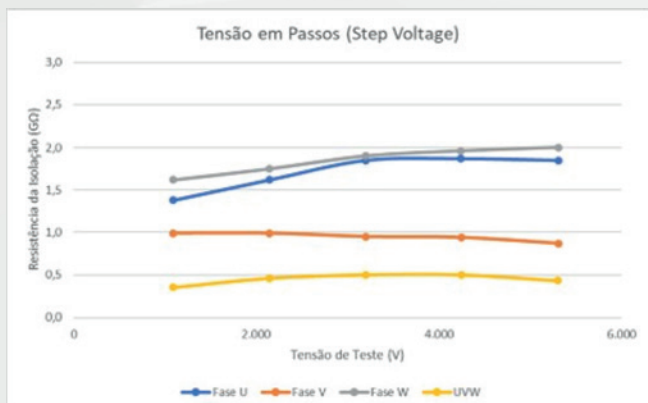
Ao aplicar tensões crescentes em passos definidos, o isolamento é submetido a uma série de estresses elétricos que podem indicar a presença de falhas ocultas. Essas falhas podem incluir perfurações, danos físicos ou deterioração material que não seriam evidentes sob condições normais de operação. O objetivo desse teste é identificar pontos fracos no isolamento antes que falhas completas ocorram.

Um indicador chave de potenciais problemas é observado quando a resistência de isolamento medida a uma tensão mais alta é significativamente menor do que a esperada com base nas medidas de tensões mais baixas. Por exemplo, se a resistência de isolamento em 5 kV é menor que 60% da resistência em 1 kV, ajustada por uma margem de 15%, isso sugere que o isolamento pode estar comprometido e deve ser inspecionado mais detalhadamente.

Em megômetros modernos, a funcionalidade de Step Voltage está integrada, permitindo uma execução automatizada e eficiente deste teste. Para realizar o teste, basta definir a tensão de teste desejada. O megômetro automaticamente aplica as tensões em incrementos controlados, mantendo cada nível de tensão pelo tempo programado, geralmente 60 segundos, como parte do protocolo de teste. Após a conclusão da sequência, o equipamento apresenta os resultados de resistência de isolamento para cada etapa de tensão em um formato claramente legível.

Tensão Volts	Tensão em Passos			
	U	V	W	UWV
1092	1,38	0,99	1,62	0,35
2146	1,62	0,99	1,75	0,46
3199	1,85	0,95	1,90	0,50
4241	1,87	0,94	1,96	0,50
5309	1,85	0,87	2,00	0,43

Gráficos de tensão em passos são frequentemente utilizados para visualizar a relação entre a tensão aplicada e a resistência medida, facilitando a interpretação dos resultados.

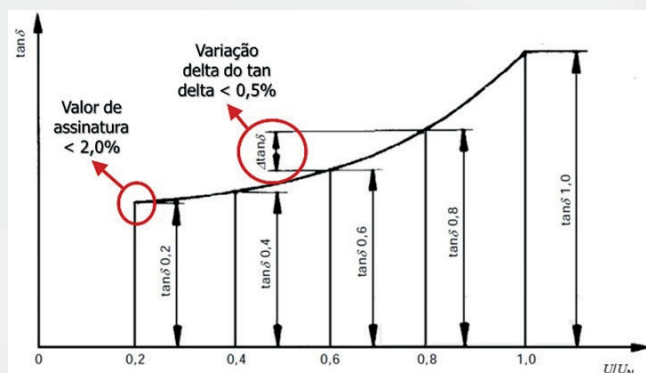


Esses gráficos ajudam a determinar se a condição do isolamento é satisfatória ou se há indicativos de degradação que requerem atenção imediata. A análise gráfica permite uma avaliação rápida e eficaz da integridade do isolamento.

5.8.3 Ensaio de Fator de Dissipação (Tangente Delta) e Tip-Up

A análise do Fator de Dissipação (FD) ou Tangente Delta é uma técnica essencial para medir as perdas no sistema de isolação de máquinas elétricas rotativas. Um sistema isolante ideal seria isento de perdas, caracterizando-se por não permitir a circulação de uma corrente resistiva (IR) em fase com a tensão aplicada. Contudo, na prática, a isolação se comporta como um arranjo resistivo-capacitivo. A relação entre as componentes resistiva e capacitiva da corrente que atravessa a isolação, expressa matematicamente como a tangente do ângulo δ , é conhecida como o fator de dissipação. A principal função do FD é identificar a integridade do isolamento e prever possíveis falhas.

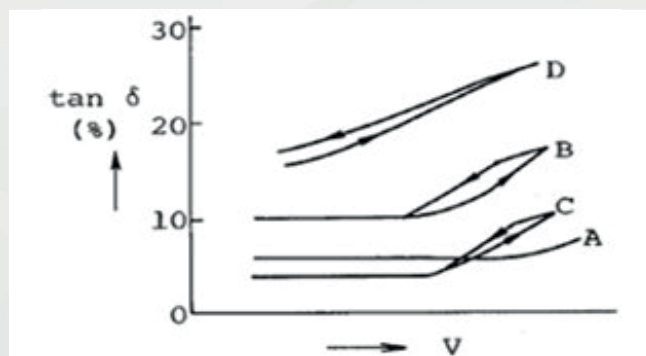
O tip-up é a diferença da medição coletada entre as tensões de teste de $0,6xU_{f-f}$ e $0,2xU_{f-f}$. No ensaio de tangente delta, o tip-up é uma forma indireta de determinar a presença de descargas parciais internas nos enrolamentos, indicando processos de falha. É sensível ao conteúdo de vazios na isolação, danos por descargas parciais, continuidade da superfície semicondutora, qualidade da impregnação e delaminações devido a estresses térmicos.



Um aumento consistente no FD e no tip-up é indicativo de atividades de descargas parciais nos enrolamentos. Isso requer uma inspeção visual detalhada da máquina e outros testes diagnósticos, como a medição de descargas parciais (PDA) que veremos mais adiante. A presença de luvas anticorona pode influenciar significativamente as medições, "mascarando" os valores obtidos.

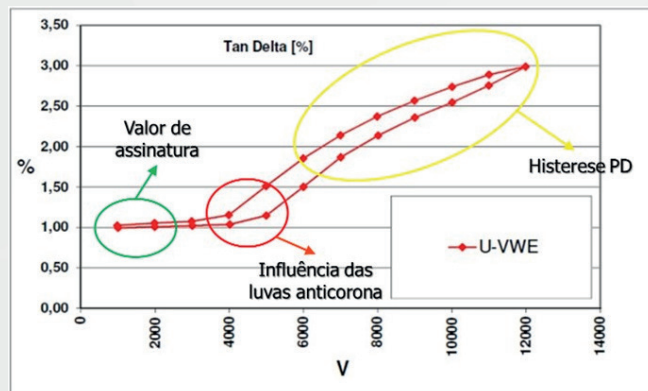
De acordo com a norma IEC 60034-27-3, as medições devem ser realizadas com a frequência da rede em diferentes passos de tensão, variando de $0,2xU_{f-f}$ a $0,6xU_{f-f}$, onde U_{f-f} é a tensão fase-fase, ou de $0,2xU_{f-n}$ a $1,0xU_{f-n}$, onde U_{f-n} é a tensão fase-neutro. Para barras ou bobinas isoladas novas, utilizando terminais de GUARD conectados nas luvas anticorona, a norma fornece valores máximos de FD até a tensão nominal de 21 kV. As normas IEEE 286 e IEC 60034-27-3 não especificam limites para valores em máquinas montadas, mas esses valores são amplamente utilizados em medições de manutenção para essas máquinas.

