

SAMUEL CERRUTI GUARNIERI

**Estudo da parametrização básica de proteções para
motores elétricos em instalações industriais**

Samuel Cerruti Guarnieri

**Estudo da parametrização básica de proteções para
motores elétricos em instalações industriais**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador (a): Luiz Octávio Mattos dos Reis

Guarnieri, Samuel Cerruti
G916e Estudo da parametrização básica de proteções para motores elétricos em instalações industriais / Samuel Cerruti Guarnieri – Guaratinguetá, 2017.
69 f : il.
Bibliografia: f. 68-69

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis

1. Reles de proteção. 2. Motores elétricos. 3. Sistemas de energia elétrica – Proteção. I. Título.

CDU 621.318.5

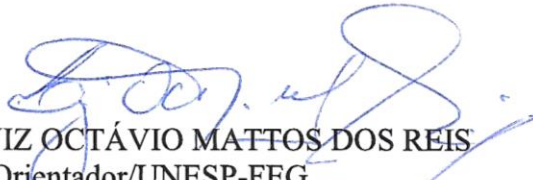
SAMUEL CERRUTI GUARNIERI

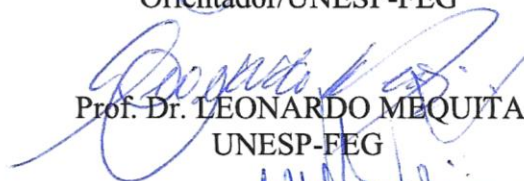
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO ENGENHARIA ELÉTRICA"

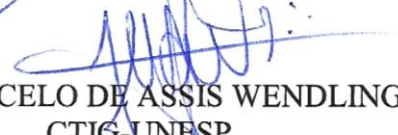
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
UNESP-FEG


Eng. JOSÉ MARCELO DE ASSIS WENDLING JÚNIOR
CTIG-UNESP

Dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha família, meus pais que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

à equipe de Baja SAE, Piratas do Vale, pela grande experiência que vivi neste meu período acadêmico, aos meus conhecimentos adquiridos e aos bons amigos que conheci na equipe.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus colegas de casa, André Marinho, Darwin Rafael Valente, Caio Henrique, Fábio Yoiti e Leonardo Stepanczuk , pelo incrível companheirismo que tornou nossa convivência excelente, e aos amigos do prédio, principalmente pelas noites estudando em grupo e o apoio quando precisei.

à toda equipe do meu estágio, devido ao total apoio nesse período, aos ensinamentos que me foram passados e ao incentivo para seleção deste tema do trabalho de graduação.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Talento é 1% inspiração e 99% transpiração.”

Thomas Edison

RESUMO

Motores elétricos representam grande parcela de força motriz na maioria dos setores industriais, já que em média 62,5% do consumo de energia elétrica em ambientes industriais são devidos a estas máquinas elétricas. Portanto, pode-se deduzir que todo o processo produtivo está atrelado ao correto funcionamento destes equipamentos e qualquer falha no próprio motor ou uma atuação indevida da proteção elétrica, pode representar parada da produção, redução de qualidade do produto e até mesmo problemas de segurança e ambientais. Por outro lado, uma não atuação da proteção quando requerida é tão prejudicial quanto a atuação indevida, e pode causar danos na instalação. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo básico sobre as proteções necessárias para diversos tipos de motores e apresentar as filosofias de proteções envolvidas em motores assíncronos de gaiola de esquilo e motores síncronos, tanto de baixa quanto de média tensão. Foram utilizadas como base normas, livros e informações de fabricantes de motores, garantindo assim a correta atuação da proteção, para proteger a máquina e a instalação. Será apresentada também a teoria de funcionamento dos dispositivos de proteções como relés, disjuntores, fusíveis dentre outros. Também são apresentados exemplos de aplicações de todo o conhecimento levantado durante este trabalho, além de propor futuras melhorias e tópicos a serem aprofundados em uma próxima oportunidade.

PALAVRAS-CHAVE: Relés de proteção. Proteção de motores. Motores de média tensão. Seletividade e coordenação.

ABSTRACT

Electric motors represent a large part of the driving force in most industrial sectors, as an average of 62.5% of electric power consumption in industrial environments is due to these electric machines. Therefore, it can be deduced that the whole production process is related to the correct operation of these equipments and any failure in the motor itself or an improper performance of the electric protection, can represent production stoppage, reduction of product quality and even safety and environmental impacts. On the other hand, failure to perform protection when required is as harmful as improper performance, and can cause damage to the installation. This work aims to carry out a basic study on the necessary protections for several types of motors and to present the protection philosophies involved in asynchronous squirrel cage motors and synchronous motors, both low and medium voltage. Standards, books and information from engine manufacturers were used as a basis, thus ensuring the correct performance of the protection, to protect the machine and the installation. It will also present the theory of operation of protection devices such as relays, circuit breakers, fuses, among others. Also presented are examples of applications of all the knowledge raised during this work, as well as propose future improvements and topics to be deepened in a next opportunity.

KEYWORDS: Protection relays. Protection of motors. Medium voltage motors. Selectivity and coordination.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Típico motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo.	17
Figura 2 – Curvas de conjugado <i>versus</i> velocidade síncrona.....	20
Figura 3 – Limites de elevação de temperatura por classe de isolamento.....	21
Figura 4 – Exemplo de seletividade amperimétrica.....	22
Figura 5 – Representação da seletividade cronométrica.	23
Figura 6 – Gráfico de tempo <i>versus</i> corrente para as proteções P1 e P2.	24
Figura 7 – Tempo <i>versus</i> corrente de alguns modelos de fusíveis NH gG/gL.....	26
Figura 8 – Curvas de atuação de um relé térmico de sobrecarga.	28
Figura 9 – Curva típica de atuação de um disjuntor termomagnético.	29
Figura 10 – Curvas de atuação de minidisjuntores A, B e C.....	29
Figura 11 – Curva de atuação de disjuntor de grande porte Siemens 3WN6.....	30
Figura 12 – Relé digital multifunção ABB SPAJ 140C.....	31
Figura 13– Representação interna do blocos de um relé digital multifunção.	32
Figura 14 – Exemplo de curva de partida de um motor e seus pontos de rotor bloqueado.	40
Figura 15 – Exemplo de curvas de limite térmico de motores elétricos.	41
Figura 16 – Proteção de sobrecarga térmica com o uso de relés térmicos de diferentes classes.	42
Figura 17 – Proteção de sobrecarga térmica - curvas a quente e a frio de um relé bimetalico.....	43
Figura 18 – Proteção térmica de relés multifunção coordenada com as curvas de limite térmico da máquina.....	45
Figura 19 – Curvas de proteção de um relé térmico bimetalico + fusível.	48
Figura 20 – Exemplo de proteção de motor com disjuntor motor.....	49
Figura 21 – Exemplo de curvas de proteção em disjuntores termomagnéticos do tipo caixa moldada.	50
Figura 22 – Exemplo de curvas da função 51 traçadas conforme equação 5 e $T_{ms} = 0,6$	51
Figura 23 – Exemplo de curvas de proteção com relé multifunção - funções 49, 50 e curvas de capacidade térmica da máquina.	52
Figura 24 – Exemplo de aplicação da função 48 em conjunto com a 49.....	56
Figura 25 – Esquema de ligação dos TCs para proteção a neutro residual (50N/51N).	57
Figura 26 – Esquema de ligação para transformador de sequência zero, ou TC de janela, para função 50G/51G.....	58
Figura 27 – Ligação dos TCs para a proteção 87M.....	59

Figura 28 – Curvas de proteção propostas para o exemplo 6.1.....	61
Figura 29 – Curvas de proteção propostas para o exemplo 6.2.....	62
Figura 30 – Curvas de proteção propostas para o exemplo 6.3.....	64
Figura 31 – Curvas de limite térmico do motor para o exemplo 6.4.	65
Figura 32 - Curvas de proteção propostas para o exemplo 6.4.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais parâmetros de placa de um motor de indução trifásico.	18
Quadro 2 – Tipos de fusíveis NH e Diazed.	27
Quadro 3 – Nomenclatura das funções de proteção e manobra.	32
Quadro 4 – Nomenclatura das funções de proteção e manobra.	33
Quadro 5 – Nomenclatura complementar das funções de proteção e manobra.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentual de consumo elétrico devido a motores frente ao consumo total de indústrias de diversos setores	14
Tabela 2 – Percentual de falhas por componentes em motores elétricos.	35
Tabela 3 – Sugestão da IEEE 3004.8 (2016) para proteção de motores assíncronos de MT... ..	37
Tabela 4 – Sugestão da IEEE C37.96 (2012) para proteção de motores assíncronos de MT. .	38
Tabela 5 – Recomendações de proteções segundo Mamede Filho (2011) e Mardegan (2010) para motores MT assíncrono.	38
Tabela 6 – Temperaturas recomendadas para alarme e <i>trip</i> na função 49S.....	46
Tabela 7 – Fatores α e β conforme o tipo de curva da função 51	51
Tabela 8 – Parâmetros propostos para o exemplo 6.3.....	63
Tabela 9 – Parâmetros propostos para o exemplo 6.4.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASA	American Standards Association
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCM	Centro de Comando de Motores
I _{CS}	Corrente de curto-circuito
IEEE	Institute Of Electrical And Electronics Engineers
I _N	Corrente nominal de operação
IOC	Instantaneous Overcurrent
I _P	Corrente de Partida
MT	Média Tensão
TOC	Time Delayed Overcurrent
TRB	Tempo de Rotor Bloqueado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
3	CONCEITOS E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	MOTORES ELÉTRICOS	17
3.1.1	Especificações técnicas de motores	18
3.1.2	Corrente de partida	19
3.1.3	Categoria de conjugado	19
3.1.4	Classe de isolamento	20
3.2	PROTEÇÕES ELÉTRICAS	21
3.2.1	Requisitos de um sistema de proteção	22
3.2.1.1	Seletividade	22
3.2.1.1.1	<i>Seletividade amperimétrica ou seletividade por corrente</i>	22
3.2.1.1.2	<i>Seletividade cronométrica</i>	23
3.2.1.1.3	<i>Seletividade lógica</i>	24
3.2.1.2	Zonas de Atuação	24
3.2.1.3	Velocidade	25
3.2.1.4	Sensibilidade	25
3.2.1.5	Confiabilidade	25
3.3	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	25
3.3.1	Fusíveis	25
3.3.2	Relés Térmicos de sobrecarga	27
3.3.3	Disjuntores de baixa tensão	28
3.3.4	Disjuntor motor	30
3.3.5	Relés de proteção	30
4	PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS	35
4.1	REQUISITOS GERAIS DE PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS	35
4.1.1	Requerimentos de proteção para motores de baixa tensão assíncrono	36
4.1.2	Requerimentos de proteção para motores de média tensão assíncrono	36
4.1.3	Requerimentos de proteção para motores de média tensão síncrono	39
5	FUNCIONAMENTO E PARAMETRIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	40
5.1	FUNÇÃO DE SOBRECARGA IMAGEM TÉRMICA (49)	40

5.1.1	Função de sobrecarga imagem térmica (49) em baixa tensão	41
5.1.2	Função de sobrecarga imagem térmica (49) em média tensão	43
5.2	FUNÇÃO DE PROTEÇÃO TÉRMICA COM SONDAS (49S)	45
5.3	PROTEÇÃO CONTRA SUBTENSÃO (27).	46
5.4	PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE DE FASE (50, 51 E FUSÍVEIS)	47
5.4.1	Proteções de sobrecorrente de fase em BT e MT com fusíveis	47
5.4.2	Proteções de sobrecorrente de fase em BT com disjuntor motor	48
5.4.3	Proteções de sobrecorrente de fase em BT com disjuntor termomagnético .	49
5.4.4	Proteções de sobrecorrente de fase em BT e MT com relés multifunções. ...	50
5.5	PROTEÇÃO DE TEMPERATURA DE MANCAIS (38)	53
5.6	PROTEÇÃO CONTRA DESBALANÇO DE CORRENTE DE FASE (46)	53
5.7	PROTEÇÃO DE QUANTIDADE DE PARTIDAS (66)	54
5.8	PROTEÇÃO DE SUBCORRENTE (37)	55
5.9	PROTEÇÃO DE SEQUÊNCIA INCOMPLETA (48)	55
5.10	PROTEÇÃO CONTRA TRAVAMENTO EM OPERAÇÃO (50LR/51LR)	56
5.11	PROTEÇÃO CONTRA FALTA A TERRA (50N, 50G, 51N, 51G, FUSÍVEIS 57	
5.11.1	Proteção contra falta a terra em baixa tensão	57
5.11.1	Proteção contra falta a terra em média tensão	57
5.12	PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE CORRENTE PARA MOTORES (87M)	59
5.13	PROTEÇÕES PARA MOTORES SÍNCRONOS	59
5.13.1	Relé de campo (40)	60
5.13.2	Relé de fator de potência (55)	60
5.13.3	Relé de aplicação de campo (56)	60
5.13.4	Relé direcional de potência (32)	60
6	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	61
6.1	MOTOR DE BAIXA TENSÃO – FUSÍVEL E RELÉ TÉMICO	61
6.2	MOTOR DE BAIXA TENSÃO – DISJUNTOR MOTOR	62
6.3	MOTOR DE MÉDIA TENSÃO – FUSÍVEL E CONTATOR	63
6.4	MOTOR DE MÉDIA TENSÃO – DISJUNTOR	64
7	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

A partir da segunda revolução industrial, por volta de 1870, experimenta-se um movimento de revolução tecnológica em busca do aumento de produção, menor consumo de insumos e melhor organização industrial. Em paralelo a isso, no final do século 19, foram realizados os primeiros experimentos de motores de corrente contínua, corrente alternada e geradores.

Após o amadurecimento da técnica de construção de motores elétricos e a popularização da energia elétrica, a substituição de turbinas a vapor e grandes sistema de distribuição de força por correias e polias começaram a ser substituídos por motores elétricos diretamente acoplados à carga, otimizando espaço ocupado na fábrica e gasto energético, além de possuírem melhor controle de velocidade.

Após a segunda guerra mundial, os motores elétricos dominaram o posto de fornecimento de força motriz na grande maioria das indústrias. Segundo *Office of energy efficiency and renewable energy* (2002), o consumo de energia elétrica médio da indústria de diversos segmentos é 62,5% devido aos motores elétricos, variando de 30% até 95% dependendo do setor industrial, conforme dados na Tabela 1:

Tabela 1 – Percentual de consumo elétrico devido a motores frente ao consumo total de indústrias de diversos setores

Tipo de Industria	% do consumo de energia elétrica dos motores em relação ao total de consumo da indústria
Indústrias de Processos	71%
Fabricação de Metais	30%
Fabricação de Não-Metais	47%
Manufatura de Metais	37%
Produção Agrícola	41%
Mineração	90%
Extração de Óleo e Gás	90%
Suprimento de água, irrigação, Efluentes	95%

Fonte: Adaptado de *Office of energy efficiency and renewable energy* (2002)

Não é difícil afirmar com estes dados que os motores elétricos desempenham um papel fundamental no processo produtivo, e que uma falha no motor pode parar totalmente a produção, afetar a qualidade do produtos, causar instabilidades no processo, causar problemas

de segurança, por exemplo, em pontes rolantes e exaustores e sistemas de ar condicionado centralizado e até mesmo problemas ambientais, como em estações de tratamento de efluentes.

Para proteger motores elétricos e a instalação elétrica em geral, são utilizados dispositivos de proteção, como fusíveis, disjuntores, relés de proteção e outros dispositivos. A intenção de se proteger um motor é justamente evitar a queima ou danos mecânicos a este, principalmente em casos comuns como sobrecarga mecânica, travamento de eixo, partidas longas, falta de fase e outras falhas, onde uma atuação da proteção é via de regra menos custosa financeiramente e requer um tempo menor para reestabelecer o processos, principalmente em motores de grande porte.

Isso justifica a preocupação de todos os parâmetros do sistema de proteção estarem de acordo conforme o projetado, para garantir a correta atuação em caso de falhas, caso o contrário, motores podem ser danificados e o inverso também pode ocorrer, com atuações indevidas da proteção em situações onde ela não seria necessária.

A motivação deste trabalho é então justamente estudar quais as proteções necessárias para motores síncronos e assíncronos de baixa e média tensão e como proceder com a seleção dos parâmetros de proteções destes.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral de: ser um guia para a parametrização ou avaliação de parametrizações já implantadas das proteções elétricas para motores listados abaixo, segundo normas, livros, artigos e recomendações dos próprios fabricantes.

- Motores de indução trifásicos tipo gaiola de esquilo de baixa tensão
- Motores de indução trifásicos tipo gaiola de esquilo de média tensão
- Motores síncronos de média tensão

Quanto aos objetivos específicos serão:

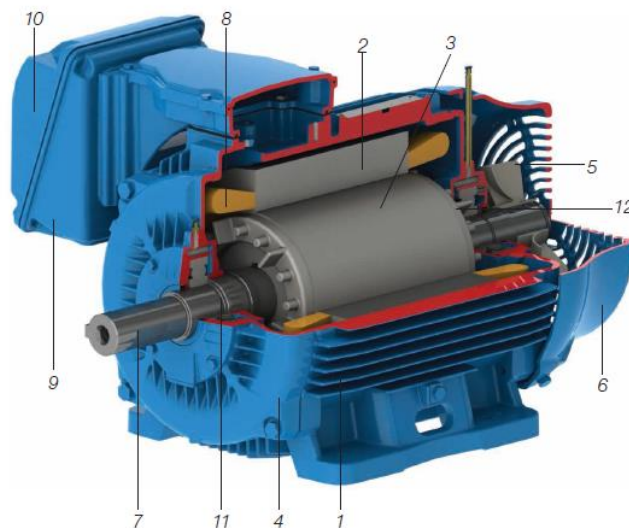
- Explicar de maneira simplificada o funcionamento de motores de indução trifásico e parâmetros de placa,
- Explicar de forma simplificada os requisitos dos sistemas de proteção, seletividade e coordenação, gráfico tempo *versus* corrente,
- Dispositivos de proteção segundo a American Standards Association – ASA,
- Explicar de forma básica a teoria de funcionamento dos dispositivos de proteção, como fusíveis, relés térmicos, disjuntores, disjuntor-motor, relés de proteção analógicos e digitais,
- Exemplos de seleção de funções de proteção e suas parametrização para alguns casos, com aplicação típica em indústrias.

3 CONCEITOS E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 MOTORES ELÉTRICOS

Motor elétrico, ou máquina elétrica, pode ser definido como um conversor de energia elétrica em energia mecânica, com uma eficiência relativamente alta, quando comparada com motores a combustão, por exemplo. O motor mais comum em ambientes industriais é o totalmente vedado de indução trifásico, com rotor de gaiola de esquilo e refrigerado a ar diretamente em sua carcaça aletada, conforme ilustrada na Figura 1

Figura 1 – Típico motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo.



Fonte: WEG (2016b)

O motor ilustrado é constituído por uma carcaça (1) que pode ser de alumínio ou ferro fundido; esta tem a função de sustentação mecânica do conjunto do estator (8+2) e do rotor (3) nos mancais (11), pois todo o conjugado aplicado ao eixo é refletido nos pés de fixação do motor. A carcaça também tem a função de dissipação térmica do calor gerado nas bobinas do estator (2) através de aletas de refrigeração. O Motor possui também um ventilador (5) para criar um fluxo de ar para sua refrigeração e uma tampa defletora (6) para direcionamento deste fluxo através das aletas da carcaça e também a proteção contra a parte girante exposta do motor.

