

LUIZ FELIPE DIAS

PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS DE GRANDE PORTE

Guaratinguetá

2013

LUIZ FELIPE DIAS

PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS DE GRANDE PORTE

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: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

Guaratinguetá

2013

D541p	Dias, Luiz Felipe Proteção de motores elétricos de grande porte / Luiz Felipe Dias – Guaratinguetá : [s.n], 2013. 101 f : il. Bibliografia: f. 96 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013. Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias 1. Motores elétricos de indução 2. Relés elétricos I. Título CDU 621.313.333
-------	--

PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS DE GRANDE PORTE

LUIZ FELIPE DIAS

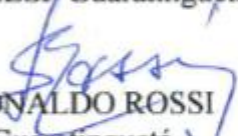
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

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

Prof. Dr. Leonardo Mesquita
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
Orientador/ UNESP Guaratinguetá


Prof. Dr. RONALDO ROSSI
UNESP Guaratinguetá


Prof. Dr. TEOFILO MIGUEL DE SOUZA
UNESP Guaratinguetá

Dezembro de 2013

DADOS CURRICULARES

LUIZ FELIPE DIAS

NASCIMENTO 01.07.1985 – VÁRZEA PAULISTA/SP

FILIAÇÃO Enoque Marques Dias
 Isa Emilia Batista

1992/1995 Ensino Fundamental
 EMEF “Dr. José Romeiro Pereira”, Jundiaí

1996/1999 EE “Paulo Mendes Silva”, Jundiaí

2000/2001 Ensino Médio
 EE “Paulo Mendes Silva”, Jundiaí

2002 Colégio Divino Salvador, Jundiaí

2006/2013 Curso de Graduação em Engenharia Elétrica
 Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de
 Guaratinguetá

Dedico este trabalho de maneira especial aos meus pais Enoque e Isa, que me apoiaram durante toda minha formação, à minha esposa Bruna e ao meu filho Arthur Felipe.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a *Deus*, pela inteligência que Ele me concedeu, pela saúde e força de vontade, pela minha vida, amigos e a minha família, e por todas as pessoas que fizeram parte desta minha caminhada.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Rubens Alves Dias*, por sua disposição e dedicação em me orientar, desde a escolha do tema até o momento de conclusão deste trabalho, sempre presente e com informações importantes, sendo fundamental para que este trabalho fosse realizado da melhor maneira.

Aos meus pais, *Enoque e Isa*, que são minha fonte de inspiração e estiveram presentes ao meu lado, sempre batalhando para garantir meus estudos e depositaram em mim toda a confiança para que eu pudesse concluir mais esta etapa da minha vida.

À minha esposa *Bruna*, que foi e tem sido minha companheira nos momentos mais difíceis e sempre me incentivou não só a concluir este trabalho, mas em todos os momentos de dificuldade me encorajou a seguir em frente.

À *República Fim do Mundo*, inclusive à *Eliana*, que foi minha família durante o período de graduação, proporcionando momentos de alegria, amizade, criando vínculos que espero levar por toda a vida.

Aos meus sogros *Eli e Sueli*, pela ajuda e compreensão quando mais precisei.

Finalmente ao meu filho *Arthur Felipe*, que passou a ser o objetivo de todos esses anos de estudo e dedicação.

“Um dia aprendi que sonhos existem para tornar-se realidade. E, desde aquele dia, já não durmo para descansar. Simplesmente durmo para sonhar.”

Walt Disney

DIAS, L. F. **Proteção de motores elétricos de grande porte**. 2013. 101 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Motores elétricos de grande porte necessitam de um maior cuidado durante o acionamento, e principalmente durante o funcionamento em regime contínuo visto que fazem parte do dia-a-dia do setor fabril, atuando de forma fundamental para garantir que não ocorram danos ao processo de produção e aos equipamentos que façam parte do mesmo sistema. Este trabalho contempla a análise das proteções elétricas, em um sistema composto por um motor de indução trifásico acionado por um conversor de frequência, bem como uma análise das funções de um relé eletrônico multifunção. É apresentado um comparativo entre as funções existentes em um conversor e um relé, e um caso real é descrito de modo a exemplificar a utilização de um motor elétrico e das características que visam a sua proteção, e o sistema em que o mesmo esteja inserido. Com base nos resultados, faz-se de grande importância estudos neste campo de atuação, gerando resultados relevantes, os quais possam ser expostos com o objetivo de unificar em um único documento, diferentes fontes de informações que estejam dispostas de forma aleatória, aprimorar a utilização de motores e aumentar a vida útil dos equipamentos que façam parte da instalação elétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Proteção de motores. Motor de indução trifásico. Conversor de Frequência. Relé eletrônico multifunção.

DIAS, L. F. **Protection of Large Electric Motors**. 2013. 101 f. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

Large electric motors require greater care when driving, especially during continuous operation since they are part of day-to-day manufacturing sector, acting essentially to ensure that no damage occurs to the production process and equipment that are part of the same system. This work includes the analysis of electrical protection in a system comprised of a three phase induction motor driven by a frequency converter as well as an analysis of the functions of a multifunction electronic relay. It is presented a comparison between the existing functions in a converter and a relay and a real case is described in order to exemplify the use of an electric motor and features that are aimed at their protection, and the system in which it is inserted. Based on the results, it is of great importance in this field of performance studies, generating relevant results, which may be exposed in order to unify into a single document, different sources of information that are arranged randomly, improve utilization motor and extend the life of equipment forming part of the electrical installation.

KEY-WORDS: Motor Protection. Large induction motor. Frequency converter. Motor Protection Relay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Principais componentes de um motor de indução trifásico	23
Figura 3.2: Motor de indução trifásico de média tensão	24
Figura 3.3: Fusível NH e Diazed.....	26
Figura 3.4: Fusível limitador de corrente.....	27
Figura 3.5: Curva característica fusível.....	29
Figura 3.6: Curva característica fusível diazed.....	29
Figura 3.7: Curva característica fusível NH.....	30
Figura 3.8: Disjuntor tipo aberto.....	32
Figura 3.9: Disjuntor em caixa moldada	33
Figura 3.10: Curva característica de disparo B.....	35
Figura 3.11: Curva característica de disparo C e D.....	36
Figura 3.12: Relé eletromecânico de indução	37
Figura 3.13: Relé eletrônico ou estático.....	38
Figura 3.14: Relé digital.....	39
Figura 3.15: Diagrama de proteção de motor trifásico.....	45
Figura 3.16: Curva de aquecimento e resfriamento de um motor.....	49
Figura 3.17: Transformador de Corrente de Média Tensão	54
Figura 3.18: Transformador de Potencial de Média Tensão	58
Figura 4.1: Conversor de Frequência	60
Figura 4.2: Célula de Potência composta por bloco retificador, link DC e bloco inversor.....	61
Figura 4.3: Motor de Indução Trifásico SIEMENS modelo H-Compact ILA4.....	64
Figura 4.4: Diagrama de Conexão Geral do Conversor.....	66
Figura 4.5: Controle NXG.....	67
Figura 4.6: Resistores de Atenuação e Transformadores de Corrente	68
Figura 4.7: Resistores de Atenuação e Sensores de Efeito Hall	68
Figura 4.8: Caixa de Controle	69
Figura 4.9: Diagrama de Blocos para estrutura de controle.....	70
Figura 4.10: Relé Eletrônico Multifunção para proteção de motores	72
Figura 4.11: Esquemático de conexão relé-motor.....	74
Figura 4.12: Parâmetros do motor SIEMENS modelo ILA4.....	75
Figura 4.13: Transformador de Corrente	76
Figura 4.14: Transdutor de corrente por Efeito Hall.....	76

Figura 4.15: Resistor Atenuador de 3,0 MΩ.....	77
Figura 4.16: Parâmetros de Modo de Controle	77
Figura 4.17: Keypad do Conversor	78
Figura 4.18: NXG Drive Tool.....	79
Figura 4.19: Gráficos durante a partida do motor	80
Figura 4.20: Parâmetro Motor Trip volts	80
Figura 4.21: Falha na saída do Conversor por Excesso de Perdas.....	81
Figura 4.22: Mensagem Falha Conversor	81
Figura 4.23: Partida do motor com Spinning Load.....	82
Figura 4.24: Pextron.....	83
Figura 4.25: Falha na saída do conversor por elevação de temperatura.....	84
Figura 4.26: Mensagem Falha Pextron	84
Figura 4.27: Circuito esquemático do Pextron.....	85
Figura 4.28: Contator Eletromecânico	86
Figura 4.29: Bypass primeira célula.....	87
Figura 4.30: Bypass segunda célula	87
Figura 4.31: Bypass terceira célula	88
Figura 4.32: Parâmetros para proteção de motor de indução.....	90
Figura 4.33: Motor com carga nominal.....	91
Figura 4.34: Chiller	92
Figura 4.35: Sistema completo de acionamento do motor.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Correntes nominais dos fusíveis para várias tensões	27
Tabela 3.2: Nomenclatura dos aparelhos de proteção e manobra	39
Tabela 3.3: Nomenclatura complementar	41
Tabela 3.4: Correntes nominais primárias dos TCs	55
Tabela 3.5: Tensões primárias nominais e relações nominais dos TCs	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1: Características do Motor ILA4.....	63
Quadro 4.2: Características do Conversor de Frequência.....	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	A PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO NA INDÚSTRIA.....	16
2.1	Introdução	16
2.2	Panorama mundial da proteção utilizada em motores elétricos de grande porte	16
2.3	Aspectos de proteção para motores elétricos no cenário nacional	18
3	ELEMENTOS CONCEITUAIS	22
3.2	Introdução.....	22
3.3	Motores elétricos.....	22
3.2.1.	Motores de indução	22
3.4	Proteção	24
3.3.1.	Elementos de proteção.....	24
3.3.1.1.	Fusíveis.....	25
3.3.1.2.	Disjuntores.....	30
3.3.1.3.	Relés de Proteção.....	36
3.3.2.	Relés para Proteção de Motores.....	43
3.3.3.	Transformador de Corrente - TC	54
3.3.4.	Transformador de Potencial - TP	57
4	ESTUDO DE CASO	60
4.2	Apresentação do Conversor de Frequência	60
4.3	Conversor de Frequência e Motor de Indução	63
4.4	Proteção de Motores contidos no Conversor de Frequência	64
4.4.1	Circuito de Controle e Parametrização do Conversor.....	64
4.4.2	Relé Eletrônico para Proteção de Motor Trifásico de Média Tensão	72
4.4.3	Teste do Conversor de Frequência com Motor Trifásico de Média Tensão.....	74
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

Quando o assunto é proteção de motores de grande porte, operando em média tensão, é necessário um maior cuidado no dimensionamento dos componentes, visto o elevado custo do motor e dos equipamentos que fazem parte do conjunto operacional.

Conforme o tamanho e importância do acionamento a ser realizado, maior a responsabilidade em se ter um sistema que possa operar de forma satisfatória, prezando sempre pela segurança.

A junção de fatores como o tipo de aplicação e a potência do motor, determinam a proteção ideal, proporcionando uma maior disponibilidade produtiva e confiabilidade durante o processo em que o motor esteja incluído.

É possível encontrar um grande número de livros, artigos, monografias, entre outros documentos, que desenvolvam o tema proteção de motores, com foco em motores trifásicos de baixa tensão, os quais são largamente difundidos e utilizados nas residências, comércios e indústrias.

Quando se faz necessário realizar um estudo sobre motores especiais, cujas aplicações não sejam convencionais, requerendo um grau maior de complexidade, as informações a respeito do tema aqui abordado encontram-se distribuídas de maneira aleatória, com pouco embasamento teórico, e raros casos em que estudos práticos tenham sido realizados.

O escopo deste trabalho é reunir informações relevantes sobre a proteção de motores trifásicos de grande porte e desenvolver de maneira aplicativa, um estudo que viabilize o melhor modo de se proteger tanto o motor, como a rede de alimentação, sendo capaz ainda de proporcionar um sistema economicamente viável e energia limpa.

A estrutura deste trabalho é dividida em capítulos, sendo que o capítulo 1 aborda a apresentação dos objetivos e justificativas deste trabalho. No capítulo 2 é apresentado um panorama sobre os diferentes tipos de proteções utilizadas em motores, tanto no Brasil como em outros países, e o que de mais moderno pode ser encontrado no mercado e os recentes desenvolvimentos sobre o tema em diferentes empresas do segmento eletroeletrônico.

O capítulo 3 é baseado na conceituação do conteúdo a ser abordado. Faz-se uma descrição do motor elétrico e dos diferentes componentes que atuam de forma a proteger o motor, assim como diferentes topologias de proteção são apresentadas.

De forma a exemplificar o tema em questão, o capítulo 4 ilustra uma situação prática do acionamento de um motor, onde o intuito é de verificar o comportamento do motor frente às simulações de falhas e um comparativo entre métodos alternativos de proteções.

Finalmente, o capítulo 5 concentra as considerações sobre a importância deste trabalho, e o que pode ser concluído a partir do mesmo. São feitas considerações a cerca dos tipos de proteções utilizados, levando-se em consideração as vantagens e desvantagens de cada dispositivo empregado, visando um melhor rendimento e eficiência do motor e suas aplicações.