Os perfis normalmente aceitos são dados abaixo:



- Que, em condições normais, indicam:
- A: isolação em boas condições;
- B: isolação com vazios internos;
- C: isolação em processo de deterioração térmica;
- D: isolação envelhecida com absorção de umidade.

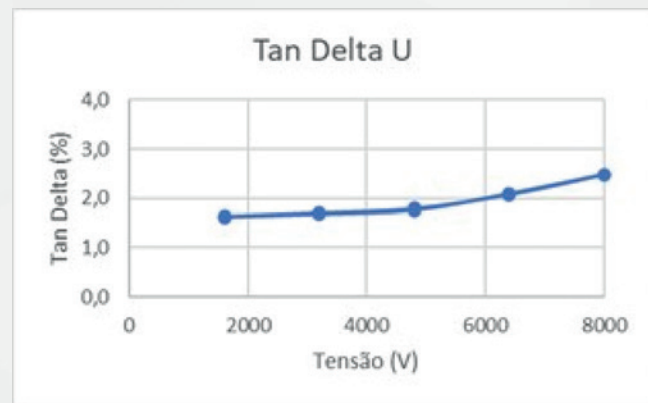
As medições de FD e tip-up fornecem informações cruciais sobre o estado do isolamento, especialmente em relação à qualidade de cura e à presença de contaminantes. Um valor de assinatura em $0,2xU_f-n$ pode indicar o estado de cura da isolação e a qualidade do contato da superfície semicondutora com o núcleo, sem ser afetado por descargas parciais. A variação de tangente delta na tensão de início das descargas parciais (PD) deve ser linear. Variações não lineares indicam a influência das luvas anticorona.



A magnitude da variação de tangente delta a cada passo de $0,2xU_f-n$ pode indicar a presença de vazios e delaminações dentro da isolação, bem como problemas de impregnação, contaminação e umidade. Um aumento acentuado no FD abaixo da tensão fase-terra sugere delaminação severa entre o condutor e a isolação ou entre camadas de isolação.

Para garantir a precisão das medições, é essencial realizar o teste em condições estáveis de temperatura. Os resultados devem ser comparáveis entre os enrolamentos de cada fase e entre máquinas semelhantes.

Tensão (%)	Tensão (V)	Fase U Tan δ (%)	Fase V Tan δ (%)	Fase W Tan δ (%)
20	1600	1,63	1,73	1,66
40	3200	1,70	1,80	1,73
60	4800	1,79	1,90	1,82
80	6400	2,07	2,20	2,09
100	8000	2,48	2,63	2,48
80	6400	2,09	2,20	2,10
60	4800	1,76	1,85	1,78
40	3200	1,68	1,77	1,71
20	1600	1,62	1,73	1,66
Limite Tan δ 20% < 2,0%		1,63	1,73	1,66
Limite Max Δ Tan δ < 0,5%		0,41	0,43	0,39
Limite Tip-up < 0,5%		0,85	0,90	0,82



Valores de FD, tip-up e capacitância são úteis para detectar defeitos globais nos enrolamentos, como má qualidade de isolamento após rebobinamento, contaminação ou delaminação global.

5.8.4 Ensaio de Capacitância e Tip-Up

A capacitância é uma medida da capacidade de um sistema de isolamento de armazenar carga elétrica. Alterações na capacitância ao longo do tempo podem indicar a presença de problemas como deterioração térmica ou absorção de umidade no isolamento. Uma diminuição da capacitância ao longo do tempo sugere deterioração térmica dos enrolamentos, enquanto um aumento pode indicar que o isolamento está absorvendo umidade do ambiente. A análise contínua da capacitância permite inferir a presença de contaminação ou degradação térmica, mas uma única medição não possui valor diagnóstico significativo.

O Tip-Up é a diferença da medição coletada entre as tensões de teste de $0,6xU_f-f$ e $0,2xU_f-f$. Na medição de capacitância, quanto maior o Tip-Up, maior é o conteúdo de vazios na isolação. Para isolações modernas de epóxi-mica, um Tip-Up menor que 1% é esperado, enquanto enrolamentos mais antigos de mica asfáltica devem apresentar Tip-Up inferior a 3% ou 4%. Valores superiores indicam deterioração térmica, ciclos de carga ou possíveis problemas de fabricação.

O Tip-Up e a capacitância são especialmente úteis na detecção de defeitos globais nos enrolamentos, como má qualidade de isolamento após rebobinamento, contaminação ou delaminação global. A medição dessas propriedades é realizada utilizando equipamentos que aplicam tensões em passos específicos, conforme a norma

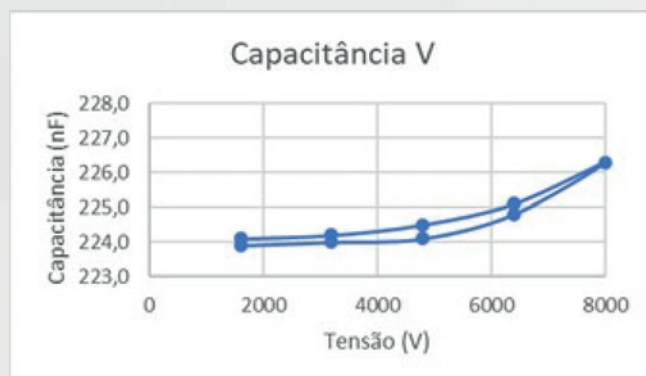
IEC 60034-27-3. Esta norma especifica que os valores devem ser medidos em diferentes passos de tensão de $0,2xU_{f-f}$ a $0,6xU_{f-f}$, onde U_{f-f} é a tensão fase-fase, ou de $0,2xU_{f-n}$ a $1,0xU_{f-n}$, onde U_{f-n} é a tensão fase-neutro.

Existem limitações na interpretação dessas medições. O Tip-Up mede o conteúdo total de vazios, mas não diferencia entre muitos pequenos vazios e poucos grandes vazios. Além disso, as luvas anticorona podem influenciar as medições de capacitância. A melhor abordagem para superar essas limitações é monitorar a tendência do Tip-Up ao longo dos anos. Um aumento constante no Tip-Up pode indicar delaminação progressiva devido ao estresse térmico ou ciclos de carga.

Para garantir a precisão das medições, é importante realizar os testes sob condições controladas e compará-los periodicamente entre os enrolamentos de cada fase e entre máquinas semelhantes.