O enrolamento do estator é uma área que merece uma atenção especial, devida a isolamento necessária entre as espiras dos fios de cobre das bobinas e entre elas e a chaparia metálica que forma o estator. Esta isolamento é feita com papéis especiais, ou materiais plásticos e vernizes que se deterioram em alta temperatura, causando a perda de isolamento para massa (curto circuito fase-terra) ou curto entre bobinas (curto fase-fase).

Os demais componentes que fazem parte de um motor de indução trifásico de rotor gaiola de esquilo são: tampa dianteira (4), caixa de ligação entre os cabos do motor e os cabos do alimentador (9).

3.1.1 Especificações técnicas de motores

Tipicamente, a placa de um motor de indução trifásico de baixa tensão do tipo gaiola de esquilo apresenta alguns dados úteis, porém estes não são os únicos dados a serem considerados do ponto de vista da proteção destas máquinas. Muitas vezes, o fabricante também disponibiliza um *datasheet* com mais informações e gráficos relevantes, alguns dados extras podem ser encontrados em catálogos técnicos também. O Quadro 1 resume alguns itens básicos, outros que merece uma explicação mais detalhada serão abordados nos tópicos a seguir.

Quadro 1 – Principais parâmetros de placa de um motor de indução trifásico.

<i>Dado</i>	<i>Descrição</i>
<i>Corrente Nominal (In)</i>	<i>Corrente absorvida por fase quando o motor opera com a frequência nominal, tensão nominal e potência mecânica nominal. Dependendo de quantas ligações são disponibilizadas o motor poderá possuir mais de uma tensão de operação possível, logo para cada tensão será informado uma corrente nominal respectiva</i>
<i>Tensão Nominal</i>	<i>A grande maioria dos motores podem ser ligados em mais de um valor de tensão, parra isso deve ser modificado o esquema de ligação dos cabos das bobinas disponível, por exemplo, modificando a ligação de delta para estrela.</i>
<i>Potência Nominal</i>	<i>Potência mecânica máxima disponível na ponta de eixo do motor, conforme o projeto da máquina, pode ser expressa em HP, CV ou em kW</i>
<i>Rotação Nominal ou Quantidade de Polos</i>	<i>Velocidade angular de operação do motor em sua frequência nominal e potência nominal, geralmente expresso em rotações por minuto (RPM). Quando expresso em quantidade de polos se refere forma construtiva das bobinas, que junto com a frequência de operação determinara a velocidade síncrona do campo magnético girante, logo um motor de 4 polos terá a velocidade síncrona de 1800 RPM em 60 Hz , porém o eixo tem a velocidade de 1773 RPM em carga plena devido ao escorregamento, que é justamente a diferença percentual da velocidade síncrona e a velocidade rotórica, nesse exemplo citado, de aproximadamente 1,5%</i>
<i>Frequência Nominal da rede</i>	<i>Frequência da rede para qual o motor foi projetado para operar, 50 ou 60 Hz tipicamente.</i>
<i>Temperatura Ambiente máxima</i>	<i>Temperatura ambiente máxima na qual o motor deverá submetido, este valor está relacionado com a capacidade de refrigeração do motor e a temperatura máxima que a isolação das bobina suporta.</i>
<i>Fator de Serviço (F.S.)</i>	<i>O fator de serviço e um valor que indica a qual potência o motor pode operar com uma sobrecarga contínua em condições favoráveis (Exemplo: tensão nominal nos terminais do motor, temperatura ambiente baixa, aletas de refrigeração desobstruídas, tensão equilibrada, etc.). Na prática é uma reserva de potência.</i>
<i>Fator de Potência (F.P. ou P.F.)</i>	<i>Fator de potência do motor a plena carga</i>
<i>Rendimento ou Eficiência</i>	<i>É a relação entre a potência efetiva fornecida mecanicamente na ponta de eixo e a potência ativa absorvida da rede elétrica.</i>
<i>Tipo de Mancal</i>	<i>Na placa do motor, assim como em catálogo e datasheet é fornecido o modelo dos rolamentos utilizados no LA e LOA, assim como o tipo de graxa utilizado (quando o rolamento é lubrificável). Pode ser especificado também se o motor for do tipo mancal de bucha ou casquilhos.</i>

3.1.2 Corrente de partida

Durante a partida de um motor assíncrono um grande valor de corrente é absorvida da rede devido a grande diferença de velocidade síncrona e rotórica, o que pode ser aproximado como um curto circuito magnético, justamente daí que o grande valor de corrente surge e se mantém durante a maioria do tempo de aceleração do motor. Esta corrente é referida na base da corrente nominal, normalmente citada como I_p/I_n . Por exemplo, um valor I_p/I_n de placa igual a 6,2 representa que motor absorve 6,2 vezes a corrente nominal dele durante a partida e sua aceleração, naturalmente conforme o escorregamento vai diminuindo (motor acelerando) este nível de corrente decai.

3.1.3 Categoria de conjugado

O conjugado disponível na ponta de eixo do motor durante a sua partida, aceleração e em operação deve ser superior ao conjugado requerido pela carga, caso contrário o motor não conseguiria partir, ficando com seu rotor bloqueado ou durante a operação ele pode operar de forma sobrecarregada e com aumento do escorregamento. Tais características de torque *versus* velocidade são normatizadas e apresentadas Figura 2, e ainda:

Conforme as suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. Estas categorias são definidas em norma (ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1), e são as seguintes:

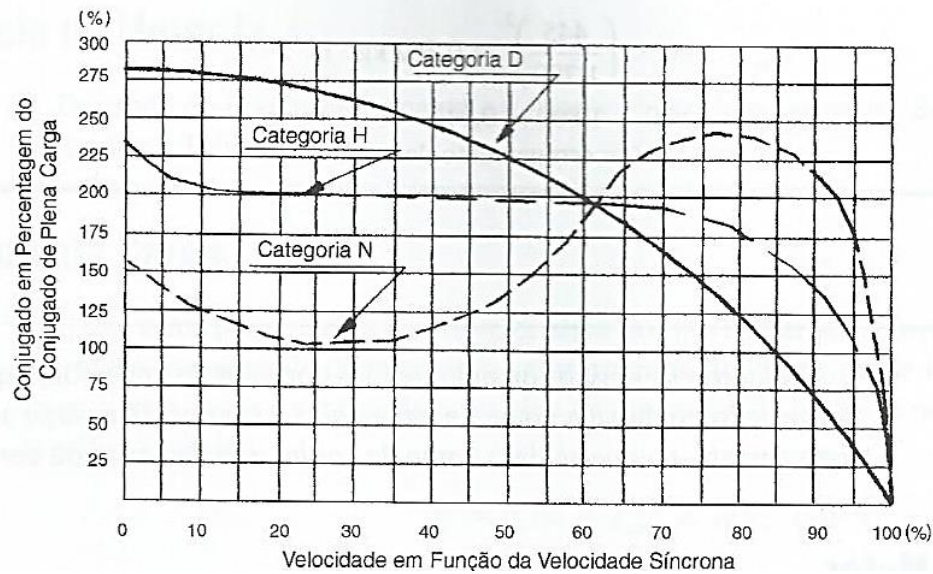
Categoria N: Conjugado de partida normal, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes, ventiladores.

Categoria H: Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregadores, cargas de alta inércia, britadores, etc.

Categoria D: Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; alto escorregamento (+ de 5%). Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos. Usados também em elevadores e cargas que necessitam de conjugados de partida muito altos e corrente de partida limitada.

(WEG, 2016b, p. 26)

Figura 2 – Curvas de conjugado *versus* velocidade síncrona.



Fonte: Mamede Filho (2007)

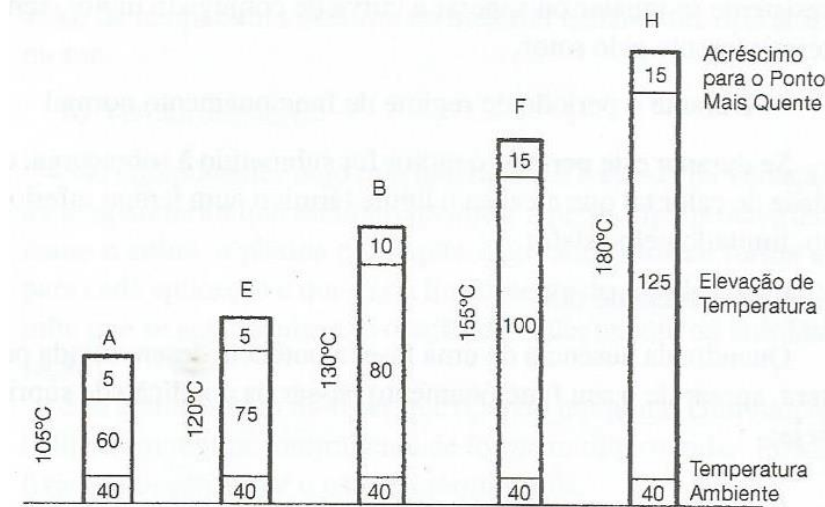
3.1.4 Classe de isolamento

A classe de isolamento ou isolamento está diretamente ligada com os materiais empregados para criar isolamento das bobinas do estator e do rotor (quando do tipo bobinado ou motores CC). Mamede Filho (2007) cita, por exemplo, fibras orgânicas, mica, matérias a base de poliéster, silicones, fibra de vidro, vernizes e outros materiais.

As classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1, são as seguintes:
 Classe A (105 °C) Classe E (120 °C) Classe B (130 °C) Classe F (155 °C) Classe H (180 °C)
 (WEG , 2016b, p. 35)

A integridade da isolamento é o principal fator limitante de temperatura máxima que o motor pode suportar internamente em operação, porém, esta não é uniforme internamente e entre as bobinas, mesmo quando as tensões e correntes são equilibradas, então, na prática, existem alguns limites de elevação de temperatura que diferem da temperatura máxima da classe, além de descontar a temperatura ambiente, que é tipicamente 40°C máximos. Têm-se então os valores exibidos na Figura 3, em que a classe F, apesar de ter limite de 155°C pode apresentar uma elevação máxima de 100°C nos enrolamentos.

Figura 3 – Limites de elevação de temperatura por classe de isolamento.



Fonte: Mamede Filho (2007)

3.2 PROTEÇÕES ELÉTRICAS

Todo sistema elétrico está sujeito a falhas, podendo ter origem interna, como por exemplo curto entre fases internamente em um motor, ou fatores externos, como descargas atmosféricas ou queda de árvores em redes elétrica. A falha mais extrema e mais comum é o curto-circuito, que pode danificar rapidamente cabos, transformadores, chaves seccionadores, geradores, e outros equipamentos. Por outro lado, existem anomalias que levam o sistema a uma sobrecarga, que se mantida de forma contínua poderá acarretar falhas em equipamentos e, dependendo da intensidade, danos tão extensos como um curto-circuito.

Uma das diversas definições para a função de um sistema de proteção em circuitos elétricos é:

A principal função de um sistema de proteção é assegurar a desconexão de todo o sistema elétrico submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos ou de parte dele. Em segundo lugar, o sistema de proteção tem a função de fornecer as informações necessárias aos responsáveis por sua operação, de modo a facilitar a identificação dos defeitos e a sua consequente recuperação.

(MAMEDE FILHO, 2013, p. 1)

Segundo Mamede Filho (2013) de maneira geral as proteções elétricas se baseiam no critério da elevação da corrente, elevação ou redução da tensão e sentido circulante da corrente, além disso os elementos em que constituem um sistema de proteção são os fusíveis e relés.

3.2.1 Requisitos de um sistema de proteção

Um sistema de proteção para executar corretamente a sua função possui alguns requisitos de desempenho. A seguir são mostrados 4 destes, segundo Mamede Filho (2013).

3.2.1.1 Seletividade

Segundo Mamede Filho (2007), seletividade pode ser definida como “capacidade que possui o sistema de proteção de selecionar a parte danificada da rede e retirá-la de serviço sem afetar os circuitos sãos.” Apesar deste trabalho não contemplar o estudo de seletividade em um sistema elétrico inteiro, vale a pena citar de maneira simplificada as maneiras mais usuais de se estabelecer a seletividade.

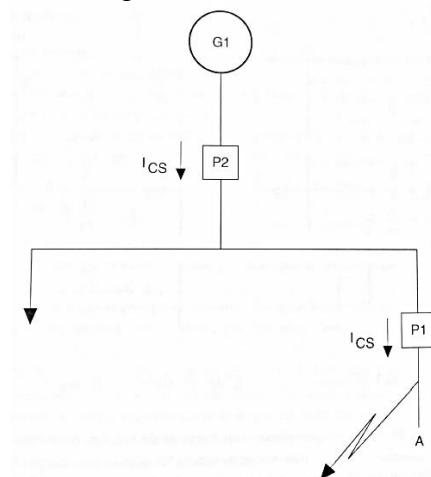
3.2.1.1.1 Seletividade amperimétrica ou seletividade por corrente

Mamede Filho (2013) define esse tipo de seletividade baseado no fato de a corrente de curto-circuito aumenta conforme se aproxima de sua fonte, como por exemplo transformador ou gerador. Dessa maneira o exemplo da Figura 4 mostra um valor de corrente de curto circuito no ponto “A” com valor de I_{CS} neste ponto, e as proteções P1 e P2, com os ajustes I_{p1} e I_{p2} respectivamente, onde estes devem atender as Equações (1) e (2)

$$I_{p1} \leq 0,8 \times I_{CS} \quad (1)$$

$$I_{p2} > I_{CS} \quad (2)$$

Figura 4 – Exemplo de seletividade amperimétrica.

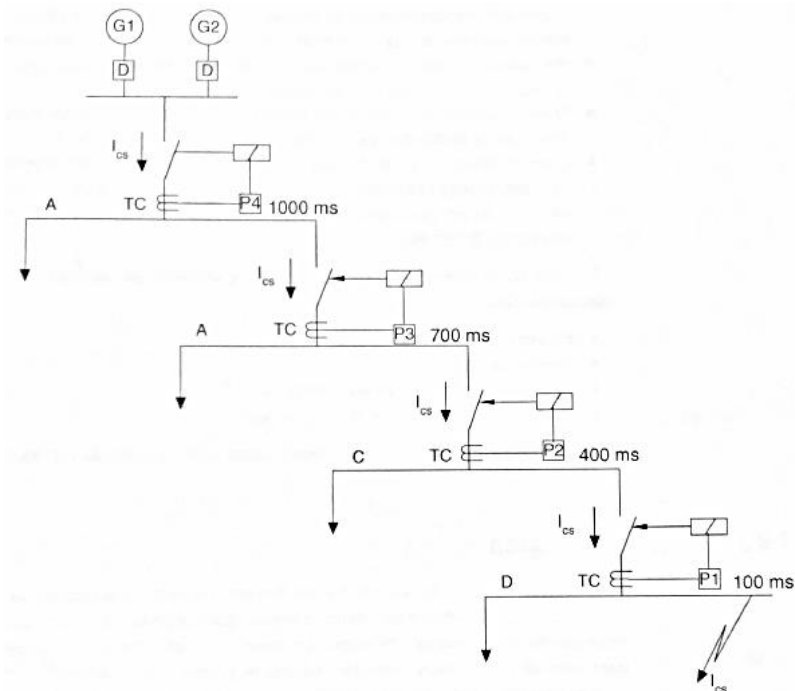


Fonte: Mamede Filho (2013)

3.2.1.1.2 Seletividade cronométrica

Esta seletividade se baseia no fato que os dispositivos de proteções pode ser ajustados (ou selecionados no caso dos fusíveis) de forma a atuarem de uma forma temporizada pré definida para um certo nível de corrente. Este exemplo é mostrado na Figura 5, onde a corrente I_{cs} circula através das proteções, porém, para este nível de corrente, cada proteção tem um tempo de atuação. No caso, a de menor tempo irá atuar primeiro, eliminando apenas o circuito defeituoso da rede e mantendo as demais barras em operação.

Figura 5 – Representação da seletividade cronométrica.

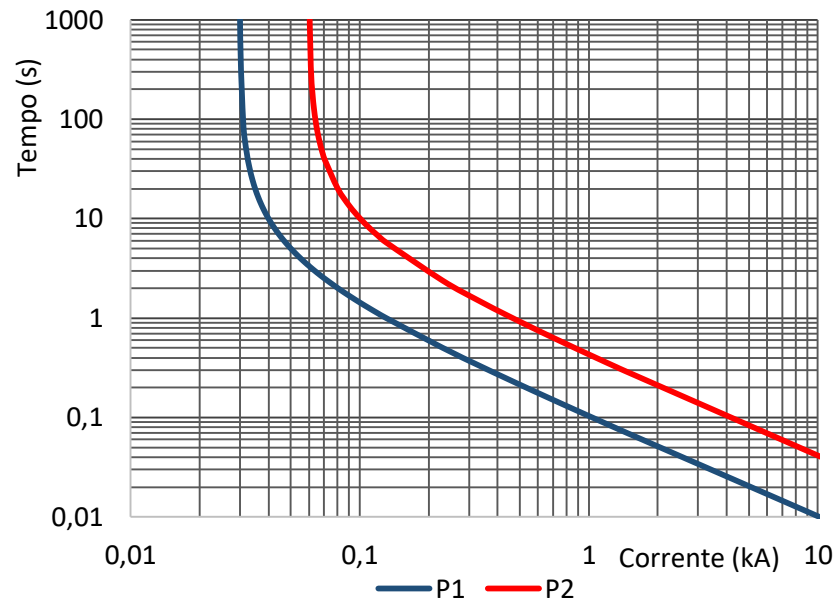


Fonte: Mamede Filho (2013)

Graficamente, esta seletividade pode ser observada através da plotagem de tempo *versus* corrente. Aqui cabe uma observação quanto a interpretação deste tipo de gráfico, que é justamente utilizada para determinar em quanto tempo um dispositivo de proteção deve atuar sob determinado valor de corrente, ao contrário de um gráfico de corrente *versus* tempo, onde se utiliza para observar a variação de corrente ao longo do tempo.

No caso na Figura 6, pode-se notar que com uma corrente de curto-circuito de 1 kA, por exemplo, P1 atuará em 100 ms e P2 em 400 ms, garantindo a desconexão da carga problemática de forma seletiva.

Figura 6 – Gráfico de tempo *versus* corrente para as proteções P1 e P2.



Fonte: Autor.

3.2.1.1.3 Seletividade Lógica

Nesse tipo de seletividade, os relés são interligados via um fio piloto, e com isso, pode-se obter tempos de seletividades extremamente baixos, uma vez que nesse tipo de operação o relé que for sensibilizado primeiro irá inibir o *trip* do relé a montante, e assim, não é necessário aguardar o intervalo de abertura do disjuntor. Uma função adicional é, que em caso não o relé não verifique a abertura do seu disjuntor (travamento de mecanismo ou outro problema no disjuntor), pode enviar o sinal para o relé a montante interromper o circuito.

3.2.1.2 Zonas de atuação

Segundo Mamede Filho (2013), o elemento de proteção deve ser capaz de reconhecer durante um defeito se ele é interno ou externo a sua zona de proteção, se, caso afirmativo, atuar em seu disjuntor correspondente no intervalo de tempo definido para este. Caso a falha seja externa a sua zona de proteção, este não deverá atuar.

3.2.1.3 Velocidade

Após ser definido um tempo para atuação do dispositivo, este deve atuar da forma mais rápida possível, sempre que possível reduzindo o tempo de processamento, por exemplo, em relés digitais e tempos de comutações de contatos em relés mecânicos.

A intenção de reduzir a velocidade de atuação é sempre obter a melhor proteção dos equipamentos elétricos ou reduzir ao máximo os danos causados a este. A velocidade também ajuda a minimizar os afundamentos de tensão no sistema como um todo em casos de curto-circuito.