2 A PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO NA INDÚSTRIA

2.1 Introdução

A proteção de motores elétricos tem sido estudada tanto em âmbito internacional quanto nacional, pois a preocupação com a maneira de proteger os equipamentos elétricos faz parte do cotidiano dos segmentos produtivos, sendo fundamental para o bom andamento da produção, evitando danos ao equipamento, bem como paradas excessivas e prejudiciais aos processos.

2.2 Panorama mundial da proteção utilizada em motores elétricos de grande porte

Estudos mostram que motores de indução contabilizam 25% da energia elétrica consumida nos EUA, sendo uma parte importante do sistema industrial de uma companhia. Perda de um motor por variadas causas significa menor produção e consequentemente menor ganho. Na Europa, em 2000, o potencial de economia de energia com o uso de motores elétricos de alta eficiência foi estimado em 130 TWh e em particular, os motores elétricos representam até 60% da energia consumida por uma indústria (SOUZA; SILVA, 2012).

Três fatores são considerados na proteção: tamanho, importância e a carga movida pelo motor. Todos esses fatores correlacionados determinam qual tipo de proteção deve ser utilizada. O objetivo da proteção de motores é permitir que o mesmo opere um pouco acima do limite térmico e mecânico, enquanto não são excedidos (SCHULZ; MYINT; DEIBEL, 2003).

Para motores pequenos, fusíveis podem protegê-los de forma aceitável, enquanto motores de maior potência, os quais são mais caros, precisam ser protegidos por relés e disjuntores.

Alguns guias de aplicação do *Institute of Electrical and Electronic Engineers*¹ (IEEE) apresentam métodos de proteção para motores. São identificadas e listadas as funções necessárias para uma adequada proteção. As recomendações são baseadas no tipo da instalação e os usos dos relés são catalogados individualmente e em combinação com outros dispositivos, de forma que o usuário escolha o melhor meio de proteção (IEEE, 2012).

¹ Institute of Electrical and Electronic Engineers colabora no incremento da prosperidade mundial, promovendo a engenharia de criação, desenvolvimento, integração, compartilhamento e o conhecimento aplicado no que se refere à ciência e tecnologias da eletricidade e da informação, em benefício da humanidade e da profissão.

Segundo estudos do *Electric Power Research Institute*² (EPRI), relés térmicos são usados em conjunto com relés de tempo/sobrecorrente para proteger motores de grande porte durante todo o limite da curva térmica. Proteção de sobrecorrente é necessária para curto-circuito e é o mínimo exigido para a proteção de todos os motores.

Relés diferenciais são empregados quando uma rápida e precisa proteção são necessárias (SHARKEY, 2004).

Algumas empresas do setor elétrico comercializam diversos produtos que visam proteger várias partes do sistema elétrico, das quais o motor de indução é uma parte considerável e muito importante.

Para citar alguns exemplos, iniciar-se á pela *General Eletric Company*³. O dispositivo primário de proteção do motor é o elemento de sobrecarga térmica, sendo dimensionado através de uma modelagem térmica do motor. Este modelo deve levar em conta todos os processos térmicos no motor enquanto o motor está começando o seu funcionamento, rodando a carga normal, sobrecarregado e se o motor está parado (GENERAL ELECTRIC, 2012).

Para falta de fase pode ser utilizado proteção diferencial, sendo dois conjuntos de relés, um no início do alimentador do motor e o outro no ponto de estrela. Tal procedimento pode ser considerado a primeira linha de defesa para a fase-fase ou fase-terra. Na eventualidade de tais falhas, a rápida resposta do elemento diferencial pode limitar os danos causados ao motor.

Na visão da *Schneider Electric*⁴ cada motor elétrico tem limites operacionais e o custo destes incidentes pode ser elevado (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012).

Os custos operacionais incluem a perda de produção, de matérias-primas, reparação do equipamento de produção e atrasos.

A necessidade econômica para as empresas em ser mais competitiva, implica a redução dos custos de produção descontínua e sem qualidade.

Falhas na proteção podem também ter um sério impacto sobre a segurança das pessoas em contato direto ou indireto com o motor.

A proteção é necessária para que possa superar estes incidentes, ou pelo menos diminuir o seu impacto e impedi-los de causar danos ao equipamento e perturbar o fornecimento de energia. Ela isola o equipamento da rede elétrica

² O Electric Power Research Institute é uma companhia de pesquisa independente, de desenvolvimento e demonstração dos benefícios da eletricidade no setor público.

³ General Electric Company, também conhecido por GE, é uma empresa multinacional de serviços e de tecnologia.

⁴ Schneider Electric é um grupo multinacional francês, especializada em produtos e serviços para distribuição elétrica, controle e automação industrial.

por meio de um dispositivo de interrupção que detecta e mede variações elétricas (tensão, corrente e outras grandezas).

Essas proteções são asseguradas por dispositivos especiais, tais como fusíveis do circuito, disjuntores e relés de sobrecarga ou por dispositivos integrais.

A *Eaton*⁵ produz diferentes tipo de produtos, os quais fornecem proteção completa e confiável para qualquer tamanho de motor em níveis de tensão diferentes, incluindo monitoramento e funções de controle.

Os principais produtos fornecem recursos abrangentes, os quais incluem proteção de sobrecarga, relé de proteção diferencial de corrente para motores e geradores, relé microprocessado multifuncional usado em um motor de arranque ou um disjuntor para a carga do motor e pode ser aplicado em qualquer tamanho de motor e em qualquer nível de tensão (EATON, 2012).

A *ABB*⁶ também possui uma diversidade de equipamentos, dentre os quais são usados para a proteção, medição e supervisão de médio e grande porte e para pequenas e médias empresas de manufatura e indústria de processos. Podem ser usados tanto com disjuntores ou contadores controlados e em uma variedade de aplicações. Também é usado para a proteção de cabos alimentadores e transformadores de distribuição que beneficiam a proteção térmica além de proteção de sobrecorrente, falta à terra e proteção desequilíbrio de fase (ABB, 2012).

2.3 Aspectos de proteção para motores elétricos no cenário nacional

Para Mamede Filho (2010) os motores elétricos são peças fundamentais em um projeto de instalação elétrica industrial e por este motivo merecem cuidados quanto à sua proteção. Quando submetidos a condições anormais durante o seu período de funcionamento, deve-se imediatamente ocorrer o seu desligamento do circuito de alimentação.

Geralmente, a proteção de motores elétricos é feita através do uso de relés de sobrecarga bimetalicos, disjuntores ou fusíveis.

No caso de motores de grande porte, é necessário que sejam previstas proteções contra curto-circuito no enrolamento do estator, contra sobreaquecimento do estator e rotor, contra subtensão e contra falta à terra no campo. Por exemplo, contra curto-circuito em motores de

⁵ Eaton Powering Business Worldwide fornece componentes e sistemas elétricos, hidráulicos, automotivos, aeronáuticos e de filtração, oferecendo marcas, produtos e soluções de comprovada excelência para seus clientes nos mercados sul-americanos.

⁶ Asea Brown Boveri, é uma empresa multinacional com sede em Zurique, Suíça, líder em tecnologias de energia e automação.

grande porte, como 2200-5000 V, acima de 1500 HP e acima de 5000 V, com potência acima de 500 HP, é utilizado releamento diferencial percentual (CAMINHA, 1977).

Segundo Filippo Filho (2013), os dispositivos fusíveis do tipo gM^7 , são os mais indicados para proteção de circuitos de motores, devido às altas correntes de partidas do motor. Para motores é impraticável a utilização de fusíveis gG^8 para proteção de sobrecarga, pois as elevadas correntes de partida romperiam rapidamente o elo do fusível, sendo recomendado nesses casos o uso de relé térmico. Há também a utilização de sondas térmicas, atuando diretamente no enrolamento do motor, sendo ainda mais eficazes que os relés térmicos. As sondas mais comuns são os termostatos e termistores.

Outra visão de proteção de motores é dada por Clark (1983), o qual afirma que a proteção depende primariamente da importância do motor para o local em que esteja sendo utilizado. Motores que não sejam atendidos possuem maior quantidade de proteção conectada a aparelhos que forcem o desligamento, enquanto que os motores atendidos podem ter certas proteções substituídas e conectadas a aparelhos somente para alarme, não ocorrendo o desligamento do motor.

Motores menores e de menor tensão são abrangidos pelas normas vigentes proporcionando uma orientação considerável sobre o assunto.

De forma geral, o uso de relés é amplamente utilizado tanto para motores de indução quanto para motores síncronos.

A NBR 5410 (ABNT, 2004) diz que todo o circuito deve ser protegido por dispositivos internos ao motor sensíveis à temperatura e também externos que interrompam a corrente, quando percorrido por uma corrente de curto-circuito. A norma aceita fusíveis e disjuntores para proteção específica.

Uma alternativa para a proteção de motores é dado por Gazzana et al. (2008). Primeiramente o autor cita o motor como um dos dispositivos mais empregados no setor industrial, até mesmo sendo considerado o centro de um esquema de produção. Posteriormente fala que nas últimas décadas os motores não costumavam ser monitorados após entrarem em operação, sendo encontradas apenas falhas de manutenção corretiva.

⁷ gM indica fusíveis, com capacidade de interrupção em toda a faixa, para proteção de circuitos de motores.

⁸ gG indica fusíveis, com capacidade de interrupção em toda a faixa, para aplicação geral.

As falhas mais usuais são curto-circuito do enrolamento do estator e podem ser detectadas por MCSA⁹, não interrompendo o funcionamento do motor, evitando indisponibilidade do equipamento e redução de custos.

Bonaldi et al. (2008) afirma que os motores são o centro da maioria dos processos de produção, bem como a análise e identificação de falhas nesse equipamento. Por serem máquinas rotativas, os motores de indução estão expostos a uma série de adversidades térmicas, ambientais e desgastes mecânicos, exigindo uma manutenção e proteção efetiva. No Brasil técnicas por assinatura elétrica estão em processo de implantação, e uma delas é a ESA¹⁰. O uso industrial dessa técnica visa melhorar a confiabilidade dos equipamentos, aumentando a disponibilidade das máquinas, redução das horas de manutenção, redução de custos e aumento de segurança.

No cenário nacional, diversas empresas fabricam e comercializam produtos de proteção, sendo muito bem conceituados e amplamente utilizados.

A WEG¹¹ possui uma linha completa de disjuntores para proteção de motores elétricos, com alta capacidade de interrupção, permitindo que sejam utilizados em circuitos com alto nível de corrente, ideais para motores de grande porte. Além disso, os disjuntores possuem disparadores térmicos para sobrecargas e mecanismo diferencial para falta de fase (WEG, 2012).

Também fabricam relés protetores para sistemas trifásicos contra falta de fase, falta de neutro ou ambas as funções integradas num mesmo produtos.

A Siemens¹² é fabricante de relés de proteção para aplicações gerais e aplicações especiais, oferecendo uma gama de relés de sobrecarga para motores de grande potência. Normalmente, os relés são utilizados para proteger os motores de calor excessivo, resultante de sobrecargas, rotor bloqueado e perda de fase.

Outros disjuntores são recomendados para uso em partidas de motores, visando fornecer proteção contra curto-circuito e para o circuito elétrico do motor. Alguns possuem disparo ajustável, fornecendo uma proteção para correntes um pouco acima do valor de pico.

⁹ MCSA é uma técnica voltada para o monitoramento de motores, analisando os sinais de corrente no domínio da frequência, onde o espectro pode ser considerado a assinatura do motor.

¹⁰ Análise da assinatura elétrica é a denominação geral para um conjunto de técnicas de monitoramento da condição de máquinas elétricas pela análise de sinais elétricos.

¹¹ WEG S.A é uma empresa brasileira com sede em Jaraguá do Sul, Santa Catarina, fabricante de motores, geradores, componentes eletroeletrônicos, produtos para automação industrial, transformadores de força e distribuição, tintas líquidas e em pó e vernizes eletroisolantes.

¹² Siemens AG é um conglomerado alemão de engenharia, sendo o maior da Europa. Seus principais escritórios estão localizados em Berlim, Munique e Erlangen, na Alemanha. A empresa possui três áreas de negócios principais: Indústria, Energia e Medicina.

Como equipamento de proteção, podem-se citar também os inversores de frequência, os quais possuem dentre outras funções, monitoramento térmico do motor e dos módulos de potência, subtensão, sobretensão, falha com terra e curto circuito (SIEMENS, 2012).

Uma outra empresa responsável pela produção de dispositivos de proteção é a *SEL*¹³. Além de uma variedade de produtos, a empresa possuiu funcionários filiados ao IEEE, desenvolvendo estudos e artigos sobre as variadas maneiras existentes de proteção. Segundos os autores, um desses artigos apresenta a coordenação das características e as funções de redundância possíveis com relés microprocessados. Essa tecnologia avançou de tal forma que possui vantagens econômicas, sendo possível a utilização de dois relés completos e independentes (SCHWEITZER III; ZOCHOLL, 1995).

No âmbito geral, é possível observar a grande importância da proteção em motores elétricos e a sua influência nas características operacionais, e estudos sobre o tema são realizados frequentemente, de forma a obter melhores proteções aos motores e a instalação elétrica como um todo.