Exemplo de resultados e gráficos obtidos:

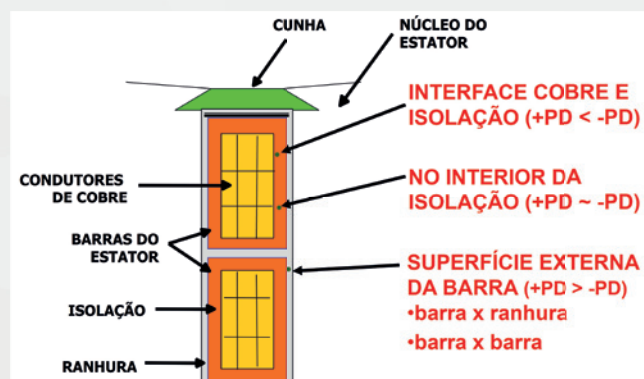
Tensão (%)	Tensão (V)	Fase U C (nF)	Fase V C (nF)	Fase W C (nF)
20	1600	225,80	224,10	225,80
40	3200	225,90	224,20	225,90
60	4800	226,10	224,50	226,10
80	6400	226,70	225,10	226,70
100	8000	227,80	226,30	227,80
80	6400	226,50	224,80	226,50
60	4800	225,90	224,10	225,90
40	3200	225,70	224,00	225,70
20	1600	225,60	223,90	225,70
Limite Tip-up < 1%		2,00	2,20	2,00



5.8.5 Análise avançada de Descargas Parciais

5.8.5.1 Definição

O sistema de isolamento de máquinas rotativas de alta tensão está sujeito a processos de degradação, incluindo deterioração, erros de fabricação, manutenção inadequada e operação. Esses fatores podem resultar em falhas dielétricas (curto-circuito) e paradas dispendiosas, além de perda de produção. Para evitar essas falhas, é crucial monitorar a condição da isolamento ao longo da vida útil da máquina. A análise de Descargas Parciais (PD), conforme definido pela IEC 60270, é um indicador confiável da degradação da isolamento em equipamentos de alta tensão.



De acordo com a definição da IEC 60270, PD é uma descarga elétrica localizada que apenas parcialmente rompe a isolamento entre os condutores e que pode ou não ocorrer adjacente a um condutor. Essas descargas são denominadas "parciais" porque ainda não resultam em uma ruptura completa, como um curto-circuito total. Elas ocorrem porque a rigidez dielétrica do ar (3 kV/mm) é significativamente menor que a da mica (aproximadamente 300 kV/mm), que compõe a isolamento dos enrolamentos.

As descargas parciais geram pequenos pulsos de tensão de alta frequência que viajam pelos enrolamentos e podem ser medidos e analisados por sistemas de monitoramento de PD. Além da característica dielétrica, as PD resultam de danos causados por forças térmicas, mecânicas, eletromagnéticas, químicas ou ambientais. O desenvolvimento progressivo das PD é um sintoma claro da deterioração da isolamento. Quando se iniciam, as PD também contribuem para a degradação do

sistema dielétrico da máquina pela erosão do material isolante.

A falha total da isolação não pode ser prevista com precisão devido a diversos fatores contribuintes. Portanto, o monitoramento de PD permite aos usuários acompanharem a degradação da isolação ao longo do tempo, fornecendo informações cruciais para a tomada de decisões. Detectar um mecanismo de falha em andamento e avaliar a gravidade e urgência do problema são aspectos fundamentais. Nas grandes máquinas rotativas, onde a isolação de mica é comum devido à sua alta resistência a descargas, a degradação é geralmente lenta. Este processo de deterioração relativamente lento, aliado ao fato de que 56% das falhas em hidrogeradores são atribuídas ao estator, por exemplo, justifica a importância da análise de PD.

O monitoramento de PD permite distinguir entre diferentes processos de falha e analisar a tendência das atividades de PD ao longo do tempo, proporcionando avisos antecipados de problemas em desenvolvimento.

5.8.5.2 Sensibilidade aos sinais PD

Para medição de descargas parciais (PD), o acoplador capacitivo é considerado o "sensor" mais adequado. Isso se deve à sua capacidade de bloquear sinais de 60 Hz e permitir a passagem de sinais de alta frequência relacionados à PD, atuando, assim, como um filtro passa-faixa. Esta característica pode ser evidenciada ao comparar a impedância do acoplador capacitivo em diferentes frequências.

Para frequências de 60 Hz, a impedância é significativamente alta, o que resulta em bloqueio de tensão alta:

- Acoplador de 80 pF: $X_c(60\text{Hz}) = \sim 33 \text{ M}\Omega$.
- Acoplador de 2 nF: $X_c(60\text{Hz}) = \sim 1,32 \text{ M}\Omega$.

Já para sinais de alta frequência, a impedância é bastante reduzida, permitindo a passagem dos sinais de PD através do acoplador:

- Acoplador de 80 pF: $X_c(83 \text{ MHz, tempo de rampa de } 3\text{ns}) = \sim 24 \Omega$.
- Acoplador de 2 nF: $X_c(5 \text{ MHz}) = \sim 15 \Omega$.

De acordo com a norma IEC-60034-27-2 – On-line PD Measurements, Parágrafo 6.4.2, que trata do projeto de sensores para medições de PD, há uma distinção importante em termos de sensibilidade dos sensores:

"...Sensor de PD projetado para operar na faixa de baixa frequência geralmente oferece boa sensibilidade não apenas para PD nas barras ou bobinas próximas ao sensor, mas também para aquelas originadas em partes mais internas do enrolamento. Por outro lado, sensor de PD que opera na faixa de frequência muito alta oferece boa sensibilidade apenas para PDs próximas ao sensor."

Portanto, a escolha da faixa de frequência, que é diretamente relacionada à capacitância do acoplador, é um dos fatores mais críticos na definição da cobertura do enrolamento e no nível de atenuação dos sinais de PD.

5.8.5.3 Separação dos ruídos

Pulsos de Descargas Parciais (PD) são caracterizados por um rápido tempo de rampa e uma duração extremamente curta em comparação com a forma de onda senoidal de 60 Hz. Ruídos e interferências, que possuem características semelhantes aos pulsos de PD, representam um desafio significativo. A posição do pulso em relação à tensão CA, o espectro de frequência e a taxa de repetição são os principais atributos que permitem distinguir os pulsos de PD dos ruídos.

Os ruídos provêm de várias fontes, como corona de linhas de transmissão, faiscamento de conexões elétricas, centelhamento de anéis coletores, excitatrizes estáticas, seccionadoras e transformadores. Essencialmente, ruídos são sinais similares aos pulsos de PD, mas registrados em momentos inadequados ou originados de fontes externas à máquina. Se os ruídos não forem devidamente separados, podem mascarar as leituras de PD do estator, causando falsas indicações. Portanto, a separação adequada dos ruídos é crucial para que o teste seja objetivo e forneça resultados precisos.