3.2.1.4 Sensibilidade

Segundo Mamede Filho (2013), sensibilidade pode ser definido como a capacidade do elemento de proteção reconhecer com precisão a sua faixa de atuação e a faixa de sua não atuação.

3.2.1.5 Confiabilidade

Confiabilidade na visão de sistemas de proteção é definida por Mamede Filho (2013) como propriedade de um elemento de proteção cumprir com segurança e exatidão as funções que lhe foram confiadas.

De certa maneira, os sistemas de proteções durante toda a sua vida em operação, efetivamente operam algumas poucas vezes, esse fator é agravado em disjuntores, que podem passar anos com seu mecanismo em repouso, até que são efetivamente solicitados, e devem operar de forma correta e segura, cumprindo a sua função.

3.3 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

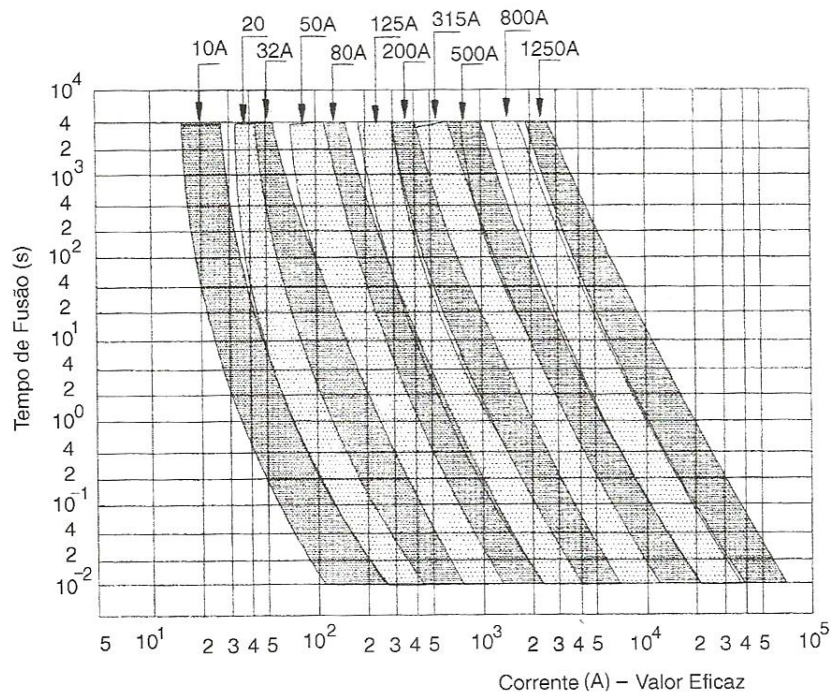
3.3.1 Fusíveis

Os fusíveis são os elementos mais básicos, de simples construção e robustos, empregados em um sistema elétrico. Seu funcionamento se baseia no fato de seu condutor interno se fundir a determinado valor de corrente circulante, abrindo o circuito e isolando a carga defeituosa do

sistema, além de evitar que a corrente de curto-circuito atinja o valor máximo presumido da instalação.

Existem fusíveis tanto para dispositivos de baixa tensão, geralmente fusíveis do tipo NH e Diazed, como para alta tensão, com uma gama grande de modelos, dependente da tensão de aplicação. É apresentada na Figura 7 uma zona de atuação de fusíveis NH em um gráfico tempo *versus* corrente. Note que alguns fabricantes disponibilizam apenas a curva média de atuação, não a zona toda. É justamente com estas curvas ou zonas de atuação que se pode realizar o estudo de seletividade do sistema.

Figura 7 – Tempo *versus* corrente de alguns modelos de fusíveis NH gG/gL.



Fonte: Mamede Filho (2007)

Tipicamente os fusíveis são utilizados apenas para proteções contra curto-circuito, deixando a proteção contra sobrecarga a cargo de um relé térmico ou relé digital. O fato é que os fusíveis são dispositivos com alta capacidade de interrupção de corrente, dezenas ou centenas de kA e de custo baixo quando, comparado com um disjuntor com a mesma capacidade de interrupção.

Se tratando de fusíveis NH e Diazed de baixa tensão existem diferentes classes, sempre denominadas por duas letras, uma minúscula seguida de maiúscula, como por exemplo gG ou gL, que são os mais comuns de se encontrar em instalações elétricas de baixa tensão. Tais designações são mostradas na Quadro 2.

Quadro 2 – Tipos de fusíveis NH e Diazed.

<i>Posição</i>	<i>Letra</i>	<i>Descrição</i>
<i>Primeira Letra (minúscula)</i>	<i>g</i>	<i>Fusível limitador de corrente, atuando tanto na presença de curto-circuito quanto na de sobrecarga; também conhecido como fusível de faixa completa.</i>
	<i>a</i>	<i>Fusível limitador de corrente, atuando somente na presença de um curto-circuito; também conhecido como fusível de faixa parcial.</i>
<i>Segunda Letra (maiúscula)</i>	<i>G</i>	<i>Proteção de linha, uso geral.</i>
	<i>L</i>	<i>Proteção de linha.</i>
	<i>M</i>	<i>Proteção de circuitos motores e equipamentos eletromecânicos.</i>
	<i>Tr</i>	<i>Proteção de transformadores</i>
	<i>R</i>	<i>Proteção de semicondutores, ultrarrápidos.</i>
	<i>S</i>	<i>Proteção de semicondutores e linha.</i>
	<i>B</i>	<i>Proteção em instalações em condições pesadas (minas).</i>

Fonte: Filippi Filho; Dias (2014)

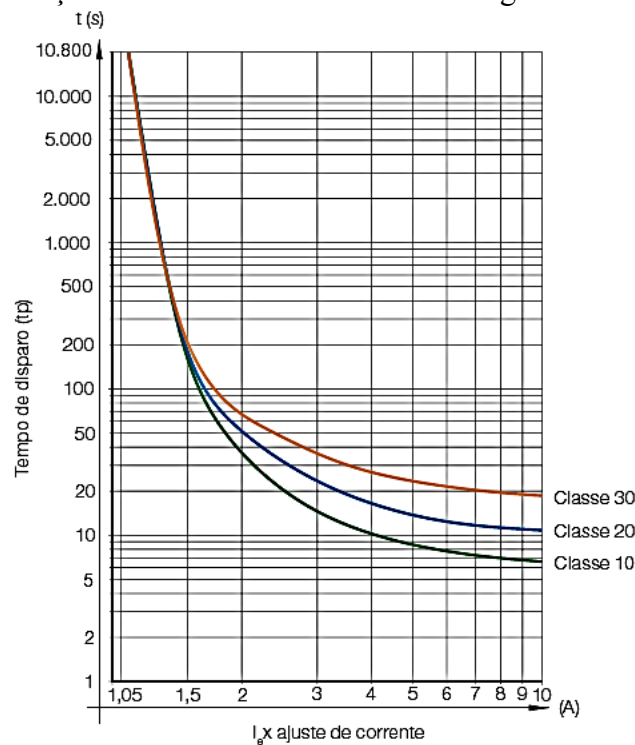
3.3.2 Relés Térmicos de sobrecarga

Relés térmicos podem ser definidos, segundo Mamede Filho (2007), como dispositivos construídos por um par de lâminas de materiais diferentes, logo coeficientes de dilatação térmica diferentes, que quando submetido a uma corrente elétrica causa uma deformação física nesta lâmina que aciona um par de contatos, que é utilizado como sinal de proteção, interrompendo o sinal de comando do contator.

Eles, junto com fusíveis, são os dispositivos mais utilizados para proteger motores de baixa tensão até aproximadamente 630 A de corrente nominal, o que possibilita o uso em motores de baixa tensão até 450 HP em 380V. Sua grande vantagem é conseguir “simular” a curva térmica de aquecimento do estator por justamente possuir uma variação térmica dependente da corrente.

Normalmente, relés térmicos apresentam uma faixa de ajuste de corrente como, por exemplo, um relé para a faixa de 10 a 16 A. Sua curva de atuação é do tipo tempo inverso, ou seja, quando maior for a corrente menor o tempo de atuação do relé. Estes dispositivos também apresentam uma classe de partida, que pode ser 5, 10, 15, 20 e 30, e outras, que dependendo do modelo e do fabricante podem ser fixas ou ajustáveis. Cada classe representa um tempo máximo de disparo a uma corrente de 7,2 vezes a corrente ajustada no *dial*, o que é útil quando se tem partidas de cargas de alta inércia, permitindo a partida sem um desarme não desejado. A Figura 8 mostra um exemplo de curvas de um relé térmico com classe ajustável.

Figura 8 – Curvas de atuação de um relé térmico de sobrecarga.



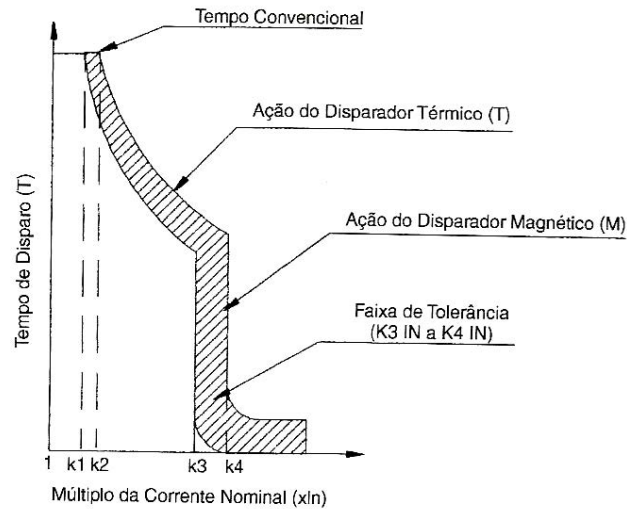
Fonte: WEG (2016c)

Com a evolução tecnológica, os relés térmicos também ganharam a função de proteção contra perda de uma das fases, e conseguem alterar sua curva de atuação nessa condição, para realizar uma atuação mais rápida. Além disso, existem no mercado, atualmente, relés de sobrecarga eletrônicos, que abandonaram o sistema de lâminas bimetálicas e empregam TCs e sistemas digitais autoalimentados que simulam com precisão a curva de um relé térmico bimetálico tradicional, com a vantagem da menor dissipação térmica dentro do painel e menor perda joule. Alguns também possuem capacidade de detectar de forma independente e precisa a ausência de uma fase ou desbalanço entre as fases.

3.3.3 Disjuntores de Baixa Tensão

Tipicamente, os disjuntores de baixa tensão são constituídos por uma parte termicamente dependente da corrente, da mesma maneira dos relés térmicos, e outra parte constituída por um disparador magnético, que é ajustado para um disparo em uma corrente mais elevada. Este, porém, apresenta uma curva do tipo “tempo definido”, conforme ilustrado na Figura 9. Estes disjuntores também são chamados de termomagnéticos, justamente por possuir uma ação de disparador térmico e outra do disparador magnético.

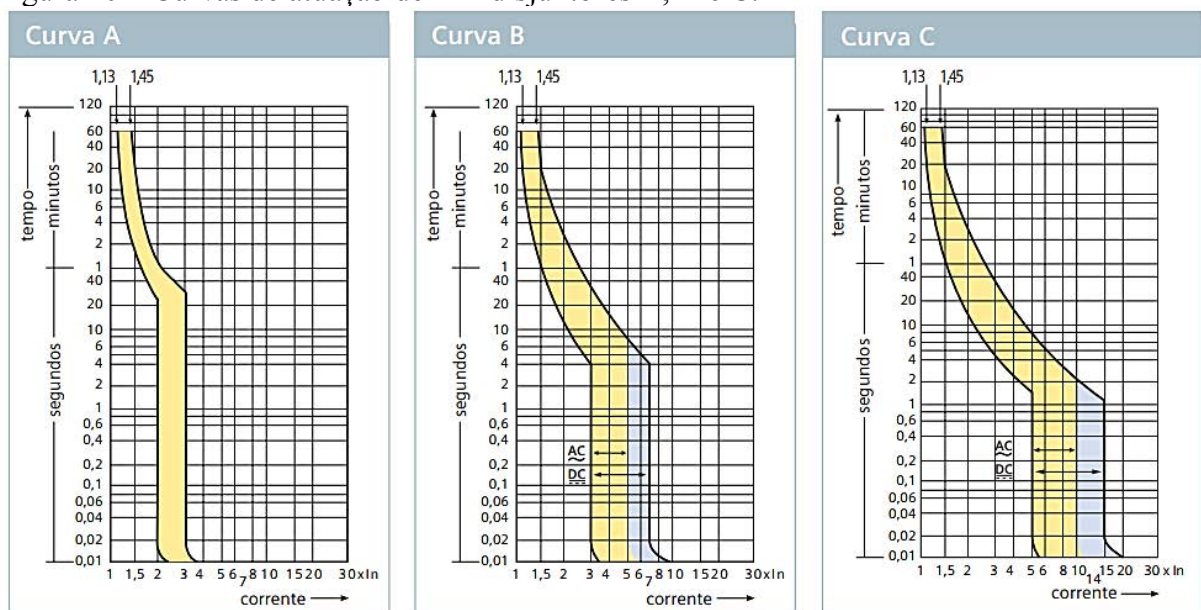
Figura 9 – Curva típica de atuação de um disjuntor termomagnético.



Fonte: Mamede Filho (2007)

Os minidisjuntores são tipicamente utilizados para proteção residencial, circuitos de iluminação, automação e dispositivos de baixa potência em ambientes industriais até aproximadamente 125 A. Vale notar que estes dispositivos possuem baixa capacidade de interrupção, em torno de 25 kA nos melhores casos, o que os tornam inviáveis para proteção de motores de baixa tensão em ambientes industriais onde o nível de curto circuito é elevado. Estes dispositivos possuem curvas de tempo *versus* corrente padronizadas, denominadas curvas A, B, C e D, e não são ajustáveis. São ilustrados na Figura 10 exemplos de curvas A, B e C.

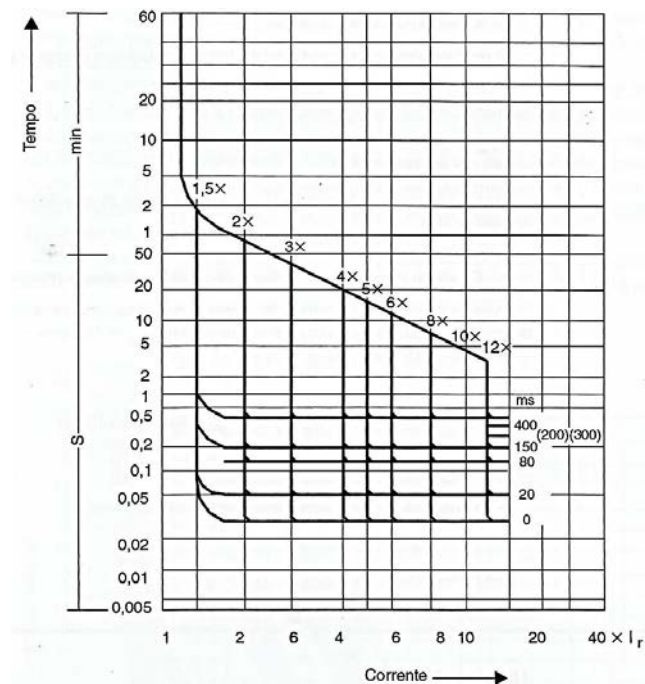
Figura 10 – Curvas de atuação de minidisjuntores A, B e C.



Fonte: Siemens (2016)

Já disjuntores de maior capacidade, como os disjuntores de caixa moldada até a faixa 2500 A e disjuntores de caixa aberta de até 6300 A, possuem grande capacidade de interrupção, até 100 kA ou mais, e, a depender do modelo, são ajustáveis tanto quanto a corrente de ação do disparador térmico como do magnético, além de tempos de operação, conforme é mostrado na Figura 11 para um disjuntor Siemens 3WN6.

Figura 11 – Curva de atuação de disjuntor de grande porte Siemens 3WN6.



Fonte: Mamede Filho (2007)

3.3.4 Disjuntor Motor

Disjuntores Motor são dispositivos similares a um minidisjuntor trifásico porém, apresentam alta capacidade de interrupção, podendo ser conectado diretamente em barramentos de centro de controle de motores, CCM, e possuem ajuste para o disparador térmico. O disparador magnético é fixo em um valor típico entre 10 e 14 vezes o valor ajustado no disparador térmico.

3.3.5 Relés de Proteção

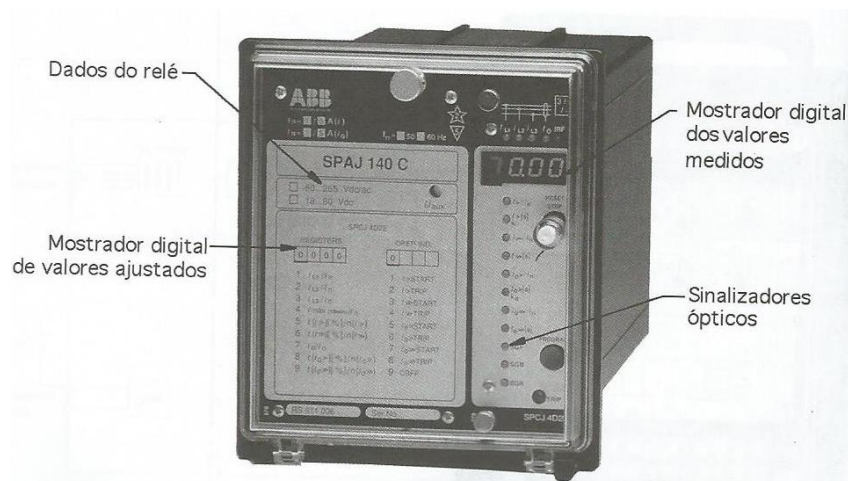
Disjuntor de baixa tensão e disjuntor motor são dispositivos onde a totalidade da corrente da carga flui internamente. Possuem poucas funções e poucos ajustes, e além disso, são

autocontrolados, ou seja, a parte de potência, que realmente comuta a carga, e a parte de comando, que realmente mede a corrente e executa o sinal para o *trip*, estão no mesmo encapsulamento.

Porém, quando se tratam de tensões elevadas, e toda a implicação de isolamento que este fato requer, utiliza-se uma parte de potência totalmente independente da parte ativa da proteção. Então, se tratando de disjuntores de média tensão, estes não possuem nenhum dispositivo capaz de mensurar e identificar quando devem atuar, apenas esperam um comando externo para manobrar, enquanto os relés de proteção são a parte onde efetivamente se realizam as medições de tensão e corrente via TPs e TCs e tomam a decisão se devem ou não enviar o comando para o disjuntor abrir a partir das funções previamente parametrizadas.