¹³ Schweitzer Engineering Laboratories Comercial LTDA é uma empresa técnica constituída na cidade de Campinas, para operações comerciais, ensaios, testes, pequenos reparos, treinamento e cursos sobre os produtos e conceituais de filosofia de proteção e automação de sistemas elétricos.

3 ELEMENTOS CONCEITUAIS

3.1 Introdução

Os motores de baixa tensão e baixa potência geralmente são protegidos por disjuntores termomagnéticos, relés térmicos ou fusíveis, enquanto motores de média e alta tensão e potências superiores necessitam um número maior de recursos.

Neste sentido são descritos também o motor de indução, a fim de ser visto as suas principais partes, para obter um bom entendimento dos meios de proteção utilizados.

3.2 Motores elétricos

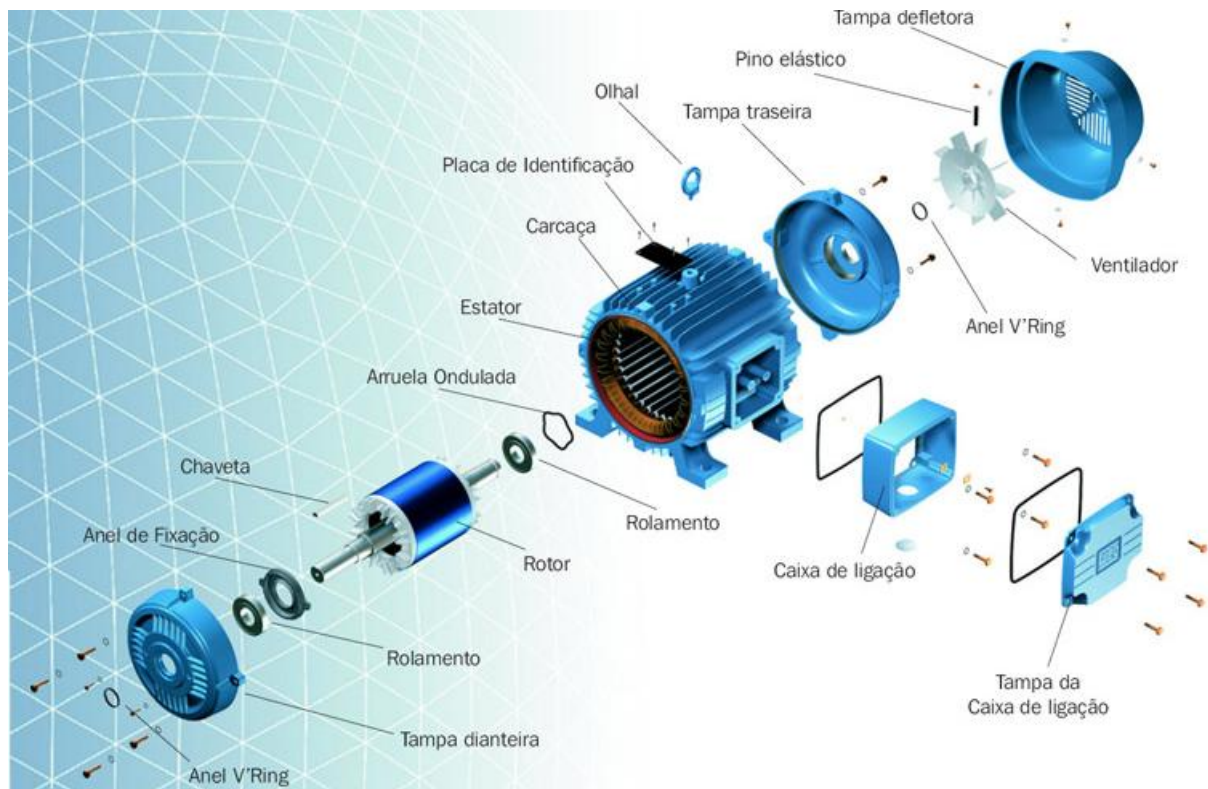
Composto basicamente de um rotor (parte móvel) e um estator (parte fixa), o motor elétrico realiza a transformação de energia elétrica em energia mecânica. Há dois grandes grupos: corrente contínua e corrente alternada. Como neste estudo o foco é nos motores de indução trifásicos, a seguir serão apresentados os principais elementos constituintes do motor que necessitam de proteção (MAMEDE FILHO, 2010).

3.2.1 Motores de indução trifásicos

São alimentados por um sistema trifásico de três fios, nos quais as tensões estão defasadas em 120° e esse modelo representa a maioria dos motores utilizados em indústrias, edifícios e grandes instalações.

A Figura 3.1 mostra o motor trifásico e suas principais partes.

Figura 3.1 – Principais componentes de um motor de indução trifásico.



Fonte: WEG, 2013.

Quando se utiliza uma determinada proteção para o motor elétrico, a mesma possui a função de proteger o estator e rotor contra avarias, tais como falta de fase, curto circuito entre fases, curto entre bobinas, sobrecarga e travamento do rotor.

Segundo Mamede Filho (2010), os motores estão divididos em classes de isolamento, de forma que para uma determinada classe há uma proteção específica.

As classes A, E e B são as mais utilizadas em máquinas elétricas, sendo descritas abaixo:

- Classe A – limite 105°C. Exemplo: esmalte de fios.
- Classe E – limite 120°C.
- Classe B – limite 130°C.

O aquecimento das bobinas do estator fora do limite previsto na fabricação provoca uma redução da vida útil do motor, sendo que uma elevação de 10°C na temperatura de um motor reduz a sua vida útil pela metade.

Não ultrapassar a temperatura limite do enrolamento é fundamental para prolongar a vida útil do motor.

O objetivo deste trabalho é enfatizar as proteções utilizadas em motores de grande porte, tal como mostra a Figura 3.2 abaixo.

Figura 3.2 – Motor de indução trifásico de média tensão.



Fonte: SIEMENS, 2013.

3.3 Proteção

Qualquer sistema elétrico, assim como as partes que derivam do sistema, está sujeito a defeitos temporários e permanentes, os quais poderão ocasionar problemas irrelevantes ou desastrosos.

Geralmente a proteção de um sistema ou motores elétricos de baixa ou alta tensão é baseada no uso de relés, fusíveis e disjuntores (MAMEDE FILHO, 2011).

A proteção de uma maneira geral divide-se em duas partes: *proteção de carga* e *proteção do circuito*. A proteção de carga é a função inerente aos aparelhos que evita que a carga seja danificada, quando houver uma falha que não esteja relacionada a ela. A proteção do circuito é aquela que, se houver uma falta no circuito ou na carga, deve ser realizada a fim de evitar que sejam danificados ou destruídos os demais componentes do circuito (SIEMENS, 2013).

3.3.1 Elementos de proteção

Ao longo deste capítulo serão estudados os vários tipos de fusíveis, relés de proteção e disjuntores existentes, bem como suas aplicações e demais métodos de proteção para as mais variadas falhas.

3.3.1.1 Fusíveis

É um dispositivo utilizado para a proteção de circuitos, especialmente contra curto-circuito. Constitui-se de um elemento condutor, o qual se funde e interrompe o circuito quando a corrente atinge valores acima da sua capacidade nominal. Há vários tipos, dentre eles: retardados, rápidos, ultrarrápidos, limitadores de corrente, entre outros (MARDEGAN, 2013).

Os principais parâmetros elétricos dos fusíveis são:

- Corrente nominal

É aquela que o fusível deve suportar continuamente sem que seja ultrapassado o limite de temperatura estabelecido. As correntes variam em função do fabricante.

- Tensão nominal

É aquela para a qual o fusível foi dimensionado, dentro das condições de corrente e temperatura pré-determinadas.

- Corrente de interrupção

São as correntes capazes de sensibilizar sua operação, sendo divididas em duas faixas distintas: correntes de curto-circuito e correntes de sobrecarga.

Os fusíveis são divididos em tipos de serviços, sendo identificados em duas letras. A primeira indica o tipo de funcionamento e a segunda letra, indica o objeto a ser protegido (SIEMENS, 2009).

Então, dessa forma podem-se especificar as letras, como mostrado abaixo.

Primeira letra:

- a – Fusível limitador de corrente, proteção de curto circuito.
- g – Fusível limitador de corrente, proteção de curto circuito e sobrecarga.

Segunda letra:

- G – proteção de linha, uso geral.
- M – proteção de circuitos de motores.
- R – proteção de semicondutores.
- L – proteção de linha.
- B – proteção de instalações mineiras.
- Tr – proteção de transformadores.

Podem ser divididos também de acordo com seu formato e conexão. Assim, os dois tipos são descritos abaixo:

- NH – utilizados em circuitos de alta potência e conectados por encaixe.
- Diazed – utilizados em circuitos de baixa potência, conectados através de porta fusível.

A Figura 3.3 mostra os tipos de fusível NH e Diazed.

Figura 3.3 – Fusível NH e Diazed.



Fonte: SIEMENS, 2013.

a) Fusível Retardado

Os fusíveis de efeito retardado são indicados para circuitos cuja corrente de partida atinja valores muitas vezes superiores ao valor da corrente nominal e em circuito que estejam sujeitos a sobrecarga de curta duração. Podemos citar motores elétricos e cargas capacitivas em geral. Os fusíveis de efeito retardado mais comumente usados são os *NH E DIAZED RETARDADO*.

b) Fusível Rápido

Os fusíveis de efeito rápido são empregados em circuitos em que não há variação considerável de corrente entre a fase de partida e a de regime normal de funcionamento. Esses fusíveis são ideais para a proteção de circuitos resistivos (lâmpada, fornos, etc.).

c) Fusível Ultrarrápido

Os fusíveis ultrarrápidos são utilizados em instalações industriais na proteção de semicondutores, tiristores, GTO'S, diodos e quaisquer equipamentos com circuitos eletrônicos, os quais necessitem de uma rápida interrupção de corrente em caso de curto.

Tabela 3.1 – Correntes nominais dos fusíveis para várias tensões (continuação)

4,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
6,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
8,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
12,50	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
16,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
20,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
32,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
40,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
50,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
63,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
75,00	X		X	X	X	X	X	X	X	X
80,00	X		X	X	X	X	X	X	X	X
125,00	X		X	X	X		X	X		
160,00	X		X	X			X	X		
200,00	X		X	X			X	X		
250,00	X		X	X						
315,00	X		X	X						
400,00	X		X	X						
500,00	X		X	X						

Fonte: MAMEDE FILHO, 2010.

De acordo com Mamede Filho (2011), pode-se utilizar este fusível em motores de média tensão (2,3 a 13,8 kV), embora não seja uma ação muito usual. Os circuitos de alimentação dos motores devem estar protegidos também contra eventuais faltas de fase devido à queima de um destes elementos, provocando um funcionamento bifásico do motor e provável queima dos enrolamentos.

A equação (3.1) é utilizada para determinar a corrente nominal de um fusível limitador:

$$I_m = \frac{736 \cdot P_m}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot \eta \cdot \cos\psi} \quad (3.1)$$

onde:

η = rendimento.

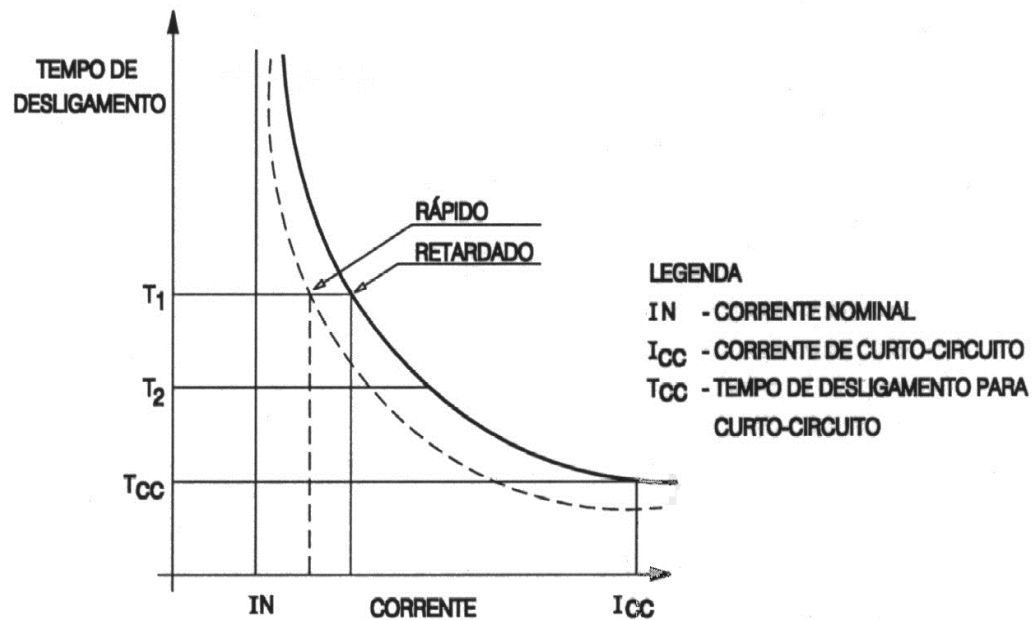
$\cos\psi$ = fator de potência.

Para evitar que o motor venha a operar com duas fases devido à queima de um dos fusíveis, pode-se utilizar relés contra falta de fases ou um disjuntor de proteção.