5.8.5.4 Instrumento de medição

O instrumento portátil OMS 605 da OMI-CRON, por exemplo, designado como "Sistema Digital" pela norma IEC 60034-27-2, é um dos mais

avançados equipamentos para a medição de descargas parciais (PD) em geradores e motores. Este equipamento possui três canais que permitem a aquisição simultânea e síncrona das atividades de PD nas três fases da máquina, cada um equipado com um filtro digital passa-faixa. Isso possibilita a visualização das influências entre fases e a realização de comparações precisas e objetivas.

Em contraste, instrumentos conhecidos como "Sistemas Manuais" utilizam pares de acopladores capacitivos em configurações de montagem direcional ou diferencial, medindo interferências e descargas diretas entre fases apenas se estas forem repetitivas e estáveis. Devido à leitura sequencial entre pares de acopladores nesses sistemas, pode haver uma diferença de tempo significativa entre duas medições do mesmo teste em diferentes fases, tornando as comparações subjetivas e menos confiáveis.

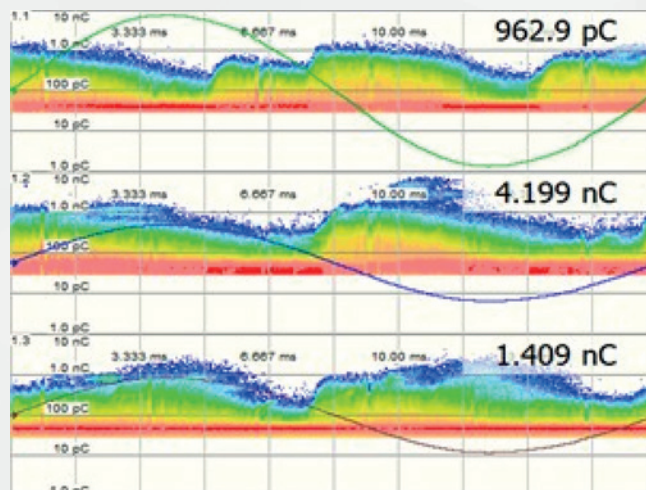
Para a detecção de eventos de descargas parciais, a saída do acoplador capacitivo é conectada à entrada do instrumento OMS 605 através de um cabo triaxial de blindagem dupla, minimizando interferências externas.

Os itens de segurança do acoplador estão integrados no próprio dispositivo, eliminando a necessidade de uma caixa terminal externa. Isso assegura que, em caso de ruptura do cabo triaxial, o potencial elevado (tensão fase-terra) não é transmitido para fora da área de teste. Com aterramento individual em cada acoplador, o risco de alto potencial é limitado a 90 V.

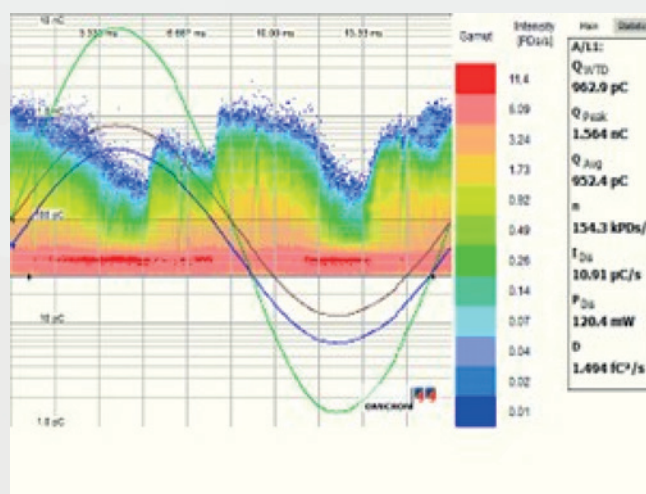
O instrumento OMS 605 possui uma capacidade excelente para minimizar ou eliminar ruídos externos, assegurando alta sensibilidade nas medições. Isso é alcançado através da tecnologia digital avançada 3PARD (3 Phase Amplitude Relation Diagram), que distingue e separa diferentes fontes de PD atuando nos enrolamentos.

5.8.5.5 Técnicas de análise

A primeira informação obtida na análise de dados de Descargas Parciais (PD) é fornecida pelo gráfico PRPD (Phase Resolved Partial Discharge), que exhibe a distribuição, a magnitude e a posição dos pulsos em relação à onda senoidal de 60 Hz durante o intervalo de avaliação. Este gráfico é fundamental para entender o comportamento das descargas ao longo do ciclo de tensão.



Nos gráficos PRPD individuais, a guia lateral "Statistics" apresenta estatísticas adicionais de medição de PD calculadas durante o intervalo de avaliação, como:



- **QIEC:** valor da carga aparente conforme a IEC 60270. Se os ajustes não estiverem em conformidade, é denominado QWTD.

- **QPeak:** maior carga absoluta de qualquer evento PD observado.

- **QAvg:** valor médio de QIEC (ou QWTD).

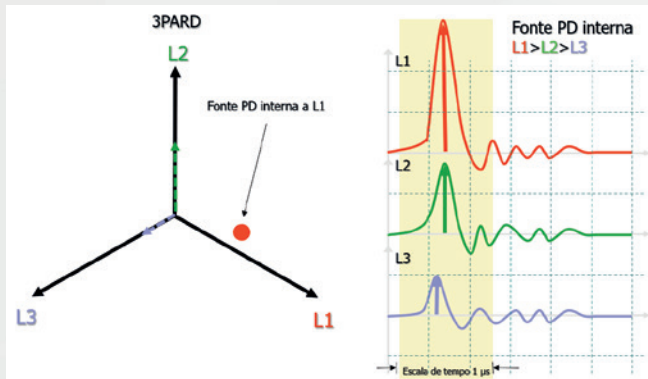
- **n:** taxa média de repetição de pulsos (kPDs/s indica milhares de pulsos PD por segundo).

- **IDis:** corrente média de descarga.

- **PDis:** potência média de descarga (corrente de descarga vezes a tensão CA instantânea).

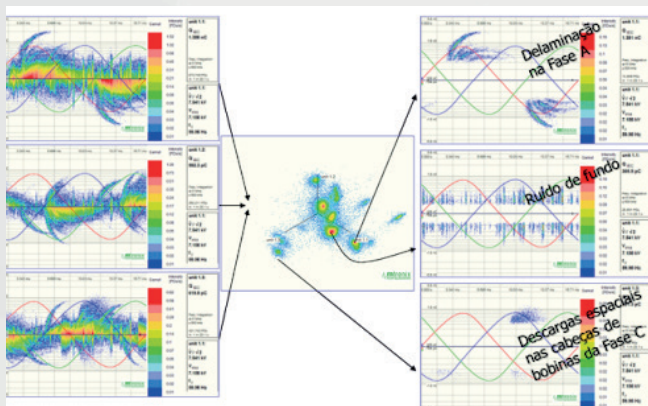
- **D:** soma dos quadrados das magnitudes das cargas aparentes individuais durante um intervalo de tempo de referência, dividido por este intervalo.

A técnica 3PARD (3 Phase Amplitude Relation Diagram) é utilizada para visualizar a relação entre as amplitudes de um único pulso de descarga parcial (PD) em uma fase e os sinais gerados por interferência no acoplamento das outras fases. Para ilustrar, considere um pulso PD e as amplitudes que apresenta na sua fase de origem (L1) e a interferência nas fases L2 e L3.