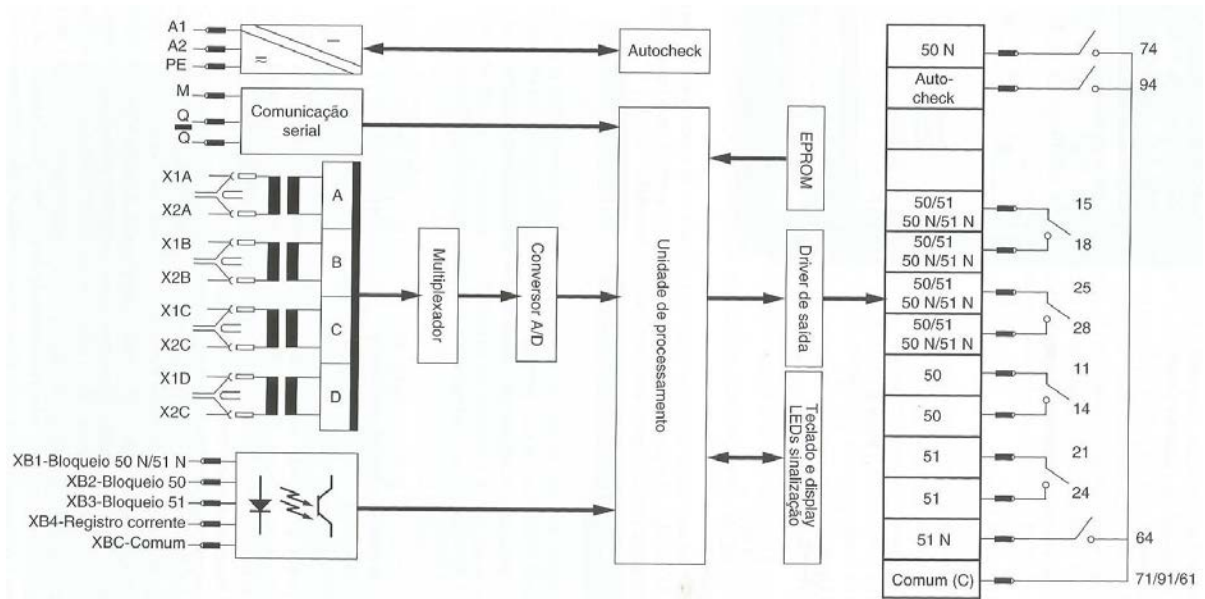
Existem diversas formas e tecnologias construtivas destes dispositivos, como relés fluidodinâmicos, eletromagnéticos, eletrodinâmicos, eletrônicos (estado sólido ou estáticos) e, por fim, desde a década de 80 vemos de forma predominante os relés digitais (MAMEDE FILHO, 2011). Além da função básica, que é a proteção, apresenta facilidades como registro das ocorrências que levaram o relé atuar, os valores de tensões e correntes anteriores e, no momento da atuação da proteção, comunicação digital via rede e outros. Um relé digital é apresentado na Figura 12. A estrutura interna típica desse dispositivo é mostrada na Figura 13.

Figura 12 – Relé digital multifunção ABB SPAJ 140C.



Fonte: Mamede Filho (2011)

Figura 13– Representação interna do blocos de um relé digital multifunção.



Fonte: Mamede Filho (2013)

Existem inúmeros modelos e fabricantes de relés de proteção, alguns para aplicações específicas, como subestação, proteção de motores, relés diferenciais, etc. Para cada aplicação, algumas funções de proteções específicas estão disponíveis. Conforme Mamede Filho (2013) os dispositivos de proteção são numerados de forma normalizada pela *American Standard Association*.- ASA. Tais nomenclaturas são listadas nos Quadros 3, 4 e 5.

Quadro 3 – Nomenclatura das funções de proteção e manobra.

Número	Função	Número	Função
1	Elemento principal	16	Reservado para futura aplicação
2	Relé de partida ou fechamento temporizado	17	Chave de derivação ou descarga
3	Relé de verificação	18	Dispositivo de aceleração ou desaceleração
4	Contactador principal	19	Contactador de transição partida-marcha
5	Dispositivo de interrupção	20	Válvula operada eletricamente
6	Disjuntor de partida	21	Relé de distância
7	Disjuntor de anodo	22	Disjuntor equalizador
8	Dispositivo de desconexão da energia de controle	23	Dispositivo de controle de temperatura
9	Dispositivo de reversão	24	Reservado para futura aplicação
10	Chave de sequência das unidades	25	Dispositivo de sincronização/conferência de sincronismo
11	Reservada para futura aplicação	26	Dispositivo térmico do equipamento
12	Dispositivo de Sobrevelocidade	27	Relé de subtensão
13	Dispositivo de rotação	28	Reservado para futura aplicação
14	Dispositivo de subvelocidade	29	Contactador de isolamento
15	Dispositivo de ajuste de velocidade ou frequência	30	Relé anunciador

Fonte: Mamede Filho (2013)

Quadro 4 – Nomenclatura das funções de proteção e manobra.

<i>Número</i>	<i>Função</i>	<i>Número</i>	<i>Função</i>
31	Dispositivo de excitação em separado	65	Regulador
32	Relé direcional de potência	66	Dispositivo de supervisão do número de partidas
33	Chave de posicionamento	67	Relé direcional de sobrecorrente em corrente alternada
34	Chave de sequência, operada por motor	68	Relé de bloqueio
35	Dispositivo para operação das escovas	69	Dispositivo de controle permissivo
36	Dispositivo de polaridade	70	Reostato eletricamente operado
37	Relés de subcorrente ou subpotência	71	Dispositivo de detecção de nível
38	Dispositivo para proteção de mancal	72	Disjuntor de corrente contínua
39	Reservado para futura aplicação	73	Contactador de resistência de carga
40	Relé de campo	74	Relé de Alarme
41	Disjuntor ou chave de campo	75	Mecanismo de mudança de posição
42	Disjuntor ou chave de operação normal	76	Relé de sobrecorrente de corrente contínua
42	Dispositivo ou seletor de transferência manual	77	Transmissor de impulsos
44	Relé de sequência de partida das unidades	78	Relé de medição ângulo/proteção falta sincron.
45	Reservado para futura aplicação	79	Relé de religamento em corrente alternada
46	Relés de reversão ou balanceamento de corrente de fase	80	Reservado para futura aplicação
47	Relé de sequência de fase de tensão	81	Relé de frequência
48	Relés de sequência incompleta	82	Relé de religamento em corrente contínua
49	Relé térmico para máquinas ou transformador	83	Relé de seleção de controle/transferência automática
50	Relé de sobrecorrente instantâneo	84	Mecanismo de proteção
51	Relés de sobrecorrente-tempo	85	Relé receptor de onda portadora ou fio piloto
52	Disjuntor e corrente alternada	86	Relé auxiliar de bloqueio de segurança
53	Relé para excitatriz ou gerador em corrente contínua	87	Relé proteção diferencial
54	Disjuntor de corrente contínua, alta velocidade	88	Motor auxiliar ou motor gerador
55	Relé de fator de potência	89	Chave seccionadora
56	Relé de aplicação de campo	90	Dispositivo de regulação
57	Dispositivo para aterramento ou curto-circuito	91	Relé direcional de tensão
58	Relé de falha de retificação	92	Relé direcional de tensão e potência
59	Relé de sobretensão	93	Contactador de variação de campo
60	Relé de balanço de tensão/queima de fusível	94	Relé de desligamento ou de livre atuação
61	Relé de balanço de corrente	95	Empregado em aplicações não definidas
62	Relé de abertura temporizada	96	Empregado em aplicações não definidas
63	Relé de pressão de nível ou de fluxo, de líquido ou gás	97	Empregado em aplicações não definidas
64	Relé de proteção de terra	98	Empregado em aplicações não definidas

Fonte: Mamede Filho (2013)

Quadro 5 – Nomenclatura complementar das funções de proteção e manobra.

<i>Código</i>	<i>Função</i>	<i>Código</i>	<i>Função</i>
21B	Relé de subimpedância: contra curto-circuitos fase-fase	62BF	Relé de proteção de falha em disjuntor
27TN	Proteção de subtensão residual de terceira harmônica	64G	Relé de sobretensão residual ou sobretensão de neutro
37P	Proteção direcional de sobrepotência ativa	64REF	Proteção diferencial de fuga à terra restrita
37Q	Proteção direcional de sobrepotência reativa	67N	Relé de sobrecorrente direcional de neutro instantâneo ou temporizado
48-51LR	Proteção contra partida longa, rotor bloqueado	67G	Relé de sobrecorrente direcional de terra instantâneo ou temporizado
49T	Supervisão de temperatura	67Q	Relé de sobrecorrente direcional de sequência negativa
50N	Sobrecorrente instantâneo de neutro	78PS	Proteção de perda de sincronismo
51N	Sobrecorrente temporizado de neutro	81L	Proteção de subfrequência
50G	Sobrecorrente instantâneo de terra	81H	Proteção de sobrefrequência
50GS	Sobrecorrente instantâneo de terra	81R	Taxa de variação de frequência (df/dt)
51G	Sobrecorrente temporizado de terra	87B	Proteção diferencial de barramento
51GS	Sobrecorrente temporizado de terra	87T	Relé diferencial de transformador
50BF	Relé de proteção contra falha de disjuntor	87L	Relé diferencial de linha
51Q	Relé de sobrecorrente temporizado de sequência negativa com tempo definido	87G	Relé diferencial de gerador
51V	Relé de sobrecorrente com restrição de tensão	87GT	Proteção diferencial do grupo gerador-transformador
51C	Relé de sobrecorrente com controle de torque	87B	Proteção diferencial de barra
59Q	Relé de sobretensão de sequência negativa	87M	Proteção diferencial de motores
59N	Relé de sobretensão residual ou sobretensão de neutro		

Fonte: Mamede Filho (2013)

4 PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

A Tabela 2 apresenta um estudo apresentado na IEEE C37.96 (2012) onde foram coletados dados de 380 falhas em 1141 motores de grande porte em ambientes industriais e comerciais e depois estratificados por componentes.

Tabela 2 – Percentual de falhas por componentes em motores elétricos.

Componente que apresentou falha	% do total de motores analisados
Mancais	43,7%
Enrolamento	25,56%
Rotor	3,4%
Eixo ou Acoplamento	5,0%
Escovas e anéis coletores	4,2%
Componentes Externos	4,7%
Não Especificado	13,4%

Fonte: IEEE C37.96 (2012)

De maneira geral, os motores elétricos são máquinas relativamente robustas, assim como os transformadores de potência e distribuição. Porém, devido a sua parte girante estes apresentam falhas mecânicas principalmente relacionadas aos mancais, como mostrado na Tabela 2. Eletricamente, o maior causador de falhas é o aquecimento excessivo, que danifica a isolamento das bobinas levando a um curto-circuito fase-fase, fase-terra ou curtos internos das espiras da bobinas. Uma estimativa geral é que, a cada 10°C acima da classe de isolamento que o estator fica submetido, sua vida útil é reduzida pela metade (MEMEDE FILHO, 2007), evidenciando a grande influência da temperatura na proteção dos motores.

4.1 REQUISITOS GERAIS DE PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

Não existe nenhuma padronização definida quanto a quais proteções utilizar para cada de motor e/ou aplicação deste. Diversas normas citam sugestões para quais funções de proteção utilizar mas, geralmente, estas variam com a aplicação, especialmente de motores de serviço crítico. Muitas vezes, a decisão de quais proteções utilizar, deve ser tomada na fase de projeto e de preferência, tal decisão deve ser tomada junto ao fabricante da máquina.

Além disso, há o fato de diversas combinações possíveis de dispositivos, como uma combinação simples de fusíveis e relé térmico, disjuntor termomagnético, ou disjuntor e relé

multifunção. Sistemas de potência também variam, por exemplo, sistemas solidamente aterrados, sistemas aterrados por resistência.

A melhor forma de se resumir as necessidades de proteções em um motor elétrico seria:

- A proteção deve permitir a partida do motor porém proteger o tempo máximo de rotor bloqueado e/ou as curvas de capacidade térmica da máquina,
- Proteção contra curto-circuito, para proteção do sistema elétrico.
- Proteção contra aquecimento excessivo, que leva a danos na isolação. Sobrecarga, subtensão, desbalanco de tensão e corrente e outros,
- Proteção contra travamento do eixo. Danos por aquecimento e danos mecânicos.

4.1.1 Requerimentos de proteção para motores de baixa tensão assíncrono.

A norma IEEE 3004.8 (2016) recomenda que o estudo das proteções de motores de baixa tensão contemple as seguintes funções mínimas:

- Proteção contra sobrecorrente de fase (49, 50, 51)
- Proteções contra sobrecorrente de terra (51N ou 50G)
- Proteção contra aquecimento do estator (49)
- Proteção contra subtensão (27)

Já a IEEE C37.96 (2012) traz as seguintes recomendações para motores de baixa tensão

- Proteção contra sobrecorrente de fase (49, 50, 51)
- Proteções contra sobrecorrente de terra (51G ou 50G)
- Proteção contra subtensão (27)

Ou seja, são os mesmos requisitos, na seção seguinte será discutido como ajustá-las e a sua importância.

4.1.2 Requerimentos de proteção para motores de média tensão assíncrono.

Se tratando de motores de média tensão assíncronos a Tabela 3 exhibe as recomendações da norma IEEE 3004.8 (2016) para uma proteção mínima, uma configuração de contator e fusível e uma aplicação crítica com acionamento por disjuntor. A norma IEEE C37.96 (2012) traz as recomendações mostradas na Tabela 4, como motores classe E1 e E2 que representa

motores de até 8000 HP em 6,9 kV acionador por contator (E1) ou contator e fusíveis (E2), além de motores de larga escala, até 3000 A em sistemas de até 13,8 kV acionador por disjuntores. (IEEE C37.96, 2012). Por fim, tem-se a recomendação de Memede Filho (2011) e de Mardegan (2010) na Tabela 5.

Tabela 3 – Sugestão da IEEE 3004.8 (2016) para proteção de motores assíncronos de MT.

Função - Proteção	Mínimo Indução	Fusível + contator	Serviço crítico disjuntor
Subtensão – 27	x	x	x
Sobretensão – 59			x
Subcorrente – 37			x
Temperatura do mancal – 38		x	x
Vibração – 39			x
Desbalanço de corrente – 46		x	x
Sequência negativa tensão – 47		x	x
Sobrecarga térmica – 49	x	x	x
Temperatura do estator – 49S	x	x	x
Sobrecorrente TOC – 51	x	x	x
Sobrecorrente IOC – 50	50 ou Fusível	Fusível	x
Falha no disjuntor – 50BF			x
Rotor bloqueado – 51LR/50LR		x	x
Sobrecorrente terra IOC – 50G	x	x	x
Sobrecorrente terra TOC – 51N	x	x	x
Falta de fase – 60			x
Quantidade de partidas – 66	x	x	x
Diferencial para motor – 87M			x
Rele de bloqueio – 86		x	x

Fonte: Adaptado de IEEE 3004.8 (2016)

Tabela 4 – Sugestão da IEEE C37.96 (2012) para proteção de motores assíncronos de MT.

Função - Proteção	Classe E1 ou E2	Grande escala
Subtensão – 27	x	x
Subvelocidade/sobrevelocidade – 12/14		x
Controle temperatura ambiente – 23		x
Temperatura do mancal – 38		x
Vibração – 39		x
Desbalanço de corrente – 46	x	x
Sequência negativa tensão – 47	x	x
Sobrecarga térmica – 49	x	x
Temperatura do estator – 49S ou 26	x	
Sobrecorrente TOC – 51	x	x
Sobrecorrente IOC – 50	50 ou fusível	
Rotor bloqueado – 51LR/50LR	x	x
Sobrecorrente terra IOC – 50G	x	x
Sobrecorrente terra TOC – 51N	x	x
Subfrequência – 81		x
Diferencial para motor – 87M		x

Fonte: Adaptado de IEEE C37.96 (2012)

Tabela 5 – Recomendações de proteções segundo Mamede Filho (2011) e Mardegan (2010) para motores MT assíncrono.

Função - Proteção	MAMEDE	MARDEGAN
Subtensão – 27	x	x
Subcorrente – 37	x	x
Temperatura do mancal – 38	x	
Desbalanço de corrente – 46	x	x
Sequência negativa tensão – 47	x	
Partida longa/sequencia incompleta – 48	x	x
Sobrecarga térmica – 49	x	x
Temperatura do estator – 49S ou 26	x	x
Sobrecorrente TOC – 51	x	
Sobrecorrente IOC – 50	x	x
Sobrecorrente terra IOC – 50G		x
Sobrecorrente terra IOC – 50N	x	
Sobrecorrente terra TOC – 51G		x
Sobrecorrente terra TOC – 51N	x	
Rotor bloqueado – 51LR/50LR		x
Sobretensão – 59	x	
Quantidade de partidas – 66	x	x
Diferencial para motor – 87M	x	x
Relé de bloqueio – 86	x	

Fonte: Adaptado de Mamede Filho (2011) e Mardegan (2010)

De forma resumida, pode-se notar que as funções presentes na maioria recomendação são a 27, 37, 38, 46, 48, 49, 49S, 51, 50 ou fusível, 50GS e 51GS, 50LR/51LR, 66 e 87M, estas funções serão descritas e detalhadas quanto a parametrização posteriormente.

4.1.3 Requerimentos de proteção para motores de média tensão síncrono.

A proteção para motores síncronos são basicamente as mesmas já discutidas para os motores assíncronos porém, alguma funções extras são requeridas, por conta do sistema de excitação ou possibilidade de perda de excitação ou perda de sincronismo.

A IEEE C37.96 (2012) recomenda as funções 55, 13, 41, 56, 40, 53 e 48, a IEEE 3004.8 (2016) recomenda as funções 32, 40, 48, 53, 55, 56, 60 e 67 e Mamede Filho (2013) recomenda as funções 40 e 78.

5. FUNCIONAMENTO E PARAMETRIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

A seguir será discutido o funcionamento e o propósito de cada função de proteção e as recomendações para parametrização.

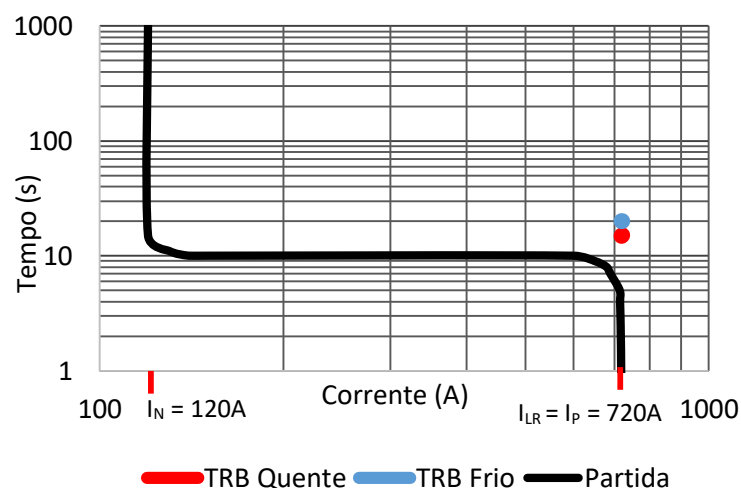
5.1 FUNÇÃO DE SOBRECARGA IMAGEM TÉRMICA (49)

A partida de um motor elétrico é um dos momentos críticos da máquina, pois a corrente envolvida é elevada, e, conseqüentemente, o aquecimento interno também é. Um dos dados relevantes para a análise da partida de um motor é o seu ponto de rotor bloqueado, que é um tempo máximo que o fabricante permite que o motor permaneça com seu eixo com velocidade zero, tal condição se aproxima bastante de um motor acelerando durante a sua partida.

Conforme IEEE 3004.8 (2016), se plotado em um gráfico de tempo *versus* corrente com o tempo de rotor bloqueado, (TRB), corrente de partida (I_P), que é a mesma corrente de rotor bloqueado (I_{LR}), e a curva de partida típica até atingir a corrente nominal do motor, teremos o resultado ilustrado na Figura 14, exemplificando um motor com corrente nominal de 120 A, TRB a quente de 15s e a frio de 20s, I_P/I_N igual a 6,0 e tempo de partida da carga com 10 s.

Esta curva é muito importante, pois reflete o tempo atual que meu motor demorar para partir, influenciado pelo tipo de carga, categoria de torque, inércia do conjunto girante e outros fatores. Daqui em diante esta curva será apresentada em todos os gráficos de proteção.

Figura 14 – Exemplo de curva de partida de um motor e seus pontos de rotor bloqueado.