Os fusíveis atuam dentro de determinadas características de *tempo de fusão X corrente* fornecidas em curvas específicas.

A Figura 3.5 apresenta uma curva característica dos fusíveis.

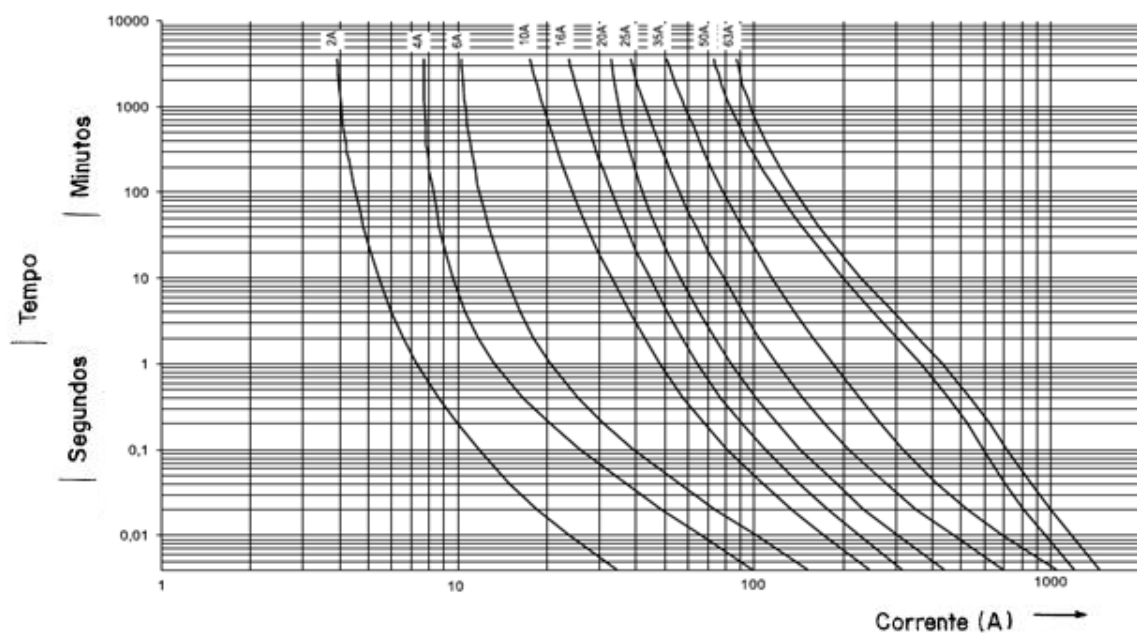
Figura 3.5 – Curva característica fusível



Fonte: MAMEDE FILHO, 2011.

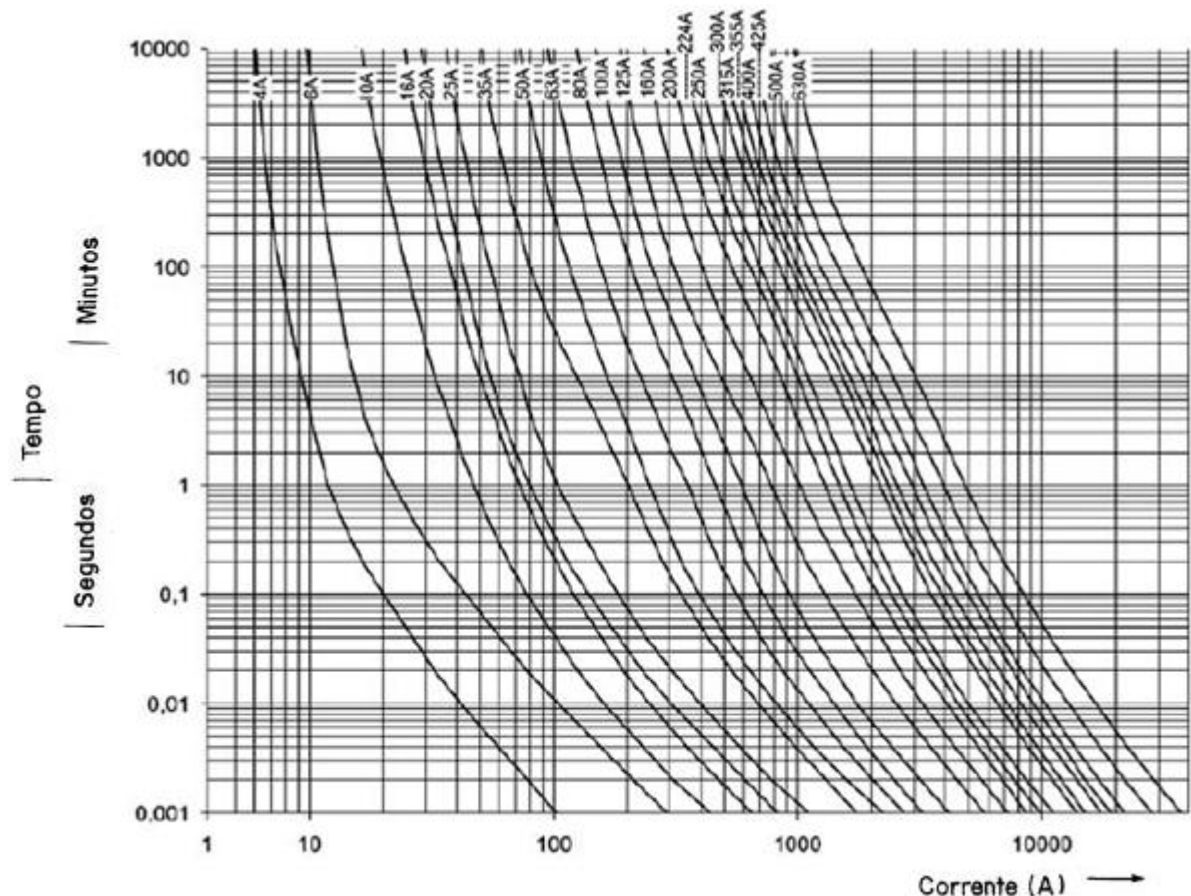
A Figura 3.6 a Figura 3.7 apresentam as curvas características dos fusíveis tipo diazed e NH.

Figura 3.6 – Curva característica fusível diazed



Fonte: WEG, 2013.

Figura 3.7 – Curva característica fusível NH



Fonte: WEG, 2013.

3.3.1.2 Disjuntores

São equipamentos destinados à interrupção num determinado ponto do circuito devido às correntes de defeito durante o menor espaço de tempo possível, assim como o estabelecer o religamento do mesmo. O uso de disjuntores deve sempre ser acompanhado dos respectivos relés, os quais detectam as correntes do circuito, previamente analisadas por sensores, enviando ou não o comando de abertura do disjuntor. A utilização de disjuntores sem o auxílio dos relés, não é caracterizada como proteção e sim apenas como uma chave de manobra (MAMEDE FILHO, 2011).

Os principais parâmetros elétricos dos disjuntores são:

- Corrente nominal

É a corrente que circula de modo permanente pelo disjuntor. Possuem um bimetálico duplo que mantém a corrente nominal até um determinado valor de temperatura, cerca de 50° C, sem que o disjuntor opere.

- Tensão nominal

É a tensão para a capacidade de interrupção e demais características que constituem os valores nominais do disjuntor.

- Capacidade nominal de interrupção de curto circuito

Máxima corrente de interrupção, de valor eficaz, que o disjuntor pode interromper, para que opere dentro das suas características nominais.

Os disjuntores podem ser, variando as unidades de proteção incorporadas, de quatro diferentes tipos:

- a) Disjuntores térmicos

Dispõem de uma unidade de proteção térmica de sobrecarga.

- b) Disjuntores magnéticos

Dispõem de uma unidade de proteção magnética contra curto-circuitos.

- c) Disjuntores termomagnéticos

Normalmente os disjuntores são termomagnéticos. Estes dispõem de um disparador térmico com atraso, conhecido como bimetálico, o qual depende da característica de intensidade de tempo, reagindo a sobrecargas moderadas, e dispõe de um disparador eletromagnético, que reage sem atraso quando sobrecargas e curto-circuitos ocorrem.

- d) Disjuntores termomagnéticos limitadores

Dispõem de unidades de proteção térmica, magnética e um sistema especial que é capaz de interromper as elevadas correntes de curto-circuito antes de chegarem ao seu valor de pico.

Todas as unidades de proteção incorporadas aos disjuntores podem ser fabricadas em duas diferentes características:

- Unidade sem ajuste ou regulação

As correntes das unidades térmica e magnética são pré-ajustadas pelo fabricante, não sendo possível alterar as características e o disjuntor é comercializado selado.

- Unidade com ajuste externo

As unidades térmica e magnética podem ter as suas respectivas correntes de atuação reguladas através de seletores.

Além do que já foi descrito de características dos disjuntores, há também uma classificação para o tipo de construção. Existem dois tipos:

a) Disjuntores abertos

Esses disjuntores possuem os componentes internos montados em estrutura metálica, do tipo aberto. Normalmente as correntes nominais são de valores elevados, e largamente utilizados em montagem de quadros e painéis.

Podem também ser utilizados como chaves de comando e de proteção de circuitos de distribuição de motores. Para este modelo, os vários componentes podem ser substituídos em casos de avarias.

A Figura 3.8 mostra um disjuntor do tipo aberto.

Figura 3.8 – Disjuntor tipo aberto



Fonte: SIEMENS, 2013.

b) Disjuntores em caixa moldada

Disjuntores de caixa moldada, como o nome indica, são compostos por uma caixa isolante que aloja internamente todos os componentes do disjuntor. A desvantagem deste modelo é que caso qualquer problema interno ocorra, é impossível reparar, tendo que substituí-lo por outro.

A Figura 3.9 mostra um disjuntor em caixa moldada utilizado em painéis de distribuição como proteção do circuito.

Figura 3.9 – Disjuntor em caixa moldada.



Fonte: WEG, 2012.

Segundo Mamede Filho (2011), os disjuntores são também solicitados a interromper correntes de circuitos que operam a plena carga ou a vazio, e a energizar os mesmos circuitos caso estejam operando em condições normais ou em falta.

Usualmente, os disjuntores utilizam acionamento através de molas. O sistema de mola apresenta grande simplicidade de operação e custo reduzido. Basicamente todos os disjuntores de média tensão e a maioria dos disjuntores de alta tensão são constituídos de sistema de mola.

De forma simplificada, uma mola ou um conjunto de molas libera sua energia mecânica armazenada para o deslocamento da haste do contato móvel do disjuntor. Este acionamento pode ocorrer de forma mono, bi ou tripolar.

O desligamento de um motor, através do uso de um disjuntor, em operação a vazio é um fato comum nas instalações industriais. Também pode ocorrer o desligamento durante a partida do motor, mas apenas nos seguintes casos:

- Verificar o sentido de rotação do rotor.
- Proteção de sobrecorrente ajustada erroneamente.

Essas interrupções durante a partida provocam sobretensões que podem atingir valores bastante elevados, cerca de cinco a dez vezes a tensão nominal, acarretando em uma descarga entre os terminais do motor.

Os motores em que essas sobretensões ocorrem frequentemente são os compreendidos entre 15 e 1.500 cv nas tensões de 4,16 a 6 kV.

Existe uma norma *NBR 7094*¹⁴ que visa garantir a resistência dos motores em casos de sobretensão, onde um ensaio de rigidez dielétrica é executado para motores com potência inferior a 13.000 cv e mínimo de 1.500 V.

Para a realização de um ensaio que esteja de acordo com a norma, utiliza-se a equação (3.2):

$$V_e = 2 \cdot V_{nm} + 1000 \quad (3.2)$$

sendo:

V_e = tensão de ensaio

V_{nm} = tensão nominal do motor

E as sobretensões de manobra são dadas pela equação (3.3):

$$V_{ms} = \sqrt{V_i^2 + Z_m^2 \times I_c^2} \quad (3.3)$$

sendo:

V_{ms} = valor máximo de sobretensão

V_i = valor instantâneo da tensão

Z_m = impedância característica do motor

I_c = corrente cortada pelo disjuntor

A impedância característica do motor varia de acordo com a potência e tensão nominal da máquina. Aproximadamente, podemos assumir que:

- Motores de 150 a 350 cv: 1.000 Ω
- Motores de 500 a 1.500 cv: 400 Ω

¹⁴ NBR 7094 – Máquinas elétricas girantes - Motores de indução

Como forma de melhor avaliar o impacto das sobretensões, analisa-se o fator de sobretenso, que é dado pela relação entre a tensão máxima transitória e a tensão nominal do motor em seu valor de pico. Assim, a equação (3.4) relaciona esses valores.