As ferramentas de análise transferem essas amplitudes para um diagrama estrela, facilitando a visualização da localização de cada pulso PD. Se a amplitude é maior próxima ao ramo L1 da estrela, é fácil identificar que sua origem está na Fase L1, embora possa refletir ou influenciar as Fases L2 e L3.

Como exemplo ilustrativo, podemos observar a figura abaixo, indicando que cada ponto de análise pode indicar os tipos de descargas coletadas:



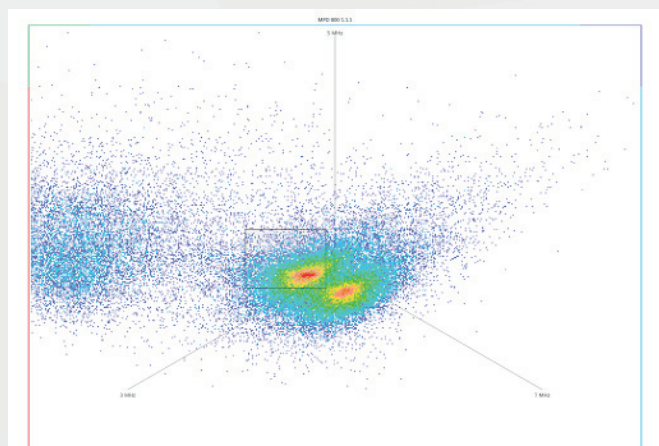
Esta técnica é crucial, pois fornece informações diretas sobre o tipo de atividades PD (fase-terra ou fase-fase). Devido à propagação complexa e às características de acoplamento dos pulsos PD, cada fonte de PD ou interferência externa (ruído) possui uma assinatura única na análise 3PARD, permitindo uma identificação precisa das origens das descargas parciais e das interferências.

Ao analisar um pulso e suas amplitudes nas três fases, transferindo essas amplitudes para o diagrama estrela, é possível identificar características importantes. Se as amplitudes forem muito similares nas três fases, sem predominância de uma sobre as outras, isso indica que o pulso é um ruído externo.

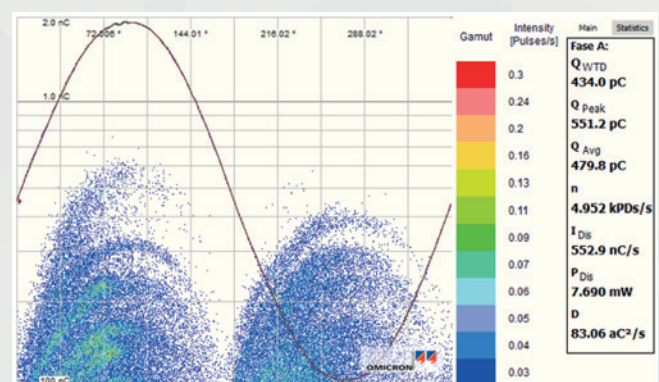
Em termos técnicos, isso significa que as interferências elétricas e/ou ruídos externos geralmente apresentam pulsos que se registram quase com a mesma amplitude em todas as fases da máquina, diferenciando-se das verdadeiras descargas parciais (PD) que teriam variações distintas entre as fases.

5.8.5.6 Clusters

Repetindo o procedimento para muitos pulsos de Descargas Parciais (PD), as fontes de PD dentro da máquina, assim como os ruídos externos, aparecem como concentrações claras e distintas de pontos nos diagramas 3PARD, conhecidos como clusters, conforme exemplificado abaixo.



Cada cluster pode ser individualmente selecionado, e através de ferramentas gráficas do software, seu perfil pode ser exibido em um gráfico PRPD (fase resolvida).



Isso facilita a análise dos dados de PD e a identificação do tipo de problema, garantindo que nenhuma outra fonte seja incluída no mesmo perfil, o que simplifica a análise final.

5.8.5.7 Valores limites para resultados PD segundo as normas internacionais

As principais normas que regem a análise de descargas parciais, tanto IEEE quanto IEC, estabelecem que não existem valores ou limites específicos para os resultados de PD em motores e geradores. A norma IEC 60034-27-2, no parágrafo 10.2 – Interpretação de PDIV (tensão de início), PDEV (tensão de extinção) e Q_m (valor da carga PD), esclarece que:

1. Nível PD Especificado: não é possível definir um nível aceitável de Q_m ou um nível de Q_m que indique um alto risco de falha.

2. Tendência: deve-se observar a tendência do Q_m no mesmo estator ao longo do tempo, utilizando o mesmo método de teste e equipamento com as mesmas características técnicas.

3. Comparação: a comparação de Q_m deve ser feita apenas entre estatores com o mesmo projeto, utilizando o mesmo método de teste e equipamento com as mesmas características técnicas.

4. Comparação entre Fases: deve-se comparar Q_m entre diferentes fases de um estator, utilizando o mesmo método de teste e equipamento com as mesmas características técnicas.

Nota Importante: o valor absoluto das atividades de descargas parciais (Q_m) não tem significado diagnóstico sem o conhecimento da natureza da falha que gerou esse valor. Isso é crucial quando uma máquina apresenta diferentes tipos de falhas, pois algumas são mais perigosas e podem ocorrer rapidamente, enquanto outras podem levar décadas para se desenvolver.

A literatura técnica mundial sublinha que a avaliação das Descargas Parciais (PD) não deve se basear unicamente em valores numéricos, como Q_m e NQN , devido ao limitado valor diagnóstico desses dados sem um entendimento claro do me-

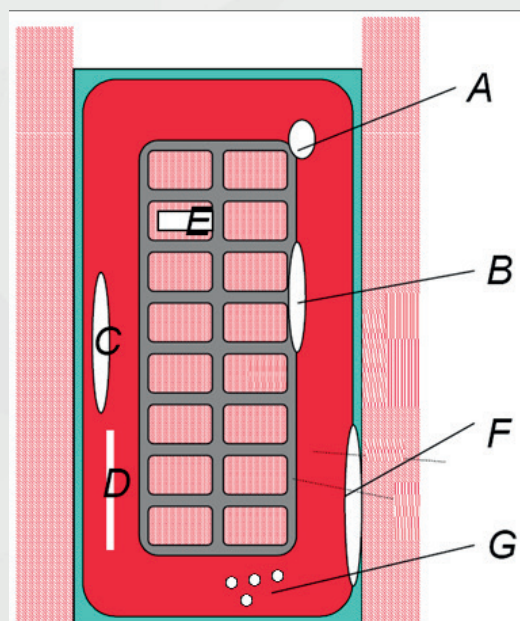
canismo de deterioração que os originou. Avaliar o valor Q_m sem saber sua origem exata, se da região das ranhuras ou das cabeças de bobinas, pode levar a conclusões errôneas. Portanto, as estatísticas baseadas exclusivamente em dados numéricos são insuficientes.