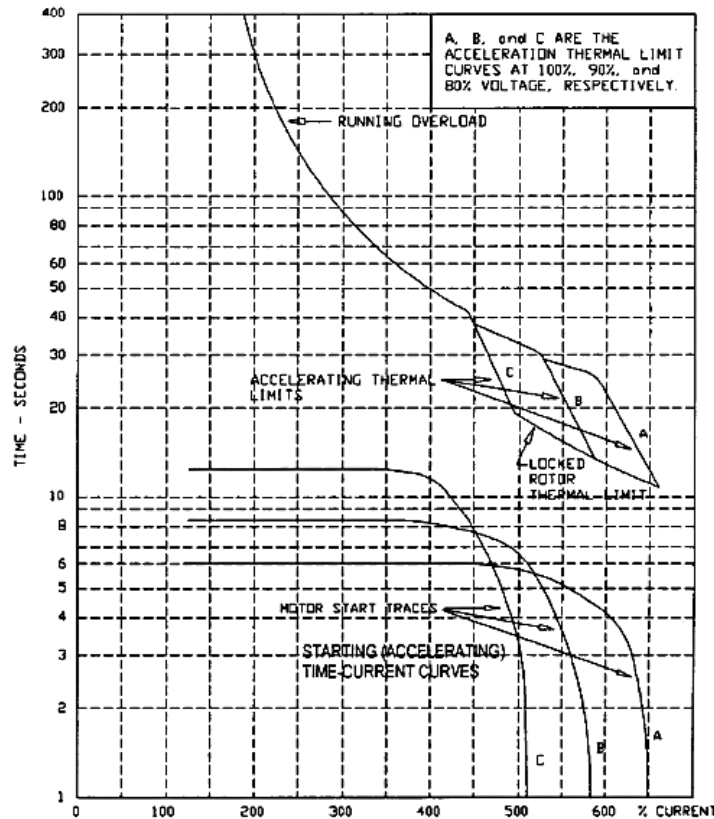


Fonte: Adaptado de IEEE 3004.8 (2016).

Uma informação mais refinada que pode ser disponibilizada pelo fabricante são as curvas de capacidade térmica da máquina em operação ou com rotor bloqueado, conforme mostrado

na figura 15, o que permite um melhor ajuste da proteção térmica do que apenas os pontos de rotor bloqueado.

Figura 15 – Exemplo de curvas de limite térmico de motores elétricos.



Fonte: IEEE C37.96 (2012)

De maneira geral, sobrecargas leves, como em torno do fator de serviço, não são tão prejudiciais para a máquina, assim como pequenos transientes de sobrecarga. O grande fator a ser levar em conta é a temperatura nos enrolamentos, se o motor apresentar ventilação deficiente, por exemplo, até o regime nominal, pode estar fazendo que a máquina exceda o limite de temperatura da classe de isolamento.

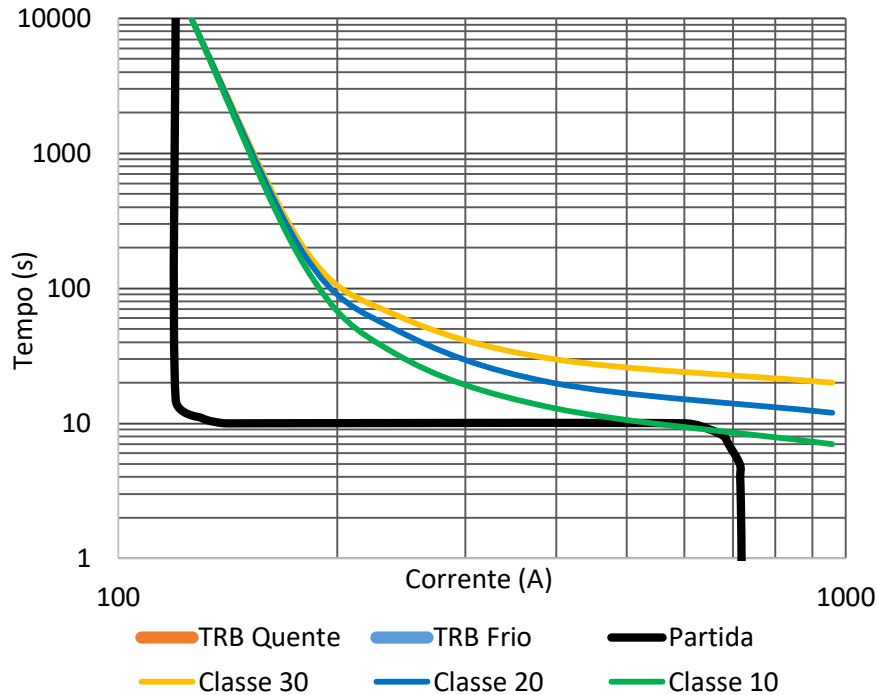
5.1.1 Função de sobrecarga imagem térmica (49) em baixa tensão

Se tratando de baixa tensão, existe uma vasta gama de proteções contra sobrecarga, como relés térmicos bimetálicos, disjuntor motor e outros que não são de imagem térmica, mas podem proteger motores contra sobrecarga, como disjuntores termomagnéticos e fusíveis apropriados.

Quando se trata de relé térmicos de sobrecarga ou de um disjuntor motor temos a curva de atuação como já mostrado na Figura 9, item 3.7.2 e item 3.7.4 combinada com a curva de partida e de rotor bloqueado conforme ilustrado na Figura 16 a seguir. Vale notar que a

recomendação é sempre de ajustar os relés térmicos ou disjuntor motor na corrente nominal do motor, no máximo em seu fator de serviço multiplicado pela corrente nominal, uma vez que o relé já possui um *pick-up* intrínseco de aproximadamente 1,05x a corrente ajustada.

Figura 16 – Proteção de sobrecarga térmica com o uso de relés térmicos de diferentes classes.



Fonte: Autor

Note que um relé térmico ou disjuntor motor deve coordenar com a curva de partida e com os pontos de rotor bloqueado, nesse quesito uma classe de partida do tipo classe 30 não atende e a classe 10 e 20 atendem, porém a curva classe 10 não permite a partida do motor, restando assim a opção de selecionar um relé térmico classe 20.

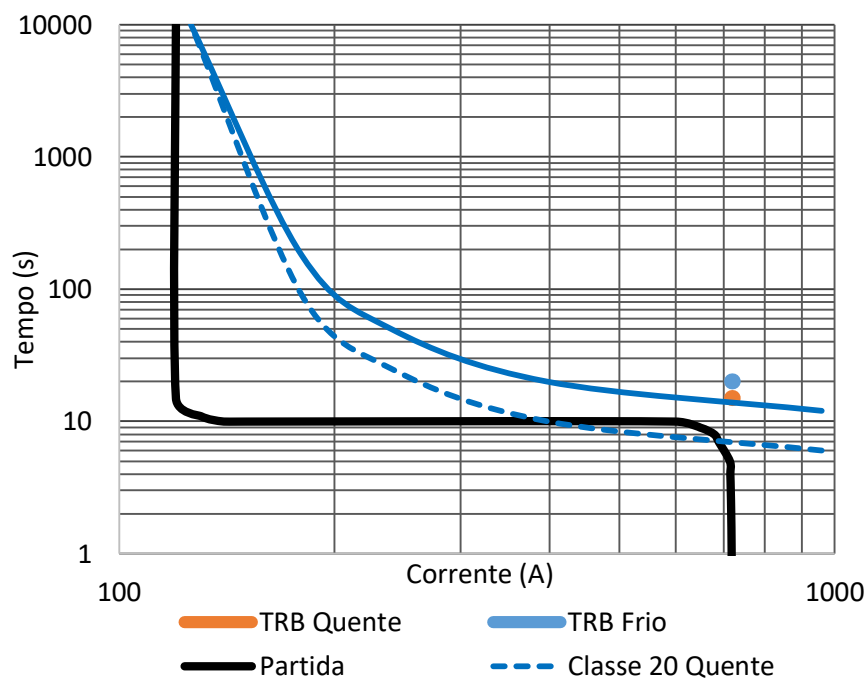
A curva de atuação dos dispositivos térmicos variam com a carga, é o chamado “estado quente” e “estado frio” do relé, nem todos os fabricantes informam as duas curvas, de posse apenas da curva a frio, esta deve proteger tanto o ponto de rotor bloqueado a frio e a quente conforme exemplo anterior.

A Figura 17 ilustra o relé térmico classe 20 exemplificado no item 3.3.2 em seu estado frio ilustra hipoteticamente o estado quente, o correto nesse caso é consultar as curvas completas do fabricante do dispositivo, mas aqui será apenas exemplificado para mostrar o efeito da redução do tempo de atuação do dispositivo em seu estado quente. Note que, no estado frio o relé térmico permite a partida do motor, porém após operação, em estado quente, ele passa a interferir em uma nova partida. Deve se ter cuidado caso o motor solicite diversas

partida em um curto intervalo de tempo, não esperando o relé resfriar e voltar ao estado frio para permitir uma nova partida. Em qualquer um dos casos esta parametrização continua protegendo o porto de rotor bloqueado, tanto a frio como a quente.

Para esse caso, o ideal seria que a curva a frio do relé ficasse abaixo do TRB a frio e acima do TRB a quente, e a curva quente ficasse abaixo do TRB a quente e acima da curva de partida, porém, os relés térmicos bimetalícos e até mesmo alguns eletrônicos dispõem de poucas possibilidade de ajustes, o que dificulta um ajuste ótimo.

Figura 17 – Proteção de sobrecarga térmica - curvas a quente e a frio de um relé bimetalíco.



Fonte: Autor

5.1.2 Função de sobrecarga imagem térmica (49) em média tensão.

Já em casos de motores de aplicação de relés digitais multifunções, a parametrização da função 49 é mais incrementada, pois o relé simula o aquecimento do motor utilizando algoritmos de modelo térmico utilizando i^2t , e para isso é necessária a constante de aquecimento da máquina. Fica definido que a constante térmica de um motor, σ_a , é o tempo que o motor leva para atingir 63,3% da temperatura máxima de operação (MAMEDE FILHO, 2013).

Com essa constante, segundo Mamede Filho (2013), um dos modelo matemático pode ser empregado para motor no estado frio, Equação (3) e curva para motor a quente Eq. (4).

$$T = 60 \times \sigma_a \times \ln \left[\frac{\left(\frac{I_a}{I_n}\right)^2}{\left(\frac{I_a}{I_n}\right)^2 - 1,1} \right] \quad (3)$$

$$T = 60 \times \sigma_a \times \ln \left[\frac{\left(\frac{I_a}{I_n}\right)^2 - 1}{\left(\frac{I_a}{I_n}\right)^2 - 1,1} \right] \quad (4)$$

Onde

I_a é a corrente atual medida pelo relé

I_n é a corrente nominal do motor ajustada

σ_a é a constante de aquecimento do motor em minutos

T é o tempo de atuação, em minutos

Existem diversas variações que podem ser feita neste modelo, a primeira delas é a constante de 1,1, que representa o valor do *pick-up*, em porcentagem da corrente nominal, ao quadrado. Alguns relés dispõem também de uma constante ajustável na curva a frio, para permitir uma coordenação correta com os pontos de TRB a frio ou curva de capacidade térmica.

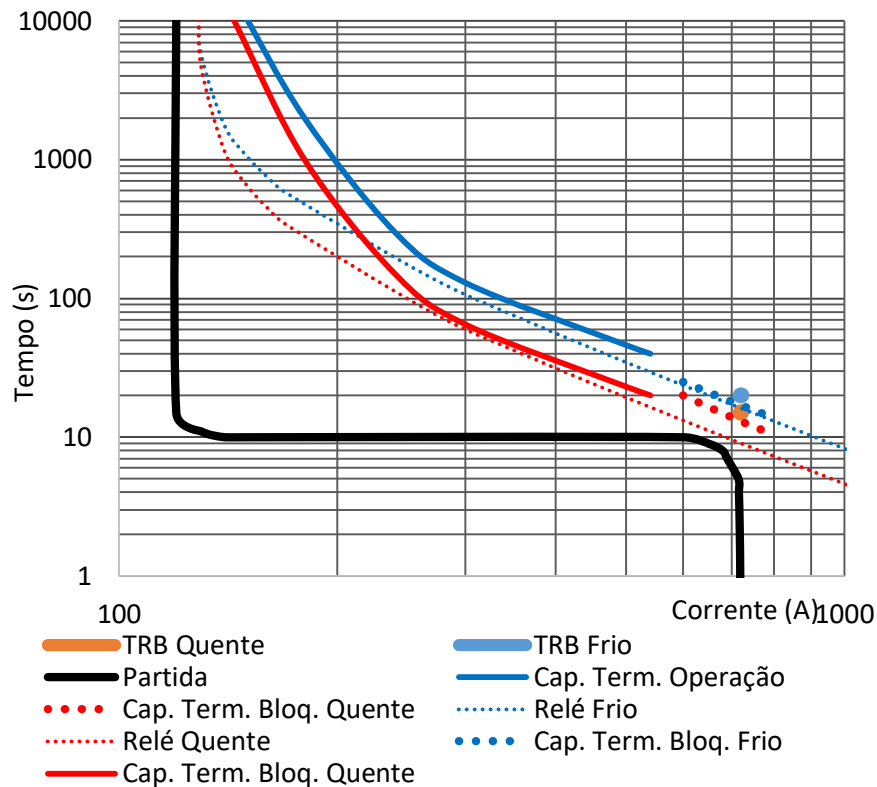
É ilustrado na Figura 18 uma configuração onde hipoteticamente foram fornecida as curvas de capacidade térmica em operação e de rotor bloqueado, adaptadas a partir da Figura 15, e onde posteriormente se ajustou a função 49 para *pick-up* 1,05 vezes a corrente nominal, que resulta no fator de 1,1 nas Equações (1) e (2). A constante térmica do motor utilizado foi de 35 minutos. A curva a frio foi modificada para poder coordenar com a curva de capacidade térmica de rotor bloqueado, logo, deve-se verificar o manual de cada modelo e fabricante de relé para se avaliar qual o modelo térmico empregado e quais ajustes possíveis.

Valores típicos de constante de aquecimento estão entre 10 e 90 minutos para máquinas de grande porte, e o fabricante deverá ser consultado para fornecer tal informação. Além disso, existe o fator de resfriamento, em alguns modelos de relé é apenas setado um valor de quantas vezes a constante que resfriamento equivale a constante de aquecimento, o que tipicamente é de 2 a 4 vezes. Essa dado é importante para o relé digital calcular quanto tempo deverá decorrer até que seja permitida uma nova partida do motor, sem que ocorra danos térmicos na máquina.

Para *pick-up* da função térmica, a IEEE 3004.8 (2016) recomenda 115% da corrente nominal, para motores com fator de serviço de 1,0, e 125% de I_N para motores com FS de 1,15. Já Mardegan (2010) recomenda um valor entre 100% e 105% de I_N . Uma atenção que deve ser

dada é que alguns modelos de relé já possuem algum valor fixo como 105% ou 110%, e nesse caso, o valor parametrizado deve compensar esta constante fixa.

Figura 18 – Proteção térmica de relés multifunção coordenada com as curvas de limite térmico da máquina.



Fonte: Autor.

5.2 FUNÇÃO DE PROTEÇÃO TÉRMICA COM SONDAS (49S)

Também chamada de 49T, esta cobre uma deficiência da função de imagem térmica da função 49, pois afinal, esta utiliza um modelo matemático para modelar o aquecimento do motor a partir de um nível de corrente e uma constante de aquecimento, ou ainda, a variação de um elemento bimetálico.

Caso ocorra, por exemplo, uma obstrução na ventilação do motor, uma elevação na temperatura ambiente, uma quebra de ventilador de refrigeração forçada e outros fatores externos a temperatura do motor irá se elevar e o modelo térmico não será afetado. Vale notar que as sondas térmica apresentam uma desvantagem, que é a sua resposta mais lenta do que o modelo térmico, devido a transferência de calor do estator para o elemento sensor, logo, a proteção via imagem térmica e via sondas se complementam.

Para contornar isto são utilizados sensores instalados internamente no estator, durante a construção do motor, para se aferir a temperatura real de sua operação. Estes elementos muitas vezes são RTD do tipo PT-100 ou NTC. Com isso, passa ser possível monitorar em tempo real a temperatura do motor, definindo por exemplo um nível de temperatura para alarme e outro para o *trip*.

A norma IEEE 3004.8 (2016) recomenda ajustar o *trip* para um valor de temperatura de 5°C a 10°C abaixo da temperatura máxima da classe de isolamento e o alarme em 10°C abaixo do valor parametrizado para trip. Já Mardegan (2010) apresenta a Tabela 6.

Tabela 6 – Temperaturas recomendadas para alarme e *trip* na função 49S

Potência	Tensão (kv)	Classe de Isolamento							
		Alarme				<i>Trip</i>			
		A	B	F	H	A	B	F	H
≤1500 HP		105	125	150	175	105	125	150	175
> 1500 HP	≤ 7	100	120	145	170	110	130	155	180
	> 7	95	115	140	160	105	125	150	170

Fonte: Mardegan (2010)

5.3 PROTEÇÃO CONTRA SUBTENSÃO (27)

Os motores elétricos são máquinas com características de potência constante, logo, com uma redução de tensão, a corrente absorvida da rede irá se elevar, e consequentemente, a corrente circulante acima da nominal irá gerar aquecimento excessivo no estator da máquina.

Para prevenir isso, se utiliza a função 27, proteção contra subtensão. Vale notar que nem sempre essa função é implementada individualmente por motor, sendo comum, por exemplo no lado secundário do transformador ou na entrada do CCM.

Tanto para Mamede Filho (2013), como Mardegan (2010) recomenda-se ajustar esta proteção para 80% da tensão nominal. A temporização tem como sugestão de Mamede Filho (2013) 1 segundo e Mardegan (2010), 2 segundos.

Deve-se atentar para o fato que, durante a partida, sempre há uma queda de tensão, e essa não deve se tornar suficientemente grande para sensibilizar o relé. Nesse caso, pode-se inibir o relé durante a partida, ou mesmo definir a temporização para uma valor próximo ao tempo de partida. (MAMEDE FILHO, 2011).

A norma IEEE 3004.8 (2016) alerta que, em casos de motores extremamente importantes, como serviços auxiliares em plantas de geração, a função 27 deve apenas emitir um alarme, não realizado o *trip*.

5.4 PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE DE FASE (50, 51 E FUSÍVEIS)

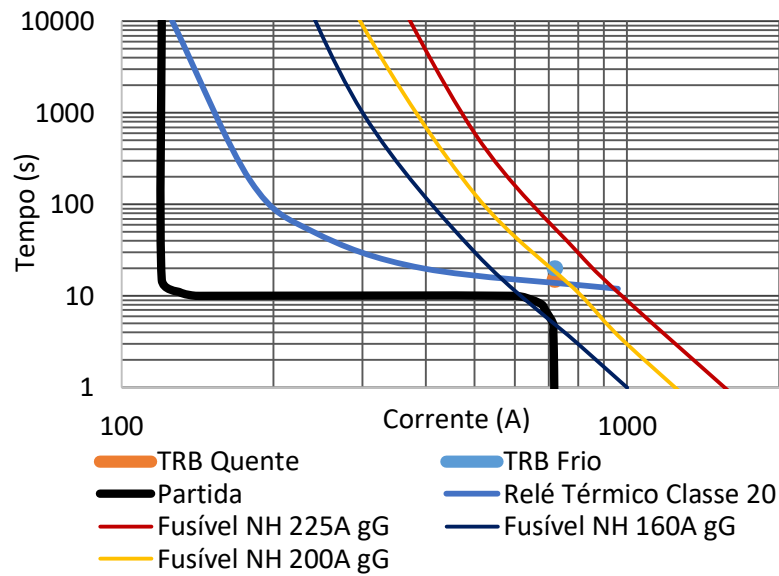
As proteções de sobrecorrente de fase tem como objetivo principal proteger a instalação elétrica, se houve um curto entre bobinas no estator o dano na máquina já foi consolidado, resta a proteção evitar danos maiores a máquina e ao sistema. Existem casos onde a função de sobrecorrente temporizada, presente, por exemplo, em disjuntores termomagnéticos ou mesmo em relés, é utilizada como substituta da função de relé térmico ou imagem térmica (49), porém não é o mais indicado.