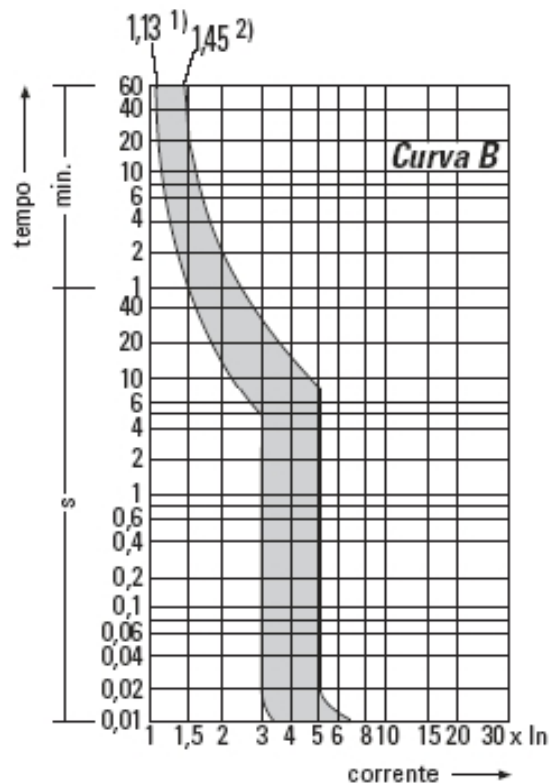
$$F = \frac{V_{ms}}{0,82 \cdot V_{nmp}} \quad (3.4)$$

De modo que a função principal dos disjuntores termomagnéticos é a proteção dos circuitos contra sobrecargas térmicas ou curto-circuitos, os disjuntores atuam dentro de determinados valores de referência, definidas pela norma *NBR NM 60898*¹⁵, onde são definidas as características para as curvas B, C e D.

Os disjuntores de curva B são aplicados na proteção de circuitos que alimentam cargas com características predominantemente resistivas, tais como lâmpadas incandescentes, chuveiros, torneiras, aquecedores elétricos e tomadas em geral.

A Figura 3.10 mostra as curvas características de um disjuntor predominantemente resistivo.

Figura 3.10 – Curva característica de disparo B.



Fonte: SIEMENS, 2013.

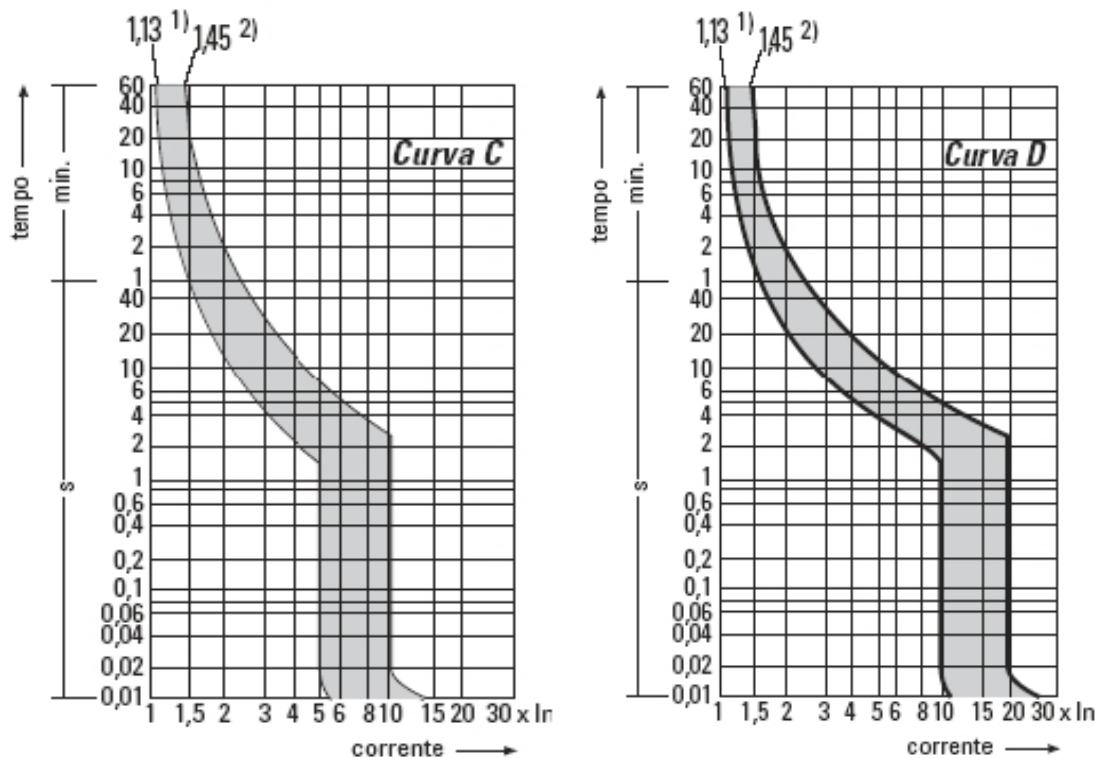
¹⁵ NBR NM 60898 - Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares

Os disjuntores de curva C são aplicados na proteção de circuitos que alimentam cargas de natureza indutiva, as quais apresentam picos de corrente no momento da ligação, tais como micro-ondas, motores para bombas, além de circuitos com cargas de características semelhantes a essas.

Os disjuntores de curva D são aplicados na proteção de circuitos que alimentam cargas com características altamente indutivas, com picos de corrente no momento da ligação, tais como grandes motores, transformadores, e circuitos com cargas semelhantes.

A Figura 3.11 mostra as curvas características de um disjuntor predominantemente indutivo e um disjuntor altamente indutivo.

Figura 3.11 – Curva característica de disparo C e D.



Fonte: SIEMENS, 2013.

3.3.1.3 Relés de Proteção

Os relés constituem uma ampla gama de equipamentos e dispositivos que oferecem diversos tipos de proteção aos circuitos: sobrecarga, curto-circuito, sobretensão, subtensão, entre outros.

Cada relé possui uma ou mais características técnicas, as quais definem os limites exigidos pelos esquemas de proteção e coordenação, de acordo com cada sistema elétrico em particular.

Existem diferentes formas de construção e operação, além de inúmeras aplicações, que variam conforme a importância, o porte e da segurança da instalação a ser considerada. São abordados os relés eletromecânicos, eletrônicos e digitais, assim como a identificação dos dispositivos nos diagramas elétricos, seguindo uma numeração normalizada pela *American Standard Association* ¹⁶ (ASA) (MAMEDE FILHO, 2011).

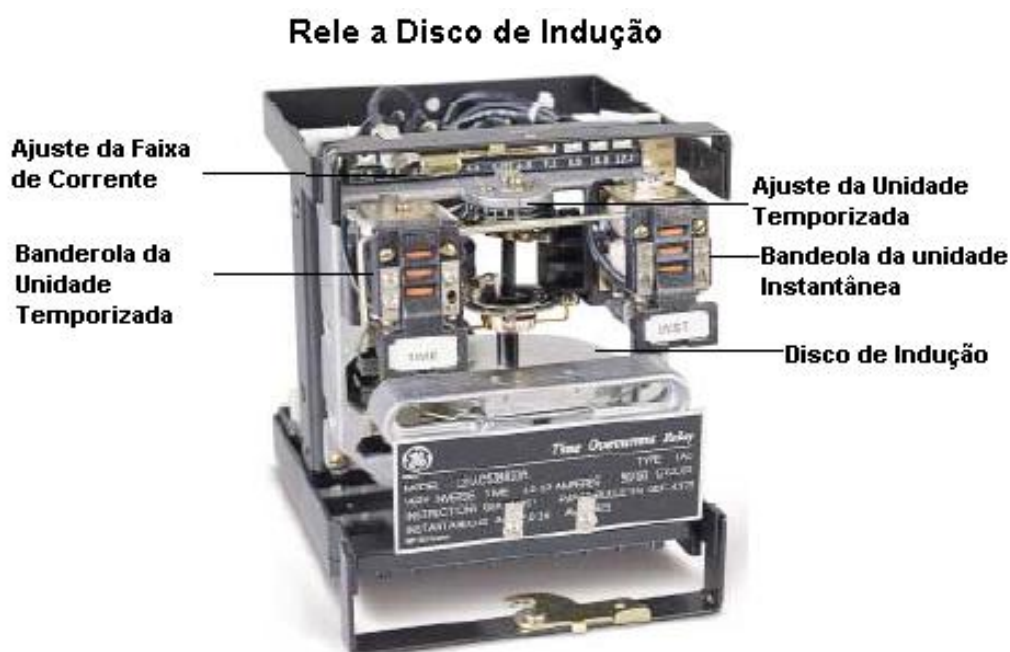
A situação atual dos relés de proteção pode ser resumida da seguinte maneira:

a) Relés eletromecânicos de indução

São os relés dotados de bobinas, disco de indução, molas, contatos fixos e móveis, proporcionando uma grande robustez ao conjunto. Fácil manutenção, fácil ajuste dos parâmetros elétricos e prolongado tempo de vida útil. Já se tornaram tecnologicamente obsoletos.

A Figura 3.12 representa um relé eletromecânico de indução.

Figura 3.12 – Relé eletromecânico de indução.



Fonte: SENAI, 2013.

¹⁶ American Standard Association, também conhecido por sua sigla ANSI, é uma organização particular estado-unidense sem fins lucrativos que tem por objetivo facilitar a padronização dos trabalhos de seus membros. Entidades semelhantes no mundo seguem alguns dos padrões adotados pela ANSI. Seu equivalente no Brasil seria a ABNT.

b) Relés eletrônicos

Conhecidos também como relés estáticos. Assim como os relés eletromecânicos, tornaram-se obsoletos. Dimensões reduzidas, proporcionando painéis de tamanhos menores. Possuem circuitos integrados para cada função desempenhada, apresentam melhor precisão e simplicidade nos ajustes, e elevada velocidade de operação.

A Figura 3.13 representa um relé eletrônico.

Figura 3.13 – Relé eletrônico ou estático.



Fonte: SEL, 2013.

c) Relés digitais

Possuem circuitos eletrônicos de alta velocidade de processamento. Utilizam lógica de programação, recebendo informações dos transformadores de medidas. Os ajustes são realizados no frontal do relé por meio de uma tecla de membrana e instruções específicas ou por meio de um microcomputador conectado ao painel frontal através de uma conexão serial

RS 232¹⁷. Além das proteções aos circuitos, realizam funções de comunicação, medidas elétricas, controle, sinalização e outros.

A Figura 3.14 representa um relé digital de proteção.

Figura 3.14 – Relé digital.



Fonte: SEL, 2013.

Segundo Mamede Filho (2011), as funções de proteção e manobra são caracterizadas por um código numérico, o qual indica o tipo de proteção do relé. O relé pode ser produzido pra desempenhar apenas uma função, nesse caso chamado de *monofunção*. Há também os relés fabricados para atuar sob vários tipos de eventos, denominados *multifunção*.

A Tabela 3.2 reproduz os aparelhos de proteção e manobra, bem como suas funções e códigos correspondentes. Esse código é aplicado em qualquer projeto no Brasil e em grande porte dos países.

Tabela 3.2 – Nomenclatura dos aparelhos de proteção e manobra

Código	Função	Código	Função
1	Elemento Principal	50	Relé de sobrecorrente
2	Relé de partida ou fechamento temporizado	51	Relé de sobrecorrente-tempo
3	Relé de verificação	52	Disjuntor e corrente alternada
4	Contator principal	53	Relé para excitatriz
5	Dispositivo de interrupção	54	Disjuntor de corrente contínua, alta velocidade
6	Disjuntor de partida	55	Relé de fator de potência
7	Disjuntor de anodo	56	Relé de aplicação de campo
8	Disjuntor desligador de circuito de controle	57	Dispositivo para aterramento ou curto-circuito

¹⁷ RS 232 é um padrão para troca serial de dados binários entre um **DTE** (terminal de dados, de *Data Terminal equipment*) e um **DCE** (comunicador de dados, de *Data Communication equipment*). É comumente usado nas portas seriais dos computadores.

Tabela 3.2 – Nomenclatura dos aparelhos de proteção e manobra (continuação)

9	Dispositivo de reversão	58	Relé de falha de retificação
10	Chave de sequência das unidades	59	Relé de sobretensão
11	Reservada para futura aplicação	60	Relé de balanço de tensão
12	Dispositivo de sobrevelocidade	61	Relé de balanço de corrente
13	Dispositivo de rotação	62	Relé de interrupção ou abertura temporizada
14	Dispositivo de subvelocidade	63	Relé de pressão de nível, fluxo ou gás
15	Dispositivo de ajuste de velocidade ou frequência	64	Relé de proteção de terra
16	Reservado para futura aplicação	65	Regulador
17	Chave de derivação ou de descarga	66	Dispositivo de atuação intermitente
18	Dispositivo de aceleração ou desaceleração	67	Relé direcional de sobrecorrente
19	Contator de transição partida-marcha	68	Relé de bloqueio
20	Válvula operada eletricamente	69	Dispositivo de controle permissivo
21	Relé de distância	70	Reostato eletricamente operado
22	Disjuntor equalizador	71	Reservado para futura operação
23	Dispositivo de controle de temperatura	72	Disjuntor de corrente contínua
24	Reservado para futura aplicação	73	Contator de resistência de carga
25	Dispositivo de sincronização ou conferência	74	Relé de alarme
26	Dispositivo térmico do equipamento	75	Mecanismo de mudança de posição
27	Relé de subtensão	76	Relé de sobrecorrente de corrente contínua
28	Reservado para futura aplicação	77	Transmissor de impulsos
29	Contator de isolamento	78	Relé de medição de ângulo de fase
30	Relé anunciador	79	Relé de religamento em corrente alternada
31	Dispositivo de excitação em separado	80	Reservado para futura operação
32	Relé diferencial de potência	81	Relé de frequência
33	Chave de posicionamento	82	Relé de religamento em corrente contínua
34	Chave de sequência operada por motor	83	Relé de seleção de controle/transferência automática
35	Dispositivo de operação de escovas	84	Mecanismo de operação
36	Dispositivo de polaridade	85	Relé receptor de onda portadora ou fio piloto
37	Relés de subcorrente ou subpotência	86	Relé de bloqueio de segurança
38	Dispositivo de proteção de mancal	87	Relé de proteção diferencial
39	Reservado para futura aplicação	88	Motor auxiliar ou motor gerador
40	Relé de campo	89	Chave separadora
41	Disjuntor de chave de campo	90	Dispositivo de regulação
42	Disjuntor ou chave de operação normal	91	Relé direcional de tensão e potência
43	Dispositivo ou seletor de transferência manual	92	Relé direcional de tensão e potência
44	Relé de sequência de partida das unidades	93	Contator de variação de campo
45	Reservado para futura aplicação	94	Relé de desligamento ou livre de atuação
46	Relé de reversão, balanceamento de corrente de fase	95	Empregado em aplicações não definidas
47	Relé de sequência de fase de tensão	96	Empregado em aplicações não definidas
48	Relé de sequência incompleta	97	Empregado em aplicações não definidas
49	Relé térmico para máquina ou transformador	98	Empregado em aplicações não definidas

Fonte: MAMEDE FILHO, 2011.