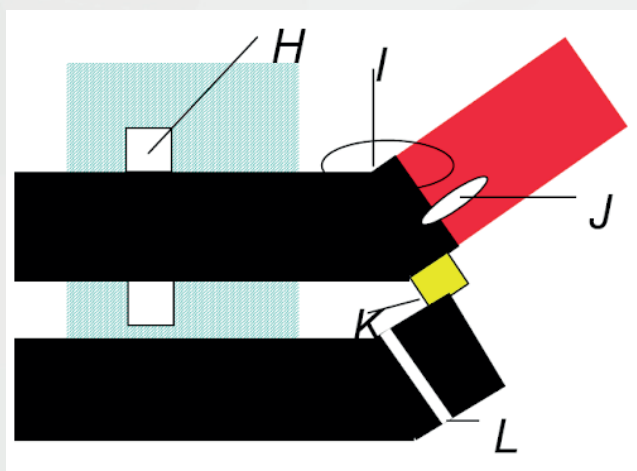
Também afirma que “não existe uma explicação física completa dos processos de ruptura e pré-ruptura do isolamento ou da propagação dos sinais de PD dentro de uma barra”. Por isso, não são propostos números absolutos para os critérios de aceitação na literatura técnica. A avaliação deve focar nas mudanças de tendência das variáveis para a mesma unidade geradora ao longo do tempo, ao invés de comparar valores absolutos com outras unidades.

Assim, os valores globais obtidos não devem ser considerados como referências individuais para conclusões isoladas na análise de PD. Em vez disso, é necessário utilizar um banco de dados completo para reconhecer padrões gráficos e melhorar a confiabilidade das interpretações, conforme recomendado pelas normas internacionais.

5.8.5.8 Localização das atividades PD

A análise de descargas parciais (PDA) é essencial para identificar o tipo, a região de ocorrência e a severidade das descargas parciais, além de suas causas, como falhas no sistema de cunhagem. Descargas parciais podem ocorrer em diversos pontos do enrolamento estatorico, conforme ilustrado nas figuras a seguir.

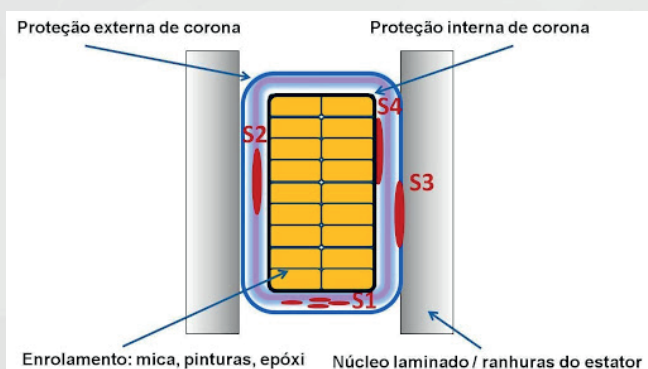




Onde:

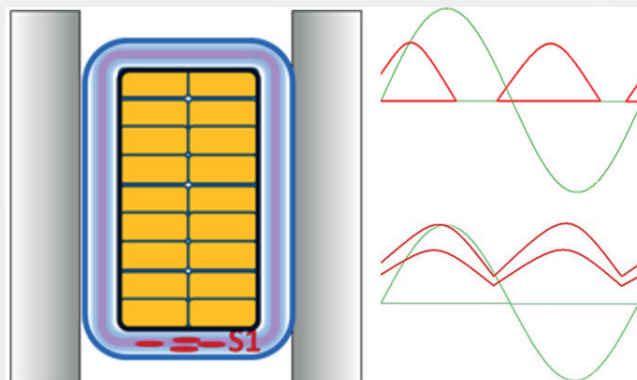
- A:** Microcavidades nas bordas;
- B:** Delaminação junto ao cobre;
- C:** Delaminação no interior da isolamento;
- D:** Arborescência nas camadas;
- E:** Condutor rompido;
- F:** Descarga na ranhura;
- G:** Microbolhas no interior da isolamento;
- H:** Descargas nos dutos de ventilação;
- I:** Delaminação na cabeça de bobina;
- J:** Descarga de superfície por contaminação;
- K:** Espaçamento inadequado;
- L:** Falhas na luva anticorona;

Diversos tipos de falhas podem ser confundidos, como as falhas C, D e G no interior da isolamento, ou as falhas I e L nas cabeças de bobinas. O mais importante é determinar, conforme a norma IEC 60034-27-2, e utilizando as ferramentas PRPD e 3PARD, os locais precisos das descargas no enrolamento estatorico. As referências visuais e técnicas fornecidas abaixo devem ser utilizadas para essa finalidade.



5.8.5.9 Microbolhas

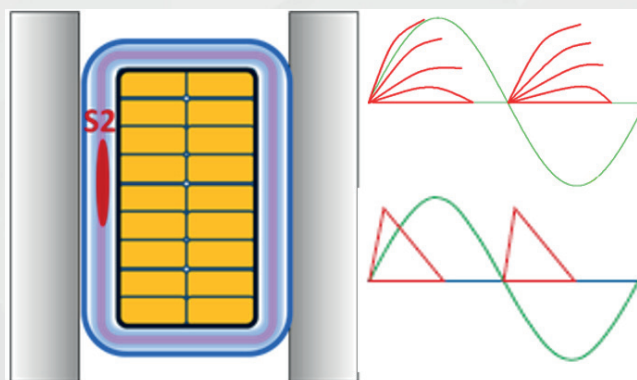
Microbolhas (S1) são uma das falhas mais comuns e iniciais na isolamento de máquinas elétricas.



Essas descargas parciais (PD) ocorrem dentro de bolhas ou vazios preenchidos com ar ou gás, disseminados na isolamento principal. Geralmente, essas microbolhas se originam durante o processo de fabricação e não indicam necessariamente fatores de deterioração. A presença de microbolhas é uma condição que pode ser detectada e monitorada, mas não representa, por si só, um sinal de degradação progressiva do sistema de isolamento.

5.8.5.10 Delaminação no interior da isolamento

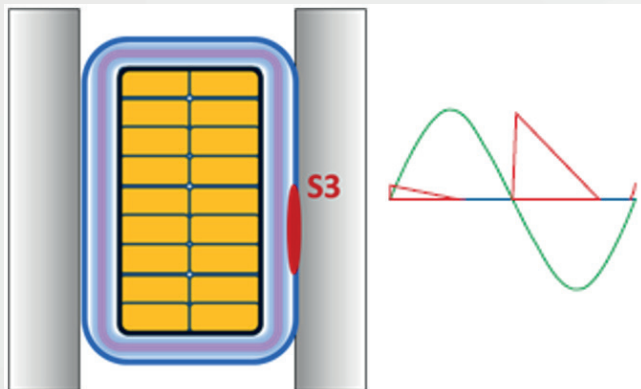
A delaminação (S2) no interior da isolamento é provocada por uma cura inadequada durante a fabricação, por forças mecânicas extremas ou por estresse térmico durante a operação.



Esse fenômeno resulta na formação de grandes vazios na superfície da isolamento, que podem gerar descargas de alta energia, comprometendo a integridade do material isolante. Além disso, a delaminação diminui a condutividade térmica da isolamento, acelerando sua deterioração e podendo levar à ruptura térmica.