Um dos detalhes importantes nessas proteções, mesmo não sendo o foco deste trabalho, é o fato que estas proteções devem coordenar com a curva I^2t dos cabos do alimentador do motor, além de dispositivos a montante. Tais dispositivos também devem ser avaliados quanto a capacidade de interrupção compatível com a corrente de curto circuito da instalação.

5.4.1 Proteções de sobrecorrente de fase em BT e MT com fusíveis

Para seleção de fusíveis, se utiliza a curva de tempo *versus* corrente, de modo a coordenar a curva de atuação do fusível para permitir a partida do motor, sendo o fusível selecionado com uma corrente nominal pelo menos 20% acima da corrente nominal do motor (FILIPPO FILHO; DIAS, 2014). O exemplo é ilustrado na Figura 19, onde o motor de corrente nominal de 120A parte em 10s. Note que o fusível de NH de 160A gG não permitiria a partida, já os fusíveis de 200A e 225A são uma possibilidade e atendem o critério de 20% acima da corrente nominal do motor. As curvas dos fusíveis foram extraídas de WEG (2016a)

Figura 19 – Curvas de proteção de um relé térmico bimetálico + fusível.



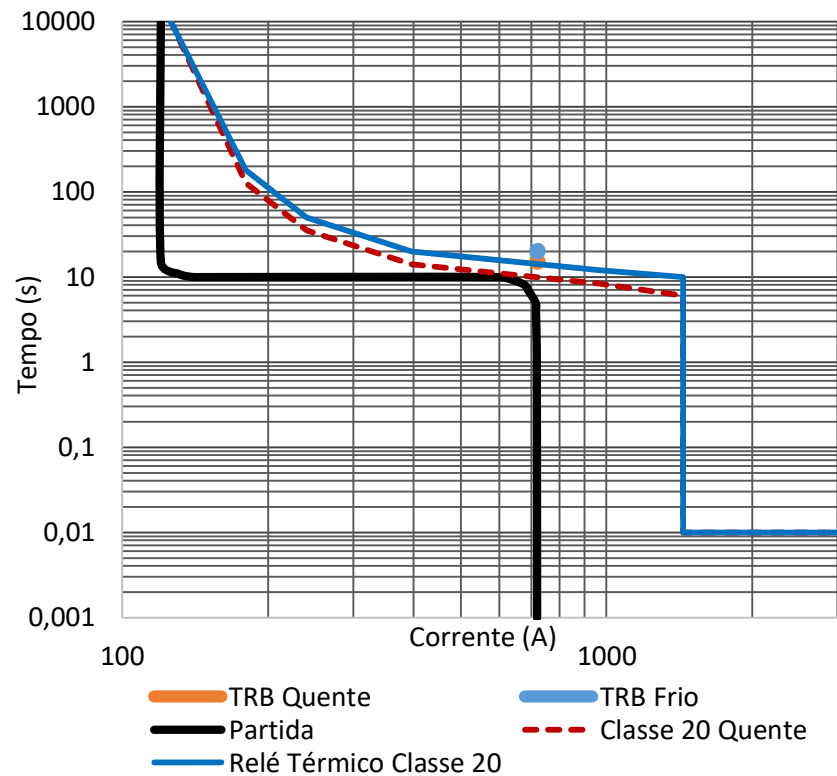
Fonte: Autor.

5.4.2 Proteções de sobrecorrente de fase em BT com disjuntor motor

Como já explicado no item 3.7.4, o disjuntor motor acumula as características de um relé térmico com um dispositivo de proteção de sobrecorrente instantânea magnética. A curva típica característica fica então como mostrado na Figura 20, onde o disjuntor motor possui uma curva de tempo inverso, conforme o item 3.3.2 e um disparador magnético hipoteticamente nesse exemplo fixo em 12x a corrente ajustada no disparador térmico, no caso a corrente nominal do motor, e a curva a quente é adotada como 30% de tempo a menos que a curva a frio nesse caso. O ideal é se obter a curva completa do dispositivo a partir de dados do fabricante.

O disparador magnético possui alta velocidade de atuação, com uma curva de tempo definido extremamente baixo, sendo praticamente uma atuação instantânea, dependendo apenas de fatores mecânicos da atuação do mecanismo. Como já citado, vale um estudo mais detalhado para averiguar se essa proteção efetivamente protege os cabos alimentadores do motor em caso de curto-circuito.

Figura 20 – Exemplo de proteção de motor com disjuntor motor.



Fonte: Autor

5.4.3 Proteções de sobrecorrente de fase em BT com disjuntor termomagnético

Os disjuntores termomagnéticos apresentam uma faixa de atuação de tempo inverso e outra de tempo definido, ao contrário dos disjuntores motor, não variam sua curva de tempo inverso em função da corrente de operação, criando a curva a frio e a quente. De forma, geral os disjuntores termomagnéticos não são a melhor proteção a serem empregadas em motores.

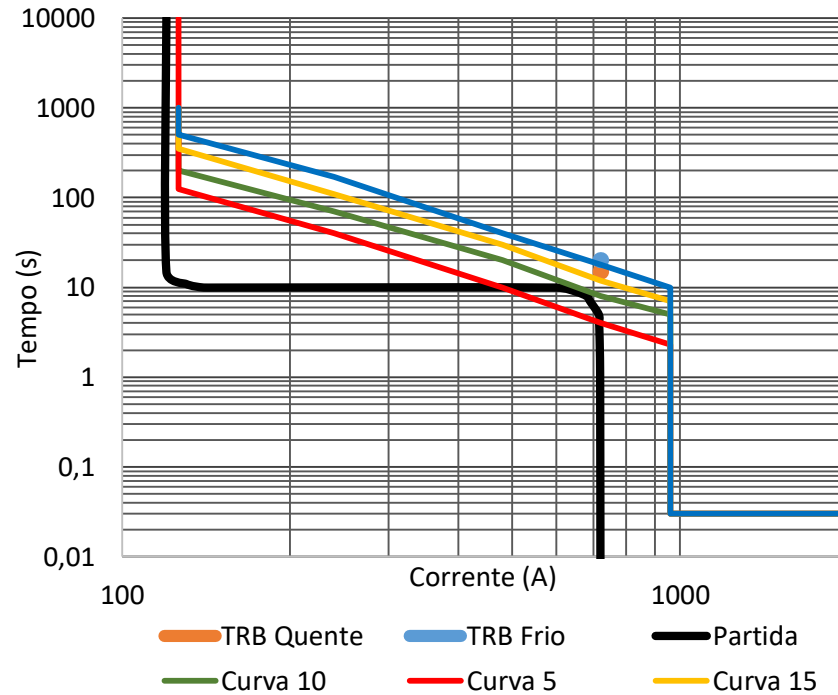
Porém, com a evolução tecnológica, surgiam disjuntores de caixa moldada com disparadores eletrônicos, podendo prover, assim, a ação da imagem térmica do motor e diversas curvas de tempo inverso e tempo definido ajustáveis, permitindo sua utilização.

A curva de tempo inverso deve proteger o ponto de rotor bloqueado e permitir a partida (IEEE C37.96, 2012) e a proteção de tempo definido, ou unidade instantânea, deve ser superior a corrente do rotor bloqueado e inferior a corrente simétrica de curto-circuito. (MAMEDE FILHO, 2011), ou ainda, deve estar entre 800% e 1100% da corrente nominal segundo a IEEE 3004.8 (2016).

Um exemplo é mostrado na Figura 21, onde um disjuntor 3VL Siemens (SIEMENS, 2013) teve o *pick-up* ajustado em 1,05x a corrente nominal do motor, o disparo da unidade

magnética foi ajustada em 800% a nominal ($8 \times 120 \text{ A} = 960 \text{ A}$) e as possibilidades de ajuste do tempo da curva inversa é mostrada como curva 1, 2, 3 e 4. Note que apenas a curva 15 permite o motor partir e ao mesmo tempo protege o ponto de rotor bloqueado.

Figura 21 – Exemplo de curvas de proteção em disjuntores termomagnéticos do tipo caixa moldada.



Fonte: Autor.

5.4.4 Proteções de sobrecorrente de fase em BT e MT com relés multifunções.

Os ajustes de sobrecorrente de fase de tempo inverso (51), para os relés multifunções, são as mesmas já apresentadas na seção de disjuntores termomagnéticos, a grande diferença entre as curvas de um disjuntor termomagnético e as de um relé multifunção fica por conta da grande variedade de curvas e parametrizações disponíveis. As curvas inversas mais comuns são as: Inversa, Muito inversa, Extremamente inversa, Inversa longa, Inversa curta.

Estas curvas são definidas pelas Equação (5) e os fatores, para cada tipo de curva, são mostrados na Tabela 7 (MAMEDE FILHO, 2011). A Figura 22 mostra alguns exemplos destas quando traçadas com T_{ms} igual a 0,6.

$$T = \frac{\alpha}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\beta} - 1} \times T_{ms} \quad (5)$$

Onde:

I é a corrente atual medida pelo relé

I_s é a corrente nominal do motor ajustada

α e β são constantes da Tabela 3.

T_{ms} é a constante de tempo ajustada no relé

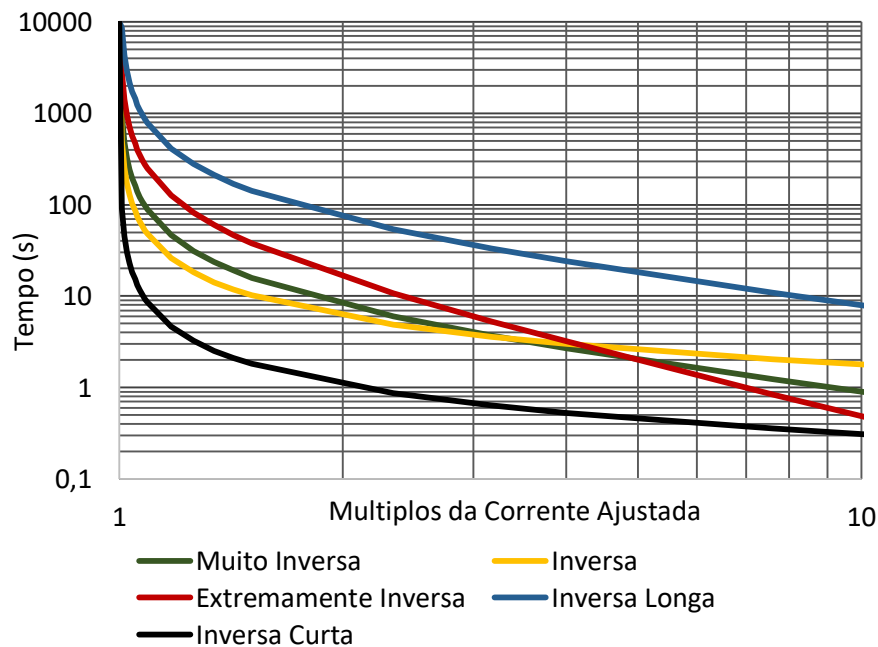
T é o tempo em segundos para a atuação do relé

Tabela 7 – Fatores α e β conforme o tipo de curva da função 51

Curva	α	β
Curva Inversa	0,14	0,02
Curva Muito Inversa	13,5	1
Curva Extremamente Inversa	80	2
Curva Inversa Longa	120	1
Curva Inversa Curta	0,05	0,04

Fonte: Adaptado de Mamede Filho (2011)

Figura 22 – Exemplo de curvas da função 51 traçadas conforme equação 5 e $T_{ms} = 0,6$.



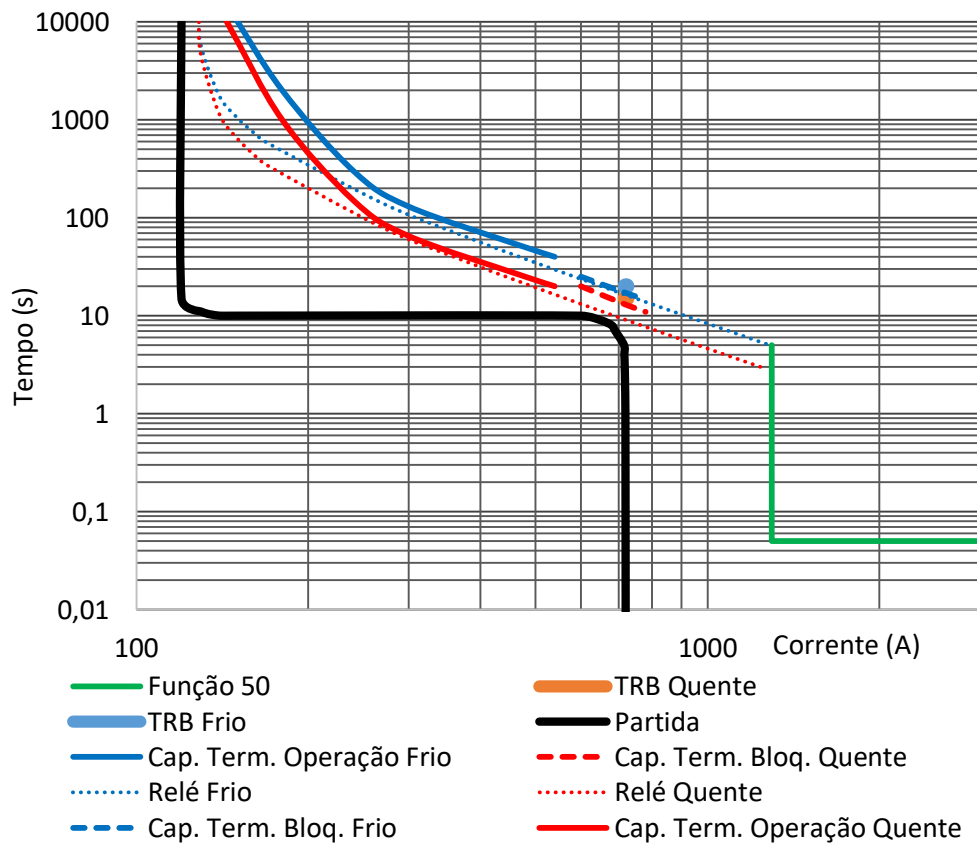
Fonte: Autor.

Por fim, temos a função de tempo definido (50), ou instantâneo, e, para sua parametrização, pode ser levado em conta as sugestões de ajustes já citados na seção de disjuntores termomagnéticos. Porém, a norma IEEE 3004.8 (2016) também recomenda que a

função 50 seja ajustada em um valor de 1,6 a 2 vezes a corrente de partida do motor em sistemas de média tensão. A IEEE C37.96 (2012) recomenda o valor de 1,65 a 2,5 vezes a corrente nominal da máquina.

Vale novamente aqui o comentário que esta função deve proteger o cabo alimentador do motor e coordenar com os dispositivos a montante do sistema. É ilustrado na Figura 23 a função 50 em conjunto com a proteção térmica (49) em aplicações com disjuntores de média tensão. A utilização da curva temporizada (51) muitas vezes é dispensada, utilizando-se apenas a proteção térmica (49) em conjunto com a proteção de tempo definido (ou instantânea), 50

Figura 23 – Exemplo de curvas de proteção com relé multifunção - funções 49, 50 e curvas de capacidade térmica da máquina.



Fonte: Autor.

Vale ressaltar que, quando o motor é acionado por um contator, a função 50 não deve ser utilizada, pois em caso de um curto circuito pleno a corrente de curto-circuito pode exceder a capacidade de interrupção do contator. Nesse caso, deve-se deixar que fusíveis tomem a posição da função 50.

5.5 PROTEÇÃO DE TEMPERATURA DE MANCAIS (38)

Uma falha não tão incomum é o travamento dos rolamentos por deficiência de lubrificação e esta pode ter como uma das causas o aquecimento excessivo da graxa, levando a sua deterioração e perda de função. Em mancais de casquilho o aquecimento excessivo também é prejudicial.

Um travamento repentino do eixo é facilmente detectado pela função 49 e de forma melhor ainda pela função 50LR/51LR. Porém, antecipar uma possível falha dessa magnitude é altamente recomendável, pois evita altos surtos de corrente, stress na isolação, esforços mecânicos nas bobinas e pode se mostrar mais vantajoso uma parada de produção do que o reparo de grandes rolamentos ou mancais de casquilho.

A norma IEEE 3004.8 (2016) recomenda que a temperatura de alarme seja ajustada em 90°C e a de *trip* para 100°C, no caso de lubrificantes sintéticos alarme em 120°C e *trip* em 130°C. De toda forma a melhor recomendação é consultar o fabricantes para avaliar o melhor valor de temperatura a ser parametrizada, já que ela varia em função da especificação de lubrificantes utilizado.

5.6 PROTEÇÃO CONTRA DESBALANÇO DE CORRENTE DE FASE (46)

Segundo Mamede Filho (2007), quando um motor absorve correntes desequilibradas em suas fases, surge um conjugado oposto ao conjugado do motor, ou seja, com tendência de frenagem. Este campo girante no sentido inverso do motor possui o dobro da frequência elétrica da rede e induz altas correntes no rotor, levando-o a um aquecimento acima do normal e danificando o rotor.

A grande dificuldade é que relés de imagem térmica não identificariam esta anomalia, nem as sondas de temperatura, localizadas no estator, que não é afetado de forma imediata por este aquecimento mas após certo período, a grande temperatura do rotor eventualmente iria danificar a isolação do estator.

A função 46 tem a função então de monitorar a corrente nas três fases e comparar o desequilíbrio entre elas. Esse desequilíbrio pode ser expresso em valor de corrente mesmo ou em termos de porcentagem, a depender do modelo do relé e/ou fabricante. Este tipo de proteção pode, por exemplo, detectar falha de curto entre espiras de uma mesma bobina.

A corrente de desequilíbrio pode, segundo Mamede Filho (2013), ser encontrada a partir da Equação (6) e o percentual de desequilíbrio na Eq. (7).

$$I_d = \frac{I_{FA} - I_{FB}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

$$I_{\%} = \frac{I_d}{I_N} \quad (\%) \quad (7)$$

Onde:

I_{FA} e I_{FB} são as correntes da fase A e da fase B

I_d é a corrente de desequilíbrio, em amperes

I_N é a corrente nominal do motor

$I_{\%}$ é a porcentagem de desequilíbrio de corrente

A norma IEEE 3004.8 (2016) recomenda que seja ajustado um *trip* para 15% de corrente de desbalanço com *delay* de 10 segundos. Mardegan (2010) recomenda que a corrente de desequilíbrio seja ajustada em 15% da corrente nominal do motor, ou em 25% de desequilíbrio, com temporização de 3,5 s. Mamede Filho (2013) recomenda um ajuste de 20% de desequilíbrio, com temporização igual ao tempo de partida somado a 1,5 s, caso a função 46 seja do tipo tempo definido ou para caso de tempo inverso, 10% de desequilíbrio e a temporização equivalente a soma do tempo de partida do motor com 0,3 s.

Vale a nota que, durante a partida do motor, transientes podem ocorrer, principalmente devido ao afundamento da tensão, gerando desbalanços que podem sensibilizar a proteção. Outra observação é que um caso extremo de desequilíbrio seria a perda de uma fase, por exemplo, devido a queima de um fusível. Nesse caso a corrente nas fases restantes se elevam em 57,7% (MAMEDE FILHO, 2007) e, caso o relé possua mais de uma atuação para a função 46, pode ser ajustado um segundo patamar em torno desse desequilíbrio, por exemplo, e com uma temporização bem reduzida, em torno de 3 s.