Há também uma tabela que é utilizada como complementação da nomenclatura ANSI. Esta tabela é mostrada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Nomenclatura complementar

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

Fonte: MAMEDE FILHO, 2011.

Os relés de proteção são particularizados devido às suas características para determinada aplicação, respeitando os requisitos necessários para cada circuito. As principais

características são: forma construtiva, desempenho, grandezas elétricas, temporização e forma de acionamento.

A seguir será detalhado cada caso:

a) Relés Eletromagnéticos

É constituído basicamente de uma bobina envolvendo um núcleo magnético, e o entreferro é uma peça móvel contendo um contato elétrico atuando sobre um contato fixo, dando continuidade do circuito elétrico. Há também relés providos de êmbolo móvel, que é deslocado pela força magnética de uma bobina (MAMEDE FILHO, 2011).

b) Relés Térmicos

São dotados de elementos térmicos ajustáveis, conhecidos de réplicas térmicas. As correntes do sistema atravessam o relé diretamente ou pelo uso de transformadores de corrente, e através dos elementos térmicos semelhantes às características do equipamento que deve ser protegido, atuam sobre o circuito de alimentação da bobina do disjuntor, desligando o sistema antes de atingir valores acima do permitido (MAMEDE FILHO, 2011).

c) Relés Eletrônicos

Os relés eletrônicos surgiram com a evolução da eletrônica de potência. Atendem todas as necessidades de proteção, sendo competidores diretos dos modelos eletromecânicos. A tecnologia estática apresenta vantagens quanto à compacticidade, precisão nos valores e facilidade de modificação das curvas de operação (MAMEDE FILHO, 2011).

d) Relés Fluidodinâmicos

Os relés fluidodinâmicos utilizam líquidos como elemento temporizador, geralmente óleo de vaselina, possuindo êmbolo móvel que se desloca no interior do recipiente. Embora ainda exista uma enorme quantidade desses relés em operação, não são mais fabricados.

e) Relés de Indução

Conhecidos também como relés secundários, utilizados principalmente na proteção de equipamentos de grande valor econômico.

f) Relés Digitais

São relés baseados em microprocessadores, mantendo os mesmos princípios e requisitos utilizados em relés eletromagnéticos, estáticos ou eletrônicos, mas oferecem novas funções proporcionando maior velocidade, sensibilidade, entre outras. As entradas continuam sendo analógicas e convertidas para sinais digitais através de conversores A/D. Possuem programação inteligente e processam digitalmente os valores medidos e realizam operações lógicas e aritméticas (MAMEDE FILHO, 2011).

Os relés digitais possuem os elementos de indicação e operação indicados abaixo:

- Display alfanumérico
- Teclas
- Funções de proteção
- Funções de medição
- Funções preditivas
- Interface com o processo
- Microprocessadores
- Memória
- Entradas e saídas seriais
- Fonte de alimentação
- Autossupervisão
- Interface Homem-Máquina
- Relatório de falhas

3.3.2 Relés para Proteção de Motores

Nesta seção serão apresentados os principais relés de proteção, bem como os relés que normalmente são utilizados para proteção de motores de média tensão. Atualmente os relés

possuem incorporadas diversas funções, viabilizando a utilização de um menor número de relés.

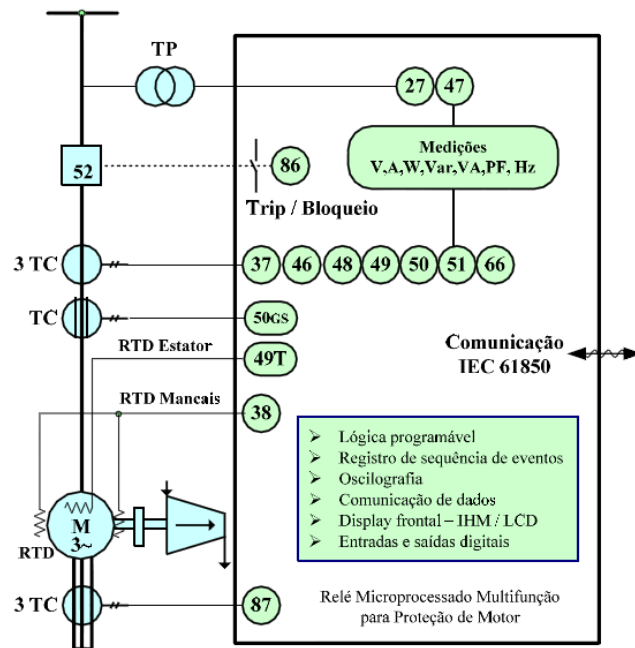
Estudos do IEEE e EPRI comprovam que cerca de 33% das falhas dos motores são elétricas, 31% são mecânicas e 35% são devidas ao ambiente, manutenção, entre outros. Escolher um motor adequado e o ajuste do mesmo ao sistema utilizado são fundamentais para o excelente desempenho do circuito (MARDEGAN, 2013).

As principais funções empregadas na proteção de motores são:

- Função 21: proteção de distância
- Função 23: dispositivo de controle de temperatura
- Função 26: proteção térmica
- Função 27: proteção contra subtensão
- Função 30: dispositivo anunciador
- Função 37: proteção contra perda de carga
- Função 38: proteção de mancal
- Função 40: proteção contra perda de excitação
- Função 46: desbalanço de corrente
- Função 47: proteção de sequência de fase de tensão
- Função 48: proteção contra partida longa
- Função 49: proteção térmica para motor
- Função 50: proteção instantânea de fase
- Função 50GS: unidade instantânea “Ground Sensor”
- Função 51: proteção temporizada de fase
- Função 51N: proteção temporizada de neutro
- Função 51GS: unidade temporizada “Ground Sensor”
- Função 59: proteção contra sobretensão
- Função 59N: proteção contra deslocamento de tensão de neutro
- Função 66: monitoramento do número de partidas por hora
- Função 78: medição do ângulo de fase/perda de sincronismo
- Função 86: relé de bloqueio de segurança
- Função 87M: proteção diferencial de máquina

A Figura 3.15 representa um diagrama de ligação na proteção de um motor trifásico.

Figura 3.15 – Diagrama de proteção de motor trifásico.



Fonte: BULGARELLI, 2013.

a) Relé de Sobrecorrente (50/51)

Mamede Filho e Mamede (2011) consideram as proteções contra as sobrecorrentes básicas para qualquer tipo de motor elétrico. Geralmente são utilizados relés de sobrecorrente de fase na maioria dos projetos de proteção de motores, sendo nesses casos considerado proteção de segunda linha do motor.

Os relés de sobrecorrente de fase devem proteger o circuito contra sobrecargas e correntes de curto circuito. Proteção contra sobrecargas não é tão eficiente para o uso em motores, sendo mais protegido com o uso de proteção de imagem térmica. Da mesma forma, a proteção contra circuitos de fase e de neutro depende do tipo de aterramento do sistema de alimentação do motor.

Esse relé se mostra eficiente em sistemas em estrela com o neutro solidamente aterrado e quando é utilizado um transformador de corrente do tipo janela, por onde passam os cabos de alimentação do motor.

- Unidade temporizada de fase

Os relés de sobrecorrentes utilizam um sistema de tempo inverso longo, permitindo a partida direta dos motores. Para tal, alguns ajustes devem ser realizados, como mostra a equação (3.5):

$$I_{tf} = \frac{K_f \cdot I_{nm}}{RTC} \quad (3.5)$$

sendo:

I_{tf} = ajuste da unidade temporizada de fase

K_f = fator de corrente de fase

I_{nm} = corrente nominal do motor

RTC = relação de transformação do transformador de corrente da proteção

O tempo de atuação da unidade temporizada de fase é dado pela equação (3.6):

$$T = \frac{K \cdot T_{ms}}{M^\alpha - 1} \quad (3.6)$$

sendo:

K = constante de caracterizam do relé

- $K = 0,15$: curva normalmente inversa
- $K = 13,5$: curva muito inversa
- $K = 80$: curva extremamente inversa

T_{ms} = curva de temporização

M = múltiplo de corrente ajustada

α = constante exponencial

- $\alpha = 0,02$: curva normalmente inversa
- $\alpha = 1$: curva muito inversa
- $\alpha = 2$: curva extremamente inversa

- Unidade instantânea de fase

Os ajustes devem ser realizados, como mostra a equação (3.7):

$$I_{reif} > \frac{I_{pm}}{RTC} \quad (3.7)$$

sendo:

I_{reif} = corrente vista pelo relé de fase

I_{pm} = corrente de partida do motor

- Unidade temporizada de neutro

Deve ser selecionada uma corrente de ajuste temporizada de neutro para atuar com a corrente fase-terra, como mostra a equação (3.8):

$$I_{tn} = \frac{K_n \cdot I_{nm}}{RTC} \quad (3.8)$$

sendo:

I_{tn} = ajuste da unidade temporizada de neutro

K_n = fator de corrente de neutro

I_{nm} = corrente nominal do motor

- Unidade instantânea de neutro

Os ajustes devem ser realizados, como mostra a equação (3.9):

$$I_{rein} < \frac{I_{ft}}{RTC} \quad (3.9)$$

sendo:

I_{rein} = corrente vista pelo relé de neutro

I_{ft} = corrente de curto circuito fase – terra

b) Relés diferenciais de corrente (87)

Relés diferenciais tem sido a melhor opção para proteção de motores contra defeitos internos, sendo necessário que os seis terminais do relé possam ser acessados de maneira fácil e prática. O fundamento desta proteção é comparar as correntes elétricas que circulam entre os terminais do equipamento. As correntes são coletadas normalmente por transformadores de corrente. A proteção diferencial não é sensível às correntes de partida elevada, atuando apenas para correntes de defeitos internos do motor, ou seja, sobrecorrentes ou curtos circuitos na rede não ocasionam o seu acionamento (MAMEDE FILHO, 2011).

c) Relé de distância (21)

Motores de grande porte, segundo Mamede Filho (2011), necessitam de relés de distância no seu circuito, com o intuito de proteção contra rotor bloqueado, sendo necessário quando o tempo de partida do motor é superior ao tempo de rotor bloqueado. A tensão no ponto de defeito é praticamente nula, mas a medida que se afasta do ponto de defeito, a tensão tende a aumentar devido à queda de tensão. Os relés de distância fornecem a tensão aplicada em seus terminais, ligados através de TPs, determinando a distância de um trecho qualquer a partir da impedância unitária do condutor utilizado.

d) Proteção utilizando detectores de temperatura

Detectores de temperatura ou sondas térmicas são equipamentos de proteção eficientes contra avarias nos enrolamentos dos motores, sendo usualmente instalados entre as bobinas do estator, sendo fundamentais para que ocorra o acionamento do disjuntor quando temperaturas acima da classe de operação são atingidas.

A maior eficácia deste sistema dá-se quando os detectores são colocados juntamente com o processo de bobinagem, sendo alocados em pontos que realmente refletem a temperatura de operação do motor.

Adicionalmente, os detectores de temperatura podem ser instalados adicionalmente nos mancais, de forma redundante, caso os sensores internos ao bobinamento venham a falhar.

As sondas acionam em geral um alarme sonoro e/ou visual, e caso o problema persista, ocorre o desligamento do disjuntor.

e) Relé de imagem térmica (49)

Normalmente possuem melhor desempenho e segurança que os relés de sobrecorrente. Basta ajustar a curva do relé de característica inversa ligeiramente abaixo a curva de aquecimento do motor.

Os relés de imagem térmica processam a temperatura interna do motor através de um algoritmo, estabelecendo uma grandeza que é comparada ao valor de ajuste do disjuntor.