5.8.5.11 Descargas dentro da ranhura

Descargas parciais dentro da ranhura (S3) ocorrem quando a cobertura semicondutora da isolamento no interior da ranhura é comprometida.

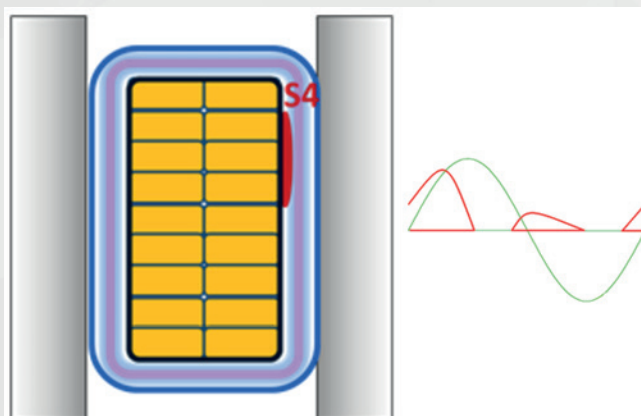


Isso pode acontecer devido ao movimento da barra ou bobina, perda do sistema de cunhagem, erosão do material, ataque químico, ou falhas de fabricação e montagem.

Quando há danos mecânicos significativos, descargas de alta energia podem ocorrer, levando a danos adicionais e, eventualmente, à falha completa do isolamento. Este tipo de degradação é crítico e requer monitoramento contínuo para prevenir falhas catastróficas.

5.8.5.12 Delaminação entre cobre e isolamento principal

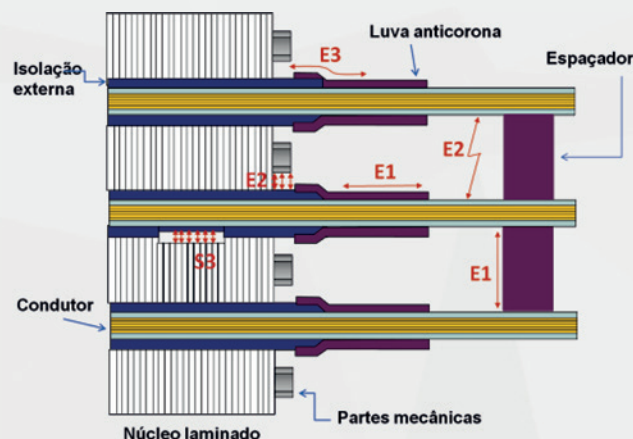
A delaminação entre os condutores de cobre e a isolamento principal (S4) é uma falha crítica, resultante de ciclos térmicos excessivos ou forças mecânicas intensas.



Essa condição é perigosa, pois pode causar danos severos à isolamento dos condutores. Assim como na falha S2, a delaminação compromete a condutividade térmica da isolamento, levando a uma deterioração acelerada ou até mesmo à ruptura térmica. Esta redução na capacidade de dissipação de calor aumenta significativamente o risco de falhas no sistema de isolamento.

5.8.5.13 Descargas de superfície nas cabeças de Bobinas

As descargas parciais (PD) nas cabeças de bobinas (E1), representado na figura abaixo, ocorrem em pontos de alto campo elétrico local.

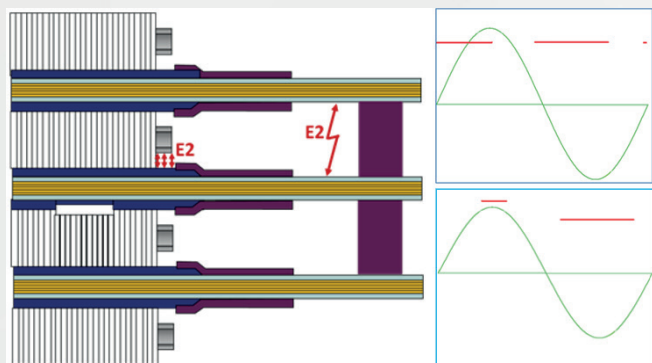


Essas descargas podem surgir na interface entre diferentes elementos das cabeças de bobinas, entre fases devido a espaçamento inadequado dos elementos de suporte, ou entre fase-terra na superfície. Comumente, essas descargas são causadas por contaminação. As PDs resultam em erosão do material isolante, potencialmente levando a falhas se não forem identificadas e mitigadas.

A figura acima, também é referência para os efeitos abordados a seguir.

5.8.5.14 Descargas espaciais nas cabeças de bobinas

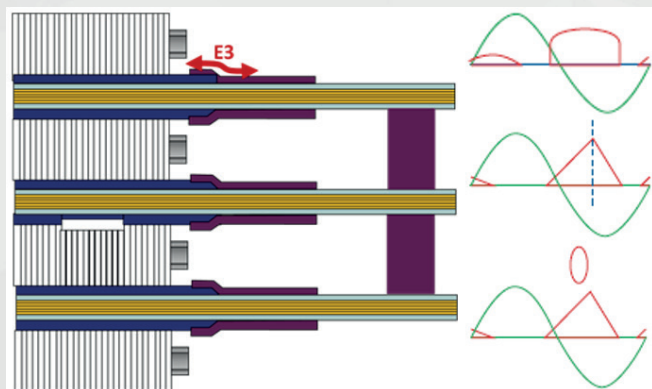
Descargas espaciais nas cabeças de bobinas (E2), ou nas ranhuras, são fenômenos críticos que incluem efeitos como corona, flutuação de potencial, e espaçamento inadequado.



Esses eventos podem resultar em centelhamento entre enrolamentos, bem como entre barras ou bobinas e a parede da ranhura ou em pontos afiados, como os dedos de pressão. Estes fenômenos ocorrem devido à alta tensão e à proximidade dos condutores, criando pontos de alta concentração de campo elétrico que podem iniciar descargas parciais e comprometer a integridade do isolamento.

5.8.5.15 Descargas na luva anticorona

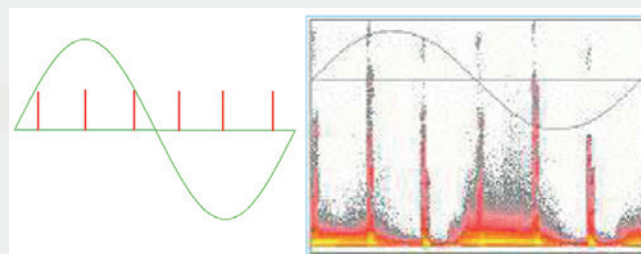
Falhas na luva anticorona (E3), como mau contato, projeto ou fabricação inadequados, contaminação, porosidade e efeitos térmicos, podem resultar em descargas de superfície. Estas descargas gradualmente erodem os materiais da luva anticorona.



Embora este mecanismo de falha seja geralmente lento, os pulsos de descargas parciais (PD) podem apresentar rápidas variações devido aos efeitos de superfície. Portanto, é crucial monitorar e avaliar regularmente a condição das luvas anticorona para prevenir danos significativos e garantir a longevidade e a eficiência das máquinas elétricas rotativas.