A norma IEEE 3004.8 (2016) recomenda que a função 46 seja utilizada em motores acima de 750 kW, abaixo desse valor deve ser avaliado a necessidade. Em motores críticos, como chiller, ventiladores, compressores, a presença deste proteção deve ser considerada.

5.7 PROTEÇÃO DE QUANTIDADE DE PARTIDAS (66)

Como já citado anteriormente, a partida é um momento de alta requisição do motor, tanto mecanicamente como termicamente. Uma das especificações de projeto dos motores é justamente a quantidade de partidas consecutivas permitidas, ou ainda, quantidade de partida por hora. A grande maioria de motores de média tensão apresenta no máximo duas partidas a

frio e uma a quente, em alguns casos, três partidas a frio e duas a quente. Nesse caso, a parametrização do relé deve ser conforme a especificação do motor.

5.8 PROTEÇÃO DE SUBCORRENTE (37)

A proteção de subcorrente tem como função identificar a perda de carga do motor, por exemplo, por uma falha de acoplamento, falha de redutor, quebra de eixo e outros problemas relacionados ao sistema mecânico ou processo produtivo. Mamede Filho (2013) recomenda um ajuste de tal modo que a corrente esteja entre 10% acima da corrente do motor a vazio e abaixo do valor de 70% da corrente de operação típica com a carga instalada. A temporização sugerida é de 1s.

5.9 PROTEÇÃO DE SEQUÊNCIA INCOMPLETA (48)

Como discutido anteriormente, a função 49 com a sua curva fria deve proteger o ponto de rotor bloqueado a frio, ou melhor ainda, a curva de capacidade térmica. Porém, algumas vezes essa coordenação não é possível, e mesmo sendo possível, o stress no motor é elevado. A função 48 pode detectar um rotor bloqueado ou excesso de carga na partida sem ter que aguardar o tempo até alcançar a curva da função 49.

Tipicamente, a função 48 é uma proteção de tempo definido, que detecta a mudança de estado de corrente do valor zero para um alto valor de corrente, identificando assim o início de uma partida. Sua temporização é ajustado 2 s acima do tempo de partida típico da instalação e abaixo dos pontos de rotor bloqueado, com um ajuste de corrente igual a 2,5 vezes a corrente nominal do motor (MAMEDE FILHO, 2013)

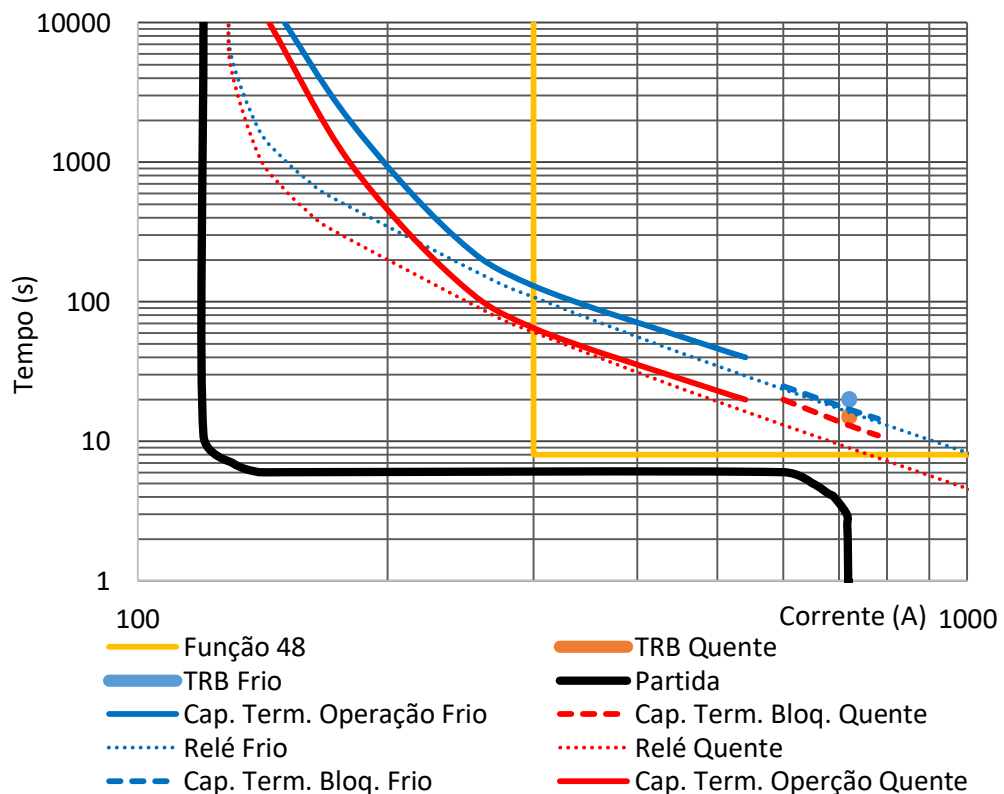
Mardegan (2010) recomenda algo bastante próximo, com corrente entre 1,5 e 2 vezes a corrente nominal e temporização 10% acima do tempo típico de partida e abaixo do tempo de roto bloqueado.

A Figura 24 ilustra um motor ainda com os pontos de rotor bloqueado de 15 e 20 segundos (quente e frio), mas com uma partida típica de apenas 6 segundos e a função 48 parametrizada para 2,5 vezes a corrente nominal e temporização de 8 s.

Note que, caso o rotor realmente esteja bloqueado a função 48 atuará em 8 s, enquanto a curva fria da função 49 iria levar aproximadamente 16 s (TRB a frio é 20s) e a curva quente 9 s (TRB quente é 15s).

No caso de uma dificuldade de partida, por exemplo, por um não fechamento de válvula de recalque de bomba ou de um *dumper* de ventilador ou bomba de vácuo afogada com água de selagem, a função 48 antecipa e muito a atuação, supondo que o motor esteja acelerando lentamente próximo a uma corrente de 400 A (3,3 vezes a nominal) a função 48 atuará em 8 s. Já a curva fria da função levaria 108 s e quente 60 s, de qualquer modo as curvas de capacidade térmica ainda estariam protegidas, mas o stress gerado definitivamente é menor.

Figura 24 – Exemplo de aplicação da função 48 em conjunto com a 49.



Fonte: Autor

5.10 PROTEÇÃO CONTRA TRAVAMENTO EM OPERAÇÃO (50LR/51LR)

Diferente da função 48, a função 50LR ou 51LR visa proteger o motor de um travamento durante sua operação, uma vez que a função 48 tem a função de monitorar a sequência partida. Sua atuação pode ser do tipo tempo inverso ou tempo definido.

A única recomendação, segundo a IEEE 3004.8 (2016), é que esta deve ser parametrizada de modo a atuar abaixo da corrente esperada de rotor bloqueado e com uma temporização de modo a proteger as curvas térmicas da máquina. Mardegan (2010) recomenda um valor de corrente entre 1,5 e 2,0 vezes a corrente nominal da máquina e uma temporização de 2 s e

Mamede Filho (2013) recomenda o valor de corrente de 2,5 vezes a corrente nominal e temporização entre 0,5 s e 1,0 s

5.11 PROTEÇÃO CONTRA FALTA A TERRA (50N, 50G, 51N, 51G, FUSÍVEIS)

5.11.1 Proteção contra falta a terra em baixa tensão

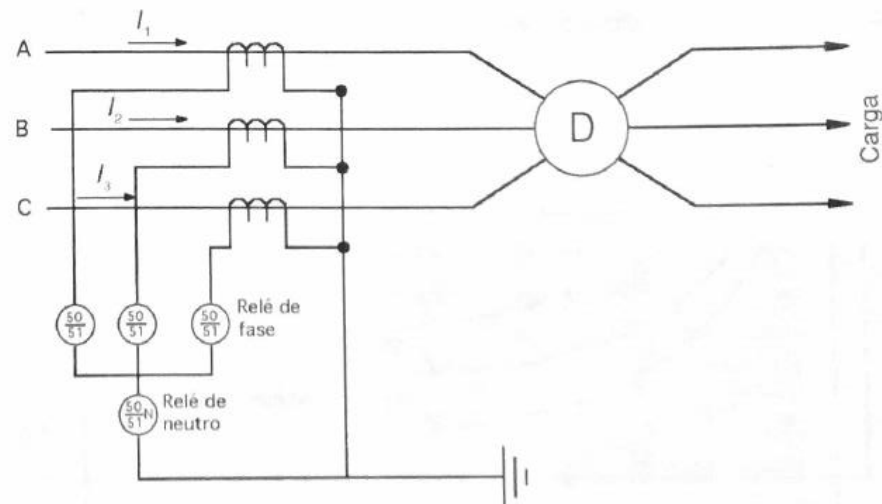
Tipicamente, os sistemas de baixa tensão são do tipo de solidamente aterrados, logo a corrente de curto-circuito fase-terra é elevado o suficiente para sensibilizar as proteções previamente selecionadas na seção fase-fase, como por exemplo os fusíveis, disjuntor motor e disjuntores termomagnéticos.

5.11.2 Proteção contra falta a terra em média tensão

Quando se utiliza relés multifunções tem-se duas possibilidades para a detecção de faltas a terra, a primeira dela é a ligação residual entres os três TC de fase, conforme ilustrado na Figura 25, que é chamada de 50N/51N.

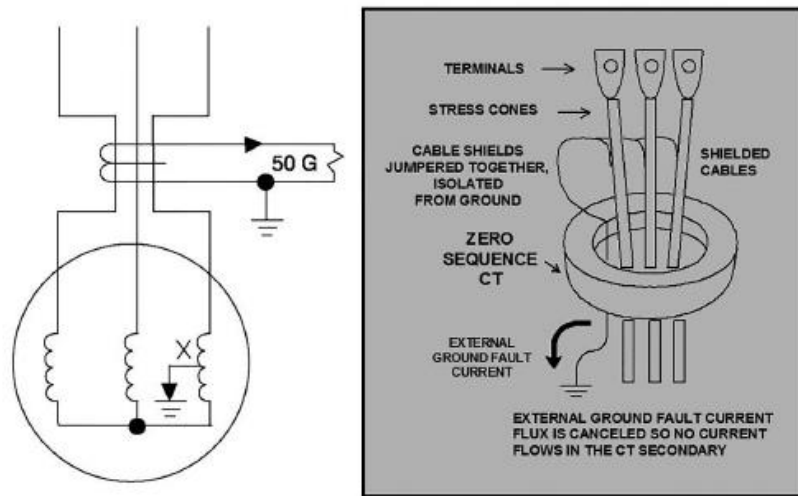
Outra possibilidade é o TC de sequência zero (50G/51G), mostrado na Figura 26, onde as três fases passam pelo interior do mesmo TC, então a soma de corrente é nula, caso haja uma falta a terra haverá um desequilíbrio que poderá ser mensurado. Este esquema é o mais utilizado, pois a ligação residual em motores pode levar a falsas medições, devido a altas correntes de partida que podem saturar os TC de forma desigual (IEEE 3004.8, 2016)

Figura 25 – Esquema de ligação dos TCs para proteção a neutro residual (50N/51N).



Fonte: Mamede Filho (2011)

Figura 26 – Esquema de ligação para transformador de sequência zero, ou TC de janela, para função 50G/51G.



Fonte: IEEE 3004.8 (2016)

Mamede Filho (2013) recomenda um ajuste de corrente para a proteção 50G de 10% da corrente de curto-circuito fase-terra da instalação, com uma temporização de 0,1 s. A norma IEEE 3004.8 (2016) recomenda que, em sistemas com baixa impedância de aterramento seja ajustado uma corrente entre 5% e 10% da corrente de curto-circuito fase-terra.

A norma IEEE C37.96 (2012) cita que é comum ajustes bem sensíveis para esta proteção, em torno de 5 A a 12 A, uma vez que a configuração com TC de sequência zero é imune a transitórios, logo, a temporização recomendada é de 2 a 3 ciclos da rede, para evitar que um fechamento assimétrico do contator ou disjuntor, por exemplo, sensibilize esta proteção.

Mardegan (2010) também cita a parametrização da função 50G com o valor de corrente entre 15 A a 20 A ou 20% da corrente nominal do motor, com temporização 400 ms, caso o dispositivo seja um contator ou instantâneo, caso seja um disjuntor. Se o sistema for aterrado por uma impedância, o ajuste de corrente deve ser de até 10% da corrente máxima limitada

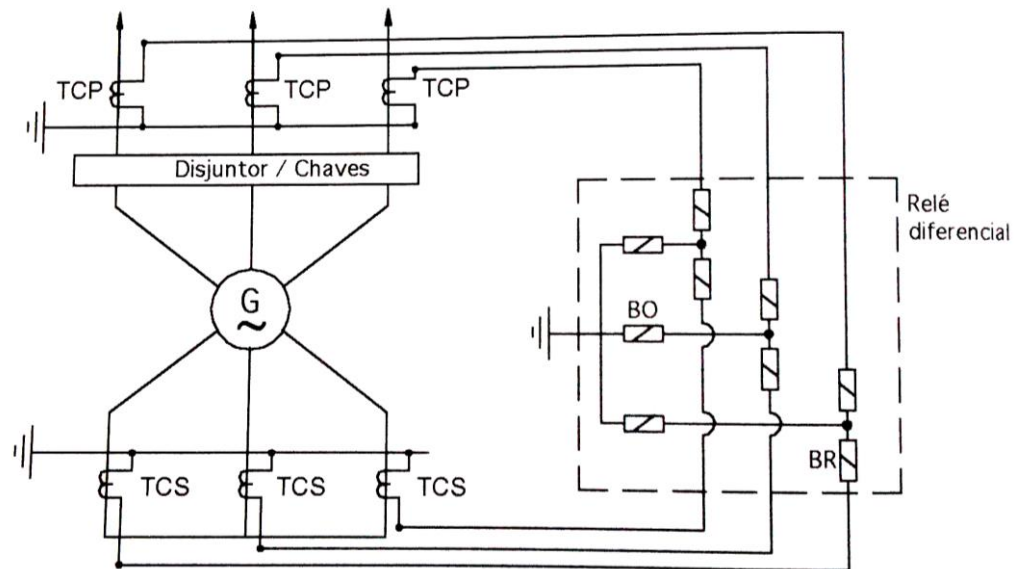
Vale notar que, caso o sistema elétrico seja com neutro solidamente aterrado, deve evitar que o contator seja manobrado para eliminar a falta a terra, pelo mesmo motivo já explicado para curtos fase-fase, que é a baixa capacidade de interrupção. Nesse caso deve deixar os fusíveis eliminarem a falta a terra. Não é usual utilizar curva de tempo inverso (51N ou 51G), sendo satisfatório uma função de tempo definido com boa sensibilidade.

5.12 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE CORRENTE PARA MOTORES (87M)

A função de proteção diferencial de corrente é uma filosofia mais apurada de proteção contra algumas avarias internas, geralmente é aplicada em geradores. Porém, a norma IEEE 3004.8 (2016) recomenda utilizá-la em motores acima de 750 kW em sistemas sem aterramento e em motores acima de 1900 kW. A grande vantagem é que por ser mais sensível esta pode limitar os danos de um curto interno entre bobinas a um nível onde custo de reparo seja menor. Outro grande benefício é que esta proteção não é sensível às altas correntes durante a partida (MAMEDE FILHO, 2013)

A Figura 27 ilustra a configuração para implementação desta proteção. Note que, pelo menos seis terminais devem estar disponíveis para que seja possível implementar a função 87M. Quanto à parametrização, a norma IEEE C37.96 (2012) recomenda uma inclinação de 10%, podendo chegar até 25%, corrente entre 10% e 20% da corrente nominal do motor e temporização de 0,1 s. Mamede Filho (2013) descreve como um ajuste típico inclinação de 50%, corrente entre 5% e 15% da nominal e temporização nula (instantânea).

Figura 27 – Ligação dos TCs para a proteção 87M.



Fonte: Mamede Filho (2011)

5.13 PROTEÇÕES PARA MOTORES SÍNCRONOS

Para motores síncronos todas as proteções até agora citadas podem e devem ser utilizadas, porém, devido à sua construção diferenciada, principalmente devido à presença de um

enrolamento no rotor e em alguns modelos, barras em curto-circuito para auxílio de partida, devem ser utilizadas mais algumas funções para a total proteção desta máquina.

5.13.1 Relé de campo (40)

Relés de campo ou relé de subexcitação tem a função de monitorar a redução ou perda de excitação da máquina síncrona, o que causa uma imediata variação do fluxo de energia reativa e de impedância da máquina. Esta proteção também pode detectar o *pullout* do motor em casos de sobrecarga. (IEEE C37.96, 2012)

5.13.2 Relé de fator de potência (55)

De maneira similar a função 40, a função 55 tem um valor determinado de fator de potência e um temporizador, podendo, assim, detectar anomalias no sistema de excitação da máquina, como subreexcitação, subexcitação, queima de bobinas da excitatriz, falha nos diodos em sistemas *brushless* e outros. (IEEE C37.96, 2012)

5.13.3 Relé de aplicação de campo (56)

Este relé controla a aplicação da excitação do motor, é um relé de frequência que determina quando o motor está a 1% a 5% da velocidade síncrona e em conjunto com um relé temporizador aplica o campo ao motor fechando o contator de campo. (IEEE C37.96, 2012)

5.13.4 Relé direcional de potência (32)

Esta função tem a capacidade de monitorar o fluxo de potência. Como é conhecido, uma máquina síncrona quando perde a excitação se torna uma carga fortemente capacitiva, logo, com essa função é possível definir um valor de potência reativa máxima e uma temporização, para evitar que na partida esta seja sensibilizada, uma vez que somente quando o motor atinge uma velocidade bem próxima de sua velocidade síncrona e a excitação é aplicada.

6. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

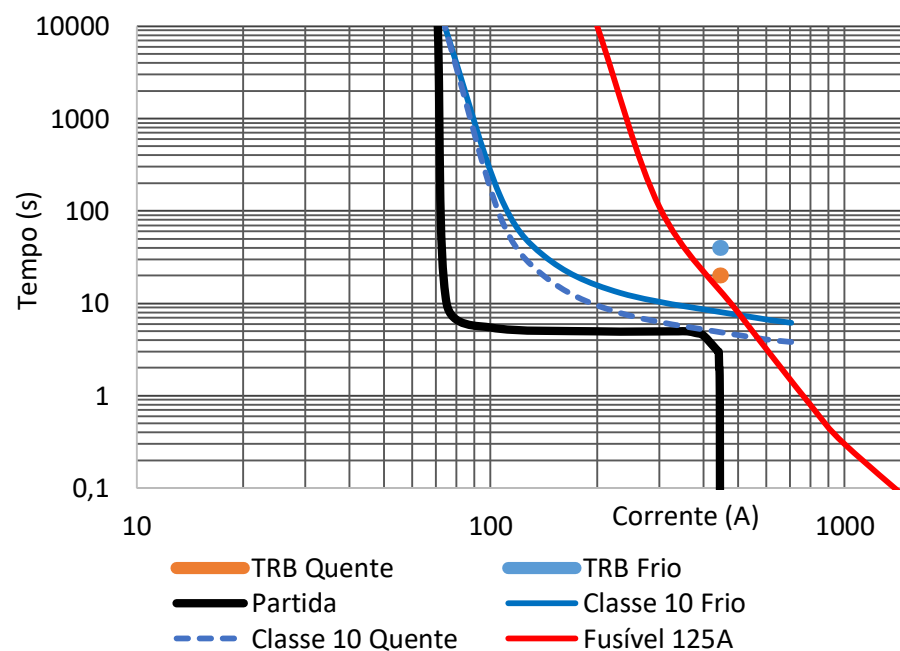
6.1 MOTOR DE BAIXA TENSÃO – FUSÍVEL E RELÉ TÉMICO

Para o motor especificado abaixo, assíncrono, do tipo gaiola de esquilo, IR3 serão especificadas as proteções seguindo o procedimentos e recomendações descritos no item 4 e 5 deste trabalho, em um sistema com neutro solidamente aterrado e corrente de curto circuito de 50 kA.