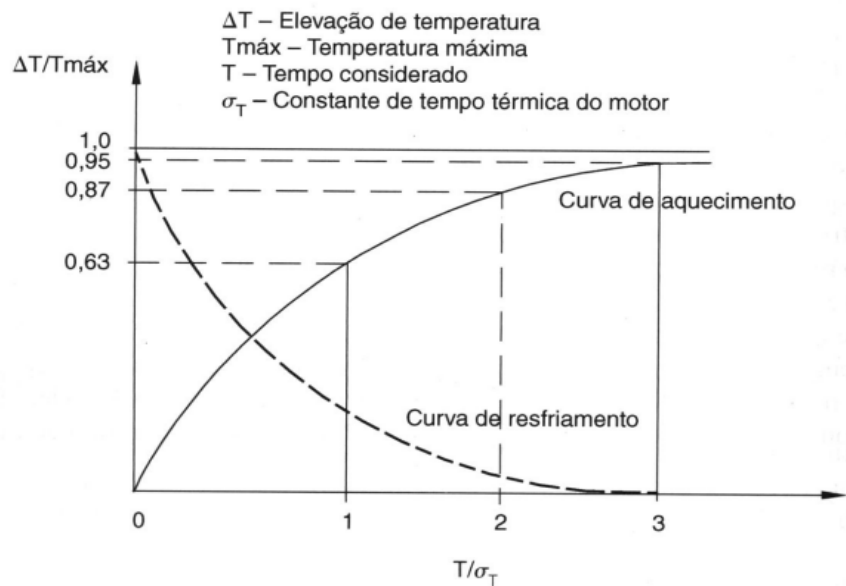
A sobrecarga de um motor é analisada de duas maneiras: ao iniciar o processo de sobrecarga estando a frio e sobrecarga quando motor está quente. A partir disso, duas curvas

são obtidas para a atuação do relé de imagem térmica, sendo a curva de atuação a frio e curva de atuação a quente.

A constante de tempo térmica de aquecimento mostra o valor necessário para que o motor atinja a temperatura máxima de sua classe de temperatura, sem que haja dissipação de calor para o meio exterior.

As curvas de aquecimento e resfriamento do motor são dadas pela Figura 3.16.

Figura 3.16 – Curva de aquecimento e resfriamento de um motor.



Fonte: MAMEDE FILHO, 2011.

Com base nas curvas de tempo x corrente acima mostradas, podem ser calculadas as curvas de tempo de atuação do relé, utilizando as seguintes equações:

- Curva de tempo de atuação do relé para motor a frio

A curva do relé pode ser obtida com a equação (3.10):

$$T_{cf} = 60 \cdot \sigma_a \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{I_{ma}}{I_{nm}} \right)^2}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{nm}} \right)^2 - 1,1} \right] \quad (3.10)$$

onde:

T_{cf} = tempo de atuação do relé com o motor a frio

I_{nm} = corrente nominal do motor

I_{ma} = corrente de sobrecarga

σ_a = constante de tempo térmica de aquecimento do motor

- Curva de tempo de atuação do relé para motor a quente

A curva do relé pode ser obtida com a equação (3.11):

$$T_{cq} = 60 \cdot \sigma_a \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{I_{ma}}{I_{nm}} \right)^2}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{nm}} \right)^2 - 1,1} \right] \quad (3.11)$$

sendo:

T_{cq} = tempo de atuação do relé com o motor a quente

f) Relé de sub e sobretensão (27 e 59)

Uma tensão superior a nominal altera o comportamento operacional de um motor: diminuindo a corrente de plena carga na proporção inversa da tensão, corrente de partida aumenta na proporção direta da tensão, fator de potência diminui e a velocidade do rotor aumenta.

Os motores podem operar com uma tensão de até 110% do valor nominal. Para vários motores de grande porte conectados em um mesmo ponto, um relé de sub e sobretensão são suficientes.

Analogamente, uma tensão inferior a nominal altera o comportamento do motor, provocando: aumento da corrente de plena carga na proporção inversa da tensão, corrente de partida diminui na proporção direta da tensão, fator de potência aumenta e a velocidade do rotor diminui, acarretando em um aumento de temperatura dos enrolamentos do motor.

Relés de subtensão ajustados em 90% da tensão nominal resolvem o problema.

g) Proteção contra rotor bloqueado (51LB)

A corrente de partida direta de um motor varia de 3 a 8 vezes a corrente nominal. Fato que é sempre crítico, ocasionando quedas de tensão elevadas. A fim de evitar transientes durante a partida, são utilizadas chaves estrela-triângulo, chaves compensadoras, softstarters e conversores de frequência.

A seguir são mostrados os casos mais comuns de rotor bloqueado:

- Rotor bloqueado na partida

A partida de um motor exige muito da rede de energia, elevando temperatura do motor como um todo. Mas a processo de partida pode não ter sido completado, parando o rotor, entretanto o motor continua requisitando da rede uma corrente de partida. Se o motor permanecer assim por algum tempo, que varia entre 9 e 15 s, poderá haver danos de origem térmica nos enrolamentos.

O ajuste do relé deve ser igual ou inferior ao tempo de rotor bloqueado, garantindo que o disjuntor atue em caso de falha. Há relés para monitoramento das condições de partida, dados térmicos, constantes de tempo e classes de isolamento.

O tempo de ajuste do relé é dado pela equação (3.12):

$$T_{pm} < T_{ti} < T_{rb} \quad (3.12)$$

onde:

T_{rb} = tempo de rotor bloqueado

- Rotor bloqueado em regime de operação normal

A segunda etapa do motor é o regime de funcionamento normal. Caso a carga mantenha suas condições normais de operação, não há transientes a contabilizar. Entretanto, poderá ser exigido um torque maior por parte do motor, e se este for menor que o torque resistente, o rotor poderá parar.

Nessas condições, recomenda-se o uso de dois relés de sobrecorrentes temporizados. O primeiro atua durante o processo de partida do motor, sendo que após a mesma, ele é reconectado ao sistema de proteção para atuar durante o regime normal. O segundo relé é dedicado à proteção contra rotor bloqueado, estando permanentemente conectado ao sistema de proteção.

h) Proteção contra perda de carga

Há casos em que ocorre a perda repentina do conjugado resistente, devido ao desacoplamento da carga mecânica da máquina. Conclui-se que há perda de carga quando o relé registrar uma corrente fluindo de valor igual ao valor da corrente a vazio do motor.

Para isso ajusta-se o relé da seguinte maneira:

- Ajuste mínimo de perda de carga: $I_{ami} = 1,1 \cdot I_{nm}$
- Ajuste máximo de perda de carga: $I_{ama} = 0,70 \cdot I_{nm}$

Mede-se a corrente no motor quando a carga está desacoplada. Essa corrente é chamada de $I_{mín}$.

Mede-se a corrente de operação do motor I_{op} .

O relé é ajustado para a perda de carga mínima com base na equação (3.13):

$$\delta_{ami} = \frac{I_{mín}}{I_{nm}} \quad (3.13)$$

sendo:

I_{nm} = corrente nominal do motor

$I_{mín}$ = corrente mínima no circuito

O relé é ajustado para a perda de carga máxima com base na equação (3.14):

$$\delta_{ama} = \frac{I_{op}}{I_{nm}} - 0,20 \quad (3.14)$$

sendo:

I_{op} = corrente de operação do motor

O relé atua quando a corrente de carga do motor estiver entre os valores máximo e mínimo.

i) Relé contra desequilíbrio de corrente (46)

Motores de média tensão normalmente são alimentados por uma rede de distribuição ou de transmissão de uma concessionária, as quais possuem proteção tripolar para vários tipos de defeitos. Sabe-se que os motores de médio e grande porte possuem também relés acoplados a disjuntores tripolares. Dificilmente um motor desses operaria com apenas duas fases, mas caso isso venha a ocorrer, o desligamento aconteceria pelo disjuntor.

A corrente de desequilíbrio é dada pela equação (3.15):

$$I_d = \frac{I_{fa} - I_{fb}}{\sqrt{3}} \quad (3.15)$$

sendo:

I_{fa} = corrente na fase A

I_{fb} = corrente na fase B

Utiliza-se ajustar a corrente de desequilíbrio em um valor inferior ao tempo de rotor bloqueado.

j) Relé contra fuga de corrente à terra (51GS)

Proteção de fuga à terra é caracterizada por uma corrente que energiza a carcaça do motor, devido à um defeito de isolamento. Essa corrente pode ser perigosa ao operador da máquina. Geralmente, utiliza-se um transformador de corrente di tipo janela ou toroidal para fuga de corrente. O relé é ajustado em 10% da corrente nominal do motor.

k) Relé Multifunção

Geralmente são relés que incorporam várias funções em uma só unidade. Há os relés multifunção destinados apenas à proteção de motores elétricos. Motores de elevada capacidade, devem ser protegidos por relés que contenham diversas funções inerentes à operação desses motores em diferentes condições.

Relés de proteção de motores elétricos não protegem efetivamente o motor quando o mesmo já esteja danificado por falha de isolamento, cabendo ao relé proteger os condutores de alimentação e reduzir os efeitos em suas partes internas.

As principais funções encontradas nos relés são:

- Proteção de sobrecorrente temporizada
- Proteção de sobrecorrente instantânea
- Proteção de sobrecorrente de falha à terra
- Proteção de sobrecarga térmica
- Proteção de sequência negativa
- Proteção contra subcorrente
- Proteção contra rotor travado
- Proteção contra perda de fase

Para que o usuário consiga visualizar os valores medidos e realizar ajustes de parâmetros, os relés possuem uma saída RS 485, podendo ser utilizada através de um canal remoto.

3.3.3 Transformador de corrente – TC

O transformador de corrente é um equipamento que permite aos instrumentos de medição e proteção funcionar adequadamente, reduzindo a corrente para operar de acordo com o circuito à ele ligado. No primário há poucas espiras, e o secundário possui uma corrente igual a 5 A. Transformadores de corrente constituem-se de um enrolamento primário, um núcleo de ferro e um enrolamento secundário. É possível dividir os transformadores de corrente em dois tipos: para serviço de medição e para serviço de proteção (MAMEDE FILHO, 2013).

A Figura 3.17 ilustra um transformador de corrente para média tensão.

Figura 3.17 – Transformador de Corrente de Média Tensão.



Fonte: KRON, 2013.

Os TCs podem ser classificados da seguinte forma:

- TC do tipo barra

O primário é constituído por uma barra fixada através do núcleo. São muito utilizados em painéis de comando, com a função de proteção e medição.

- TC do tipo enrolado

O primário é constituído por uma ou mais espiras envolvendo o núcleo do transformador.

- TC do tipo janela

Possui uma abertura através do núcleo por onde passa o condutor, atuando como o enrolamento primário.

- TC tipo de bucha

Semelhante ao TC do tipo de barra, porém a instalação é feita na bucha dos equipamentos, tais como transformadores, disjuntores, entre outro, atuando como enrolamento primário.

- TC do tipo de núcleo dividido

Semelhante ao TC do tipo janela, onde o núcleo pode ser separado permitindo envolver o condutor, funcionando como um enrolamento primário.

a) TC para serviço de medição

Transformadores de corrente para medição são utilizados para assegurar a proteção dos aparelhos, tais como amperímetros, medidores de energia, e outros.

A corrente no secundário é limitada a valores que não venham a danificar os aparelhos. Tal corrente é limitada por efeito de saturação, atingindo cerca de quatro vezes a corrente nominal.

Os TCs de medição possuem as características descritas abaixo:

- Corrente secundária nominal

De modo geral, a corrente secundário de um TC é de 5 A.

- Corrente primária nominal

É a corrente de projeto. Adota-se um valor de corrente próximo ao valor da corrente da carga máxima do circuito.

A Tabela 3.4 mostra as correntes nominais dos TCs.

Tabela 3.4 – Correntes nominais primárias dos TCs

Corrente Primária	RTC	Corrente Primária	RTC
5	1:1	300	60:1
10	2:1	400	80:1
15	3:1	500	100:1
20	4:1	600	120:1
25	5:1	800	160:1

Tabela 3.4 – Correntes nominais primárias dos TCs (continuação)

30	6:1	1000	200:1
40	8:1	1200	240:1
50	10:1	1500	300:1
60	12:1	2000	400:1
75	15:1	2500	500:1
100	20:1	3000	600:1
125	25:1	4000	800:1
150	30:1	5000	1000:1
200	40:1	6000	1200:1
250	50:1	8000	1600:1

Fonte: MAMEDE FILHO, 2011.

- Classe de exatidão

Percentual máximo de erro. Normalmente fabrica-se TCs com classes de exatidão igual a: 0,2 – 0,3 – 0,6 e 1,2.

b) TC para serviço de proteção

Transformadores de corrente para proteção são capazes de transformar elevadas correntes de sobrecarga ou curto-circuito em pequenas correntes, permitindo que, relés do tipo ação indireta ou relés secundários, atuem no circuito.

Os TCs de proteção possuem as características descritas abaixo:

- Classe B

São os TCs que o enrolamento secundário apresenta uma reatância que pode ser desprezada. Como exemplos desta classe, pode-se citar: TC com núcleo toroidal, TC de bucha, TC tipo janela.

- Classe A

São os TCs que o enrolamento secundário apresenta reatância que não pode ser desprezada. Nessa classe pode-se enquadrar os demais TCs que não fazem parte da classe A.