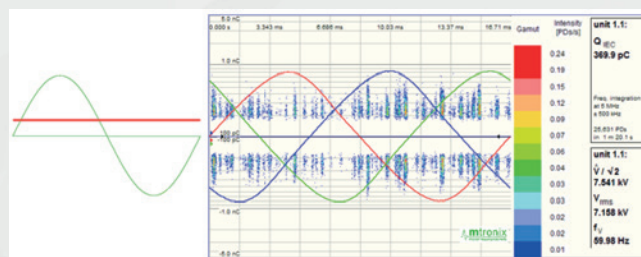
5.8.5.16 Ruídos de excitação estática

Quando as descargas parciais (PD) são distribuídas uniformemente ao longo do ciclo CA, geralmente em ondas discerníveis em múltiplos de 6 (às vezes 12 ou 24), a fonte dos pulsos é típica de sistemas de excitação estática.



Esse padrão de distribuição não indica problemas nos enrolamentos, mas sim uma característica inerente aos sistemas de excitação estática, onde os pulsos se repetem de maneira sistemática e previsível, refletindo a operação normal do equipamento de excitação.

Existem também os ruídos de fundo: assíncrono com sinal CA.



5.8.5.17 Coleta e Análise dos Dados

A coleta e análise de dados em descargas parciais são processos complexos que exigem a expertise de especialistas experientes, capazes de considerar todas as medições de forma integrada

para obter conclusões precisas. A segurança é um fator crítico devido aos altos potenciais envolvidos no processo.

A metodologia de coleta de dados pode ser realizada tanto online, com a máquina em operação, quanto offline, com a máquina parada. Cada método possui suas particularidades e efeitos específicos, exigindo atenção detalhada às condições e efeitos de medição para garantir a precisão e a ausência de erros nos dados coletados, demonstrando a complexidade inerente a esse tipo de ensaio elétrico.

manutenção e testes. Este documento permite revisões precisas em futuras intervenções, garantindo uma análise contínua e informada do desempenho e da integridade dos equipamentos.

5.8.6 Laudo técnico

O laudo técnico de ensaios elétricos especializados registra detalhadamente os resultados das avaliações realizadas, possibilitando o planejamento de manutenções preventivas e corretivas. Os principais objetivos do laudo incluem apresentar a avaliação da condição atual do sistema de isolamento, identificando e apontando possíveis falhas ou pontos de degradação, fornecendo subsídios para a tomada de decisões sobre intervenções necessárias e assegurar que os equipamentos estão em conformidade com as normas técnicas aplicáveis.

O laudo começa com informações gerais sobre o equipamento, como identificação, local de instalação da máquina elétrica e data dos ensaios, e as condições operacionais no momento dos testes. Em seguida, descreve a metodologia adotada para cada ensaio, incluindo os procedimentos específicos, equipamentos utilizados, parâmetros e condições de teste.

Os resultados dos ensaios incluem medições detalhadas de cada ensaio elétrico realizado, bem como a correta interpretação dos resultados em comparação com padrões normativos como IEEE e IEC, destacando tendências de degradação e recomendações de ações corretivas ou preventivas em um ponto de vista técnico da análise realizada por um especialista. Conclusões e recomendações sintetizam os principais achados dos ensaios, sugerem intervenções imediatas ou monitoramento contínuo e fornecem orientações para futuras inspeções e ensaios.

O laudo técnico é essencial para avaliar a condição da vida útil de máquinas elétricas rotativas, proporcionando um histórico detalhado de

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Manuais de fabricante:

WEG, GEVISA, ABB, SIEMENS, LHF, entre outros.

Livros:

ALMEIDA, Marcus Eugênio S. de. Monitoramento e Testes em Máquinas Elétricas de Alta Tensão r1. WWW.POLUXTEC.COM.BR: Ed. do Autor, 2022.

STONE, Greg C.; BOULTER, Edward A.; CULBERT, Lan; DHIRANI, Hussein. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. Wiley Online Library: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

TAVNER, Peter; RAN, Li; PENMAN, Jim; SEDDING, Howard. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. IET Digital Library: Institution of Engineering and Technology (IET), 2008.

PYRHONEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVA, V. Design of Rotating Electrical Machines. Wiley Online Library: John Wiley & Sons, 2008.

Normas regulamentadoras internacionais:

IEEE 43-2013. IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery. Piscataway, NJ: IEEE, 2013.

IEEE 115-2019. IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines. Piscataway, NJ: IEEE, 2019.

IEEE 56-2016. IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery. Piscataway, NJ: IEEE, 2016.

IEEE 222-2020. IEEE Standard for Design and Qualification of Class 1E Electric Cables for Nuclear Power Generating Stations. Piscataway, NJ: IEEE, 2020.

IEEE 421.5-2016. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. Piscataway, NJ: IEEE, 2016.

Norma regulamentadora nacionais:

NBR 8451:1997. Máquinas elétricas girantes - Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

NBR 15751:2009. Máquinas elétricas girantes - Métodos de ensaio para determinação da eficiência. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

NBR 5117:2002. Máquinas elétricas girantes - Determinação da classe de isolamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

NBR 14039:2003. Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

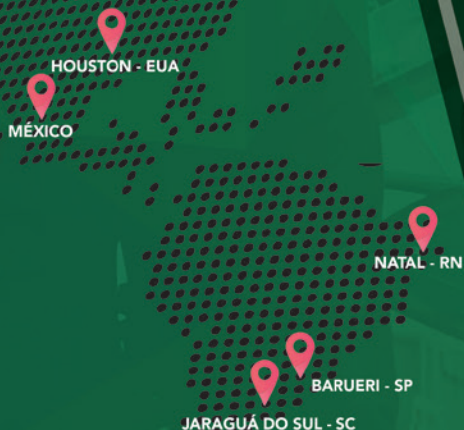
NBR 16384:2015. Requisitos para a segurança de máquinas elétricas girantes. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

Material de apoio:


AMORIM, Hélio. Interpretação e Diagnóstico PD. CIGRE, 2023.

QUEM SOMOS

O grupo é especializado em soluções de serviços para máquinas elétricas rotativas de baixa e média tensão, automação, ensaios especiais, monitoramento de ativos e partes e peças para motores e geradores. Surgiu devido à escassez de mão de obra qualificada, formando uma equipe especializada e equipada para oferecer soluções eficientes em diversos segmentos. Atividades incluem recuperação, revisão, manutenção preditiva, preventiva e corretiva em motores e geradores, análise avançada de isolamento (DIELEC), sistemas de monitoramento de ativos, e fornecimento de peças sobressalentes. A missão é fornecer serviços de qualidade reconhecida pelos clientes, utilizando tecnologias atualizadas para a melhoria contínua. Com presença nacional e internacional, o grupo tem sedes em Santa Catarina, Rio Grande do Norte, São Paulo, Estados Unidos e México.



 @ecovisservice

 +55 [47] 41030625

 contato@ecovis.com.br