- Potência Nominal/Polos: 50 CV / 4P
- Corrente Nominal (380V) 70,8 A
- I_p/I_n : 6,3
- TRB (Frio/quente): 40 s / 20 s
- Partida típica da instalação: 5 s

Foi selecionado então, conforme ilustrado na Figura 28, um fusível de 125 A do tipo NH gG/gL (WEG, 2016a), relé de sobrecarga térmico do tipo classe 10, com redução de tempo de suposto de 40% a quente, e que dentro da sua faixa de ajuste esteja presente a corrente nominal do motor, de preferência no centro da escala. Um exemplo seria um relé ajustável de 57 A a 75 A, ajustado para 70,8 A. Nesse caso os próprios fusíveis protegem em caso de uma falta a terra, e a proteção de fase está muito abaixo da corrente de curto-circuito do sistema.

Figura 28 – Curvas de proteção propostas para o exemplo 6.1.



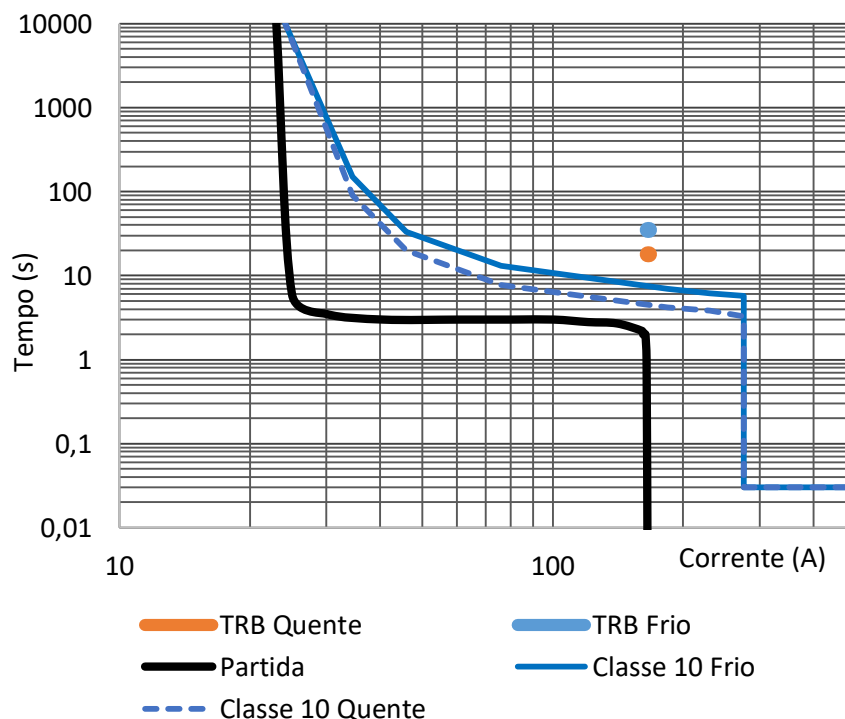
6.2 MOTOR DE BAIXA TENSÃO – DISJUNTOR MOTOR

Para o motor especificado abaixo, assíncrono, do tipo gaiola de esquilo, IR3 serão especificadas as proteções seguindo o procedimentos e recomendações descritos no item 4 e 5 deste trabalho, em um sistema com neutro solidamente aterrado e corrente de curto circuito de 50 kA.

- Potência Nominal/Polos: 15 CV / 6P
- Corrente Nominal (380V): 23 A
- I_p/I_n : 7,2
- TRB (Frio/quente): 35 s / 18 s
- Partida típica da instalação: 3 s

O resultado da configuração de proteção proposta é mostrado na Figura 29, com um disjuntor motor classe 10, com disparo magnético fixo em 12 vezes a corrente ajustada no disparador térmico, que no caso são os 23A nominais da máquina. Como pode-se notar, a proteção proposta protege os pontos de rotor bloqueado e ao mesmo tempo permite a partida do motor, além de oferecer proteção contra curto entre fases e fase-neutro.

Figura 29 – Curvas de proteção propostas para o exemplo 6.2.



Fonte: Autor.

6.3 MOTOR DE MÉDIA TENSÃO – FUSÍVEL E CONTATOR

Para o motor especificado abaixo, assíncrono, do tipo gaiola de esquilo, de média tensão, serão especificadas as proteções seguindo o procedimentos e recomendações descritos no item 4 e 5 deste trabalho, em um sistema aterrado por resistência, corrente de curto fase-terra limitada a 50A. Nesse caso, não se tem disponível as curvas de capacidade térmica, apenas os pontos de rotor bloqueado. Não será aplicada a função 37, nem a 87M para este caso. Os ajustes são mostrado na Tabela 8

- Potência Nominal/Polos: 1000 kW/ 8P
- Corrente Nominal (4.160V): 186 A
- I_p/I_n : 6,0
- TRB (Frio/quente): 20 s / 15 s
- Partida típica da instalação: 7 s
- Partidas por horas: 2 a frio e 1 a quente.
- Isolação Classe F

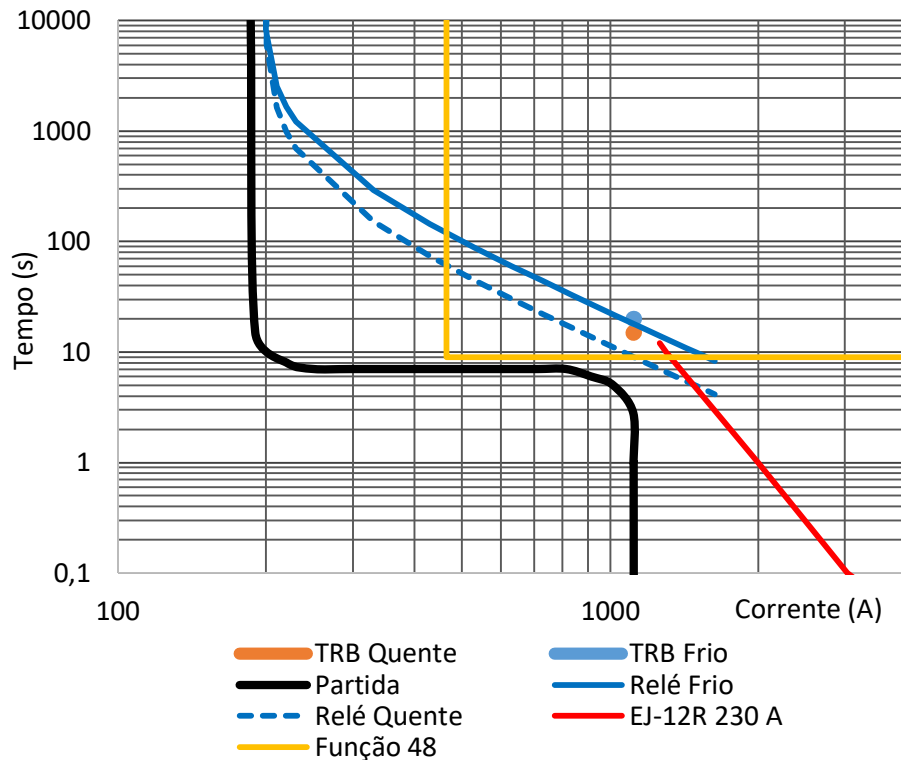
Note que, é desejável ter também o dado de constante térmica de aquecimento do motor, porém, muitas das vezes esta não está disponível. Para uma máquina desse porte a constante está tipicamente entre 25 e 45 minutos. A curva da função 49 traçadas conforme o modelo térmico do item 5.1.2, do fusível do tipo EJ-2 12R de 230 A (MERSEN, 1995), função 48 e curva de partida estão representadas na Figura 30. A Tabela 8 também informa sobre os ajustes necessários das proteções.

Tabela 8 – Parâmetros propostos para o exemplo 6.3.

Função - Proteção	Ajustes
Subtensão – 27	$0,8 * 4.160V = 3.328V$ / tempo = 1,5s
Temperatura do mancal – 38	Verificar com fabricante do lubrificante.
Desequilíbrio de corrente – 46	15% / tempo = 10s
Partida longa/sequencia incompleta – 48	2x I_n / tempo = 9s
Sobrecarga térmica – 49	<i>Pick-up</i> = 107% / cte. Térmica de aquecimento = 35 min / Curva fria com 85% de pré carga
Temperatura do estator – 49S	150°C <i>trip</i> / 140°C alarme
Sobrecorrente terra IOC – 50G	10A / 0,05s
Rotor bloqueado – 51LR/50LR	2,5x I_n / tempo = 2s
Quantidade de partidas – 66	2 a frio / 1 a quente

Fonte: Autor

Figura 30 – Curvas de proteção propostas para o exemplo 6.3.



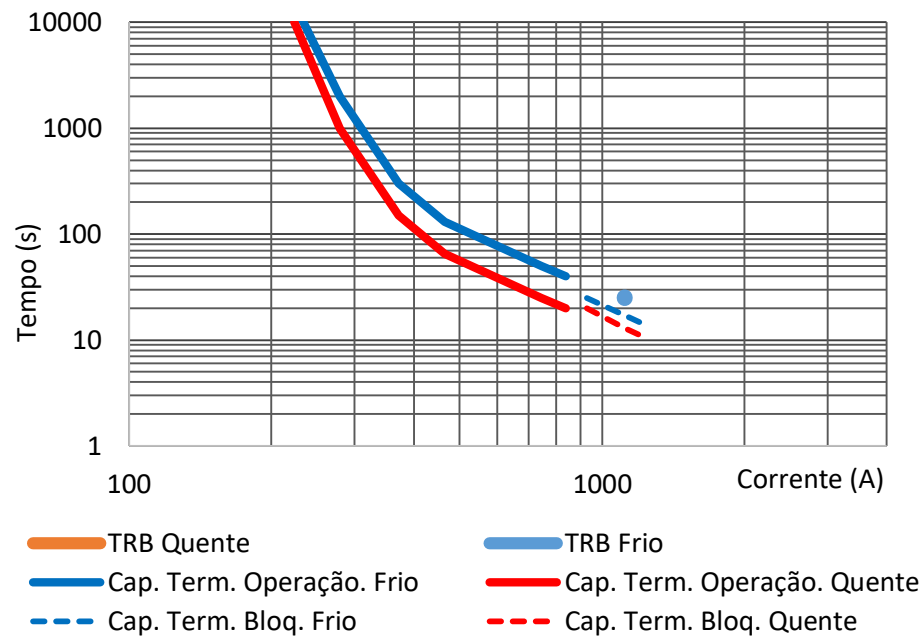
Fonte: Autor.

6.4 MOTOR DE MÉDIA TENSÃO – DISJUNTOR

Para o motor especificado abaixo, assíncrono, do tipo gaiola de esquilo, de média tensão, serão especificadas as proteções seguindo o procedimentos e recomendações descritos no item 4 e 5 deste trabalho, em um sistema aterrado por resistência, corrente de curto fase-terra limitada a 50 A. Nesse caso suposto, o fabricante informa as curvas térmicas do motor, aqui nesse exemplo típico estas curvas são ilustradas na Figura 31 de forma genérica baseada no item 5.1

- Potência Nominal/Polos: 1000 kW/ 8P
- Corrente Nominal (4.160V): 186 A
- I_p/I_n : 6,0
- TRB (Frio/quente): 25 s / 15 s
- Partida típica da instalação: 10 s
- Partidas por horas: 3 a frio e 2 a quente.
- Isolação Classe F
- Carga típica de operação da instalação: 85%, aproximadamente 158 A

Figura 31 – Curvas de limite térmico do motor para o exemplo 6.4.



Fonte: Autor.

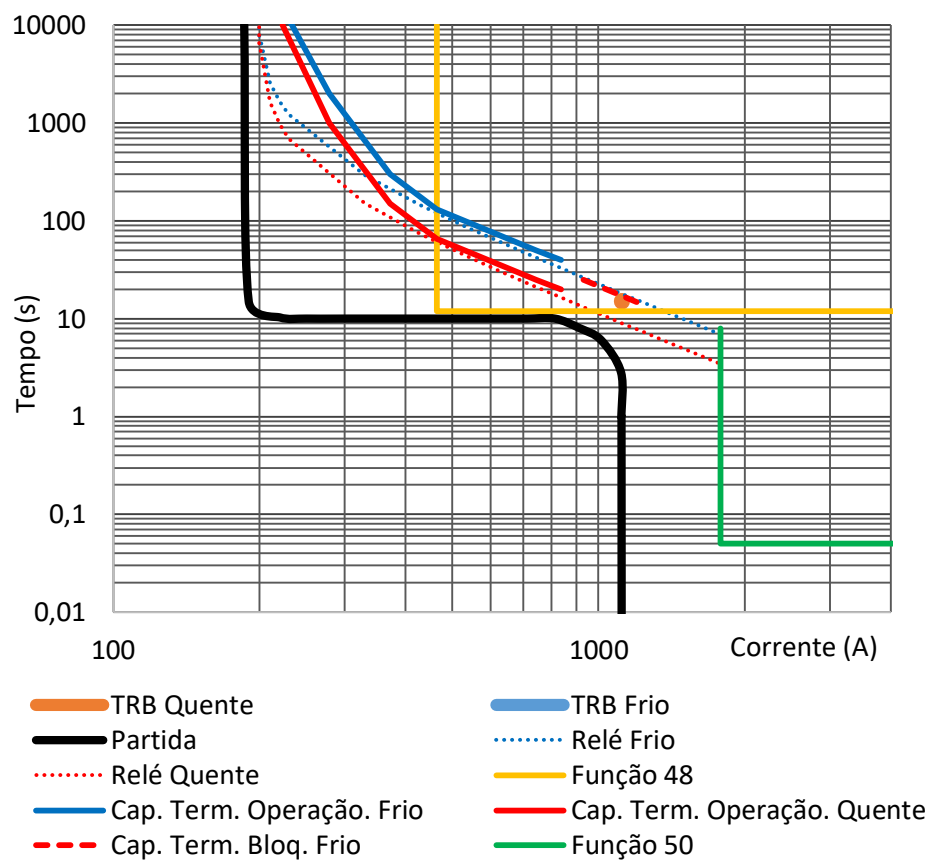
A curva da função 50, função 48, 49 e curva de partida estão representadas na Figura 32. A Tabela 9 também informa sobre os ajustes necessários das proteções.

Tabela 9 – Parâmetros propostos para o exemplo 6.4.

Função - Proteção	Ajustes
Subtensão – 27	$0,8 * 4.160V = 3.328V$ / tempo = 1,5s
Subcorrente - 37	40% de carga (74 A) / tempo = 1s
Temperatura do mancal – 38	Verificar com fabricante do lubrificante.
Desequilíbrio de corrente – 46	15% / tempo = 10s
Partida longa/sequencia incompleta – 48	$2x I_n$ / tempo = 12s
Sobrecarga térmica – 49	<i>Pick-up</i> = 107% / cte. Térmica de aquecimento = 35 min / Curva fria com 85% de pré carga
Temperatura do estator – 49S	150°C <i>trip</i> / 140°C alarme
Sobrecorrente terra IOC – 50G	10A / 0,05s
Rotor bloqueado – 51LR/50LR	$2,5x I_n$ / tempo = 2s
Quantidade de partidas – 66	3 a frio / 2 a quente

Fonte: Autor.

Figura 32 - Curvas de proteção propostas para o exemplo 6.4.



Fonte: Autor.

7. CONCLUSÃO

A partir deste trabalho pode-se concluir a grande importância que se deve dar as proteções de motores elétricos, não apenas na visão de curto-circuito, que é a proteção mais tradicional. Porém, quando esta atua, a máquina já sofreu danos, e as proteções térmicas e supervisão de partida, por exemplo, são muito mais relevantes em termos de evitar a falha do motor.

De maneira geral, existem algumas recomendações sólidas quanto a quais funções de proteção implementar principalmente toando como base as recomendações da IEEE e NEC, além das recomendações dos próprios fabricantes. Porém, devido à grande variedade de aplicações de carga, sistemas elétricos e variações de projeto de motores realmente é inviável descrever todas as possibilidades, cabendo na fase de projeto identificar as necessidades específicas da aplicação.

Este trabalho seguiu esta linha, tratando de aplicações genéricas em uma abordagem básica, pois o assunto é vasto. Uma sugestão para um trabalho futuro, por exemplo, seria a inclusão da coordenação para proteção a montante e dos cabos dos alimentadores ou o aprofundamento sobre o funcionamento e seleção dos parâmetros das funções de proteção dos motores síncronos.

REFERÊNCIAS

FILIPPO FILHO, Guilherme; DIAS, Rubens Alves. **Comandos elétricos: componentes discretos, elementos de manobra e aplicações**. São Paulo: Érica, 2014. 184 p. (Eixos).

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE C37.96**: IEEE Guide for AC motor protection. New York, NY, 2012.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 3004.8**: Recommended practice for motor protection in industrial and commercial power systems. New York, NY, 2016.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 914 p.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 778 p.

MAMEDE FILHO, João. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 605 p.

MARDEGAN, Cláudio. Proteção de Motores. **O setor elétrico**, Santa Cecília, SP, v. 55, p.28-37, ago. 2010. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/09/Ed55_fasc_protecao_capVIII.pdf>. Acesso em: 22 nov.2017.

MERSEN. **GES-8133A**. Newburyport, MA, USA, 1995. Disponível em: <<http://ep-us.mersen.com/fileadmin/catalog/Products/Fuses-Fusegear-and-Fuse-Systems/Medium-Voltage-IEEE-Fuses/Back-Up-R-Rated-Ferrule-Mount-Fuses-for-Motor-Protection/7.2-kV-Ferrule-Mount-Motor/ADV-E-Medium-Voltage-Fuses-Motor-Protection-Amp-Trap-and-9F60-Series-Ferrule-7.2kV.pdf>> . Acesso em: 10.dez.2017

SIEMENS. **Disjuntores 5SX, 5SL, 5SY e 5SP**. São Paulo, 2016. Disponível em: <https://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/downloads-bt/Documents/Minidisjuntores/Cat%C3%A1logo/Catalogo-Minidisjuntores_2016_PT-v1.pdf> Acesso em: 22.nov.2017

SIEMENS. **Sentron protective devices 3VL IEC molded case circuit breakers**. Regensburg , 2013. Disponível em: <https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/90042263/SENTRON_molded-case_circuit_breakers_3VL_en-US.pdf?download=true>. Acesso em: 03.dez.2017

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **United States industrial electric motor systems market opportunities assessment**. Washington, DC, 2002. Disponível em: <https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/mtrmkt.pdf>. Acesso em: 26 out. 2017.

WEG. **Automação fusíveis aR e gL/gG tipo NH contato faca, NH flush end e diametral**. Jaraguá do Sul, SC, 2016a. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet /WEG-fusiveis-ar-e-gl-gg-50009817-catalogo-portugues-br.pdf>> . Acesso em: 22.nov.2017

WEG. **Motores elétricos:** guia de especificação. Jaraguá do Sul, SC, 2016b. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-500327-49-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 08.nov.2017

WEG. **Relés de sobrecarga eletrônico linha RW_E.** Jaraguá do Sul, SC, 2016c. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-reles-de-sobrecarga-eletronico-linha-rw_e-50052284-catalogo-portugues-pt.pdf>. Acesso em: 22.nov.2017