- Fator de sobrecorrente

Expressa a relação entre a máxima corrente para que o TC mantenha sua classe de exatidão nominal e corrente nominal. Essa relação pode ser dada pela equação (3.16):

$$I_{np} = \frac{I_{cs}}{F_s} \quad (3.16)$$

sendo:

I_{np} = corrente nominal primária do TC

I_{cs} = corrente de curto circuito simétrica

F_s = fator de sobrecorrente

- Carga admissível

Carga máxima que o secundário do TC suporta, respeitando os limites para a sua classe de exatidão.

A equação (3.17) fornece a carga admissível:

$$Z_{ntc} = \frac{V_{ns}}{I_{ms}} \quad (3.17)$$

sendo:

Z_{ntc} = carga máxima admitida no secundário do TC

V_{ns} = corrente de curto circuito simétrica

I_{ms} = corrente máxima no secundário do TC

TCs devem ser especificados baseando-se em conhecimentos prévios do emprego do equipamento para cada aplicação, sendo usualmente empregado para determinar elevação de temperatura e corrente térmica nominal.

3.3.4 Transformador de Potencial – TP

O transformador de potencial é capaz de reduzir a tensão do circuito para níveis que sejam compatíveis com a tensão máxima suportada pelos aparelhos de medição e proteção. A tensão do primário de um TP é equivalente ao sistema elétrica em que está ligado, e o secundário é padronizado em 115 V. Normalmente utiliza-se conectar um TP entre fases de um sistema ou entre fase-neutro. Alimentam instrumentos de impedância elevada, tais como voltímetros, bobina de potência e medidores de energia (MAMEDE FILHO, 2010).

Os TPs podem ser classificados em:

- Grupo 1

São os TPs projetados para atuarem em ligação entre fases, largamente utilizados em medida industrial de média tensão.

- Grupo 2

São os TPs projetados para atuarem em ligação entre fase-neutro, com sistemas de neutro aterrado com impedância.

A Figura 3.18 representa um TP para média tensão.

Figura 3.18 – Transformador de Potencial de Média Tensão.



Fonte: REHTOM, 2013.

A Tabela 3.5 mostra as tensões primárias.

Tabela 3.5 – Tensões primárias nominais e relações nominais dos TCs

Grupo 1			Grupo 2	
Para ligação de fase para fase			Para ligação de fase para neutro	
Tensão primária nominal	Relação nominal	Tensão primária nominal	Relação nominal	
			Tensão secundária 115/1,73	Tensão secundária de aproximadamente 115 V
115	1:1			
230	2:1	230/1,73	2:1	1,2:1
402,5	3,5:1	402,5/1,73	3,5:1	2:1
460	4:1	460/1,73	4:1	2,4:1
575	5:1	575/1,73	5:1	3:1
2300	20:1	2300/1,73	20:1	12:1

Tabela 3.5 – Tensões primárias nominais e relações nominais dos TCs (continuação)

3475	30:1	3475/1,73	30:1	17,5:1
4025	35:1	4025/1,73	35:1	20:1
4600	40:1	4600/1,73	40:1	24:1
6900	60:1	6900/1,73	60:1	35:1
8050	70:1	8050/1,73	70:1	40:1
11500	100:1	11500/1,73	100:1	60:1
13800	120:1	13800/1,73	120:1	70:1
23000	200:1	23000/1,73	200:1	120:1
34500	300:1	34500/1,73	300:1	175:1
44000	400:1	44000/1,73	400:1	240:1
69000	600:1	69000/1,73	600:1	350:1
		88000/1,73	800:1	480:1
		115000/1,73	1000:1	600:1
		138000/1,73	1200:1	700:1
		161000/1,73	1400:1	800:1
		196000/1,73	1700:1	1700:1
		230000/1,73	2000:1	1200:1

Fonte: MAMEDE FILHO, 2013.

Os TP's possuem as características descritas abaixo:

a) Tensão nominal primária

De modo geral, é a tensão compatível com as tensões de operação do sistema.

b) Tensão nominal secundária

É padronizada em 115 V.

c) Classe de exatidão

Percentual máximo de erro. Normalmente fabrica-se TP's com classes de exatidão igual a: 0,2 – 0,3 – 0,6 e 1,2. Mesmos princípios apresentados para os TCs.

TP's devem ser especificados diferentemente para cada aplicação, sendo usualmente empregado para determinar elevação de temperatura e curto-circuito.

4 ESTUDO DE CASO

Com a base teórica das principais características de funcionamento de um motor elétrico de indução trifásico e seus respectivos dispositivos de proteção, é possível desenvolver uma análise da proteção um motor trifásico de média tensão, acionado por um relé eletrônico convencional ou um conversor de frequência de grande porte.

Será apresentado o relé eletrônico e o conversor de frequência como um todo, tendo como principal foco de análise as proteções presentes no conversor, de modo a assegurar as condições nominais de trabalho do motor, bem como proteger o mesmo e a rede de alimentação de eventuais falhas elétricas.

4.1 Apresentação do Conversor de Frequência

Os conversores de frequência são dispositivos elétricos que convertem a potência da rede alternada em uma tensão de amplitude e períodos variáveis.

A Figura 4.1 mostra o conversor de frequência destinado ao acionamento de um motor trifásico de média tensão.

Figura 4.1 – Conversor de Frequência.



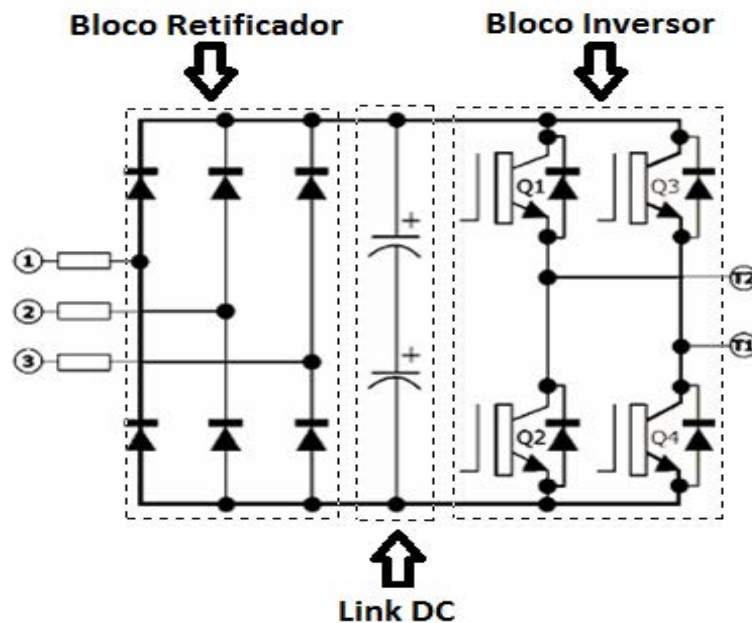
Fonte: SIEMENS, 2013.

Um projeto básico de um Conversor de Frequência possui na entrada o bloco retificador, o circuito intermediário composto de um banco de capacitores eletrolíticos de

filtragem de alta frequência e finalmente o bloco inversor, ou seja, o inversor na verdade é um bloco composto de transistores IGBT dentro do conversor. São usados para acionamentos de motores elétricos de indução trifásicos, em substituição aos rústicos sistemas de variação de velocidade mecânico, tais como polias e variadores hidráulicos, bem como substitui os motores de corrente contínua.

Os componentes do bloco retificador, banco de capacitores e o bloco inversor são mostrados na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Célula de Potência composta por bloco retificador, link DC e bloco inversor.



Fonte: SIEMENS, 2008.

Os conversores de frequência costumam também atuar como dispositivos de proteção para os mais variados problemas de rede elétrica, tais como desbalanceamento entre fases, sobrecarga, queda de tensão, entre outros.

Conversores de frequência de última geração, não somente controlam a velocidade do eixo de motores elétricos, como também, controlam outros parâmetros inerentes ao motor, sendo eles:

- Falta à terra (ANSI 64)
- Perda do sinal do encoder (ANSI 78)
- Sobrecarga de temperatura (ANSI 49)
- Sobretensão (ANSI 59)
- Sobrecorrente instantânea (ANSI 50)

- Desequilíbrio de fase de saída (ANSI 46)
- Torque (ANSI 51C)
- Perda de excitação de campo (ANSI 40)
- Falha de magnetização (ANSI 2/6)

Através da funcionalidade que os microprocessadores incorporaram aos circuitos eletrônicos, os conversores de frequência hoje são dotados de poderosas CPUs ou placas de controle microprocessadas, que possibilitam uma enorme variedade de métodos de controle, de modo a obter domínio total sobre o comportamento do eixo do motor elétrico, permitindo em muitos casos que o motor substitua servo motores em muitas aplicações. Os benefícios são diversos, como redução no custo de desenvolvimento, custo dos sistemas de acionamento, custo de manutenção.

Muitos conversores hoje são dotados de opcionais, os quais permitem que sejam implementadas técnicas de controle de movimento, manipulação de vários eixos de acionamento, posicionamento e sincronismo de velocidade ou sincronismo de posição.

Modernas técnicas de chaveamento da forma de onda de tensão e também da frequência aplicada sobre o estator do motor elétrico, permitem o controle com excelente precisão, sobre o eixo do motor. Uma das técnicas mais conhecidas é o PWM ou "*Pulse Width Modulation*". Tais técnicas são sempre aliadas ao modelamento matemático preciso do motor elétrico. Os conversores de última geração fazem medições precisas e estimativas dos parâmetros elétricos do motor, de modo a obter os dados necessários para a modelagem e consequente controle preciso do motor.

Os Conversores de Frequência, por serem dispositivos dotados comumente de uma ponte retificadora trifásica a diodos, ou seja, trata-se de cargas não lineares, geram harmônicas. Os fabricantes de conversores de frequência disponibilizam filtros de harmônicos já integrados ao produto. Existem várias técnicas para filtragem de harmônicos, que vão desde as mais simples e menos custosas, como indutores na barra DC ou indutores nas entradas do conversor, antes da ponte retificadora, passando pelos retificadores de 12 ou 18 diodos ou pulsos utilizando transformadores defasadores até chegar aos filtros ativos ou retificadores a IGBT, para diminuição ou até mesmo eliminação dos harmônicos tanto de corrente quanto de tensão elétrica.

4.2 Conversor de Frequência e Motor de Indução

A escolha de um motor deve ser feita a partir da análise do tipo de aplicação, ou seja, se o motor será utilizado no ramo de papel, cimento, mineração, marítima, óleo e gás, dentre outros.

Para este estudo de caso, foi utilizado um motor tipo SIEMENS, modelo ILA4, cujas características estão representadas no Quadro 4.1.

O motor faz parte da Fábrica de Conversores de Média Tensão da Siemens, localizada na cidade de Jundiaí-SP, sendo de uso exclusivo para os testes dos conversores e verificação das funcionalidades e proteções.

Quadro 4.1 – Características do Motor ILA4.

Características do Motor H-Compact ILA4	
Potência Nominal	737 [HP] ou 550 [kW]
Número de Pólos	4
Velocidade Nominal	1783 [rpm]
Tensão Nominal	4160 [V]
Corrente Nominal	92 [A]
Fator de Potência	0,86
Frequência	60 [Hz]

Com base na aplicação do motor, é realizada a escolha do conversor, que satisfaça os valores nominais do motor que será acionado. O Quadro 4.2 apresenta as características do conversor de frequência modelo *ROBICON Perfect Harmony GEN 4 Fase 2*, escolhido a partir da referência SIEMENS (2013).

Quadro 4.2 – Características do Conversor de Frequência.

Características do Conversor GEN4 Fase 2	
Potência Nominal	1260 [HP]
Tensão Nominal de Entrada	4160 [V]
Tensão Nominal de Saída	4160 [V]
Corrente Nominal	200 [A]
Tensão de Controle	380 [V]

A Figura 4.3 ilustra o motor de indução trifásico que foi utilizado durante o teste do conversor.

Figura 4.3 – Motor de Indução Trifásico SIEMENS modelo H-Compact ILA4.



Fonte: SIEMENS, 2013.

4.3 Proteções de Motores contidos no Conversor de Frequência

O conversor de frequência escolhido como base para este trabalho possui várias proteções relacionadas ao motor de indução, fornecendo como resposta alarmes e falhas.

Para que fosse possível efetuar o estudo do comportamento do motor durante o funcionamento do conversor de frequência, foi realizado o acompanhamento de um teste operacional do conversor, onde a seguir serão descritos os procedimentos e medições realizadas.

4.3.1 Circuito de Controle e Parametrização do Conversor

Como descrito anteriormente, os conversores atuais possuem um sistema de controle, o qual realiza a análise dos dados enviados pelo motor, e compara com os parâmetros pré-determinados para o motor em questão. De forma a explicar esse sistema, os componentes que compõe as etapas de controle, serão detalhados.

O diagrama mostrado pela Figura 4.4 representa de modo simplificado as conexões de entrada e saída do conversor.

A tensão de entrada, antes de chegar ao transformador de entrada do conversor, o qual tem a função de *Transformador Isolador*¹⁸ e *Abaixador*¹⁹, passa por Resistores Atenuadores, representados por IATTA, IATTB, IATTC e Transformadores de Corrente, representados por CT1 e CT2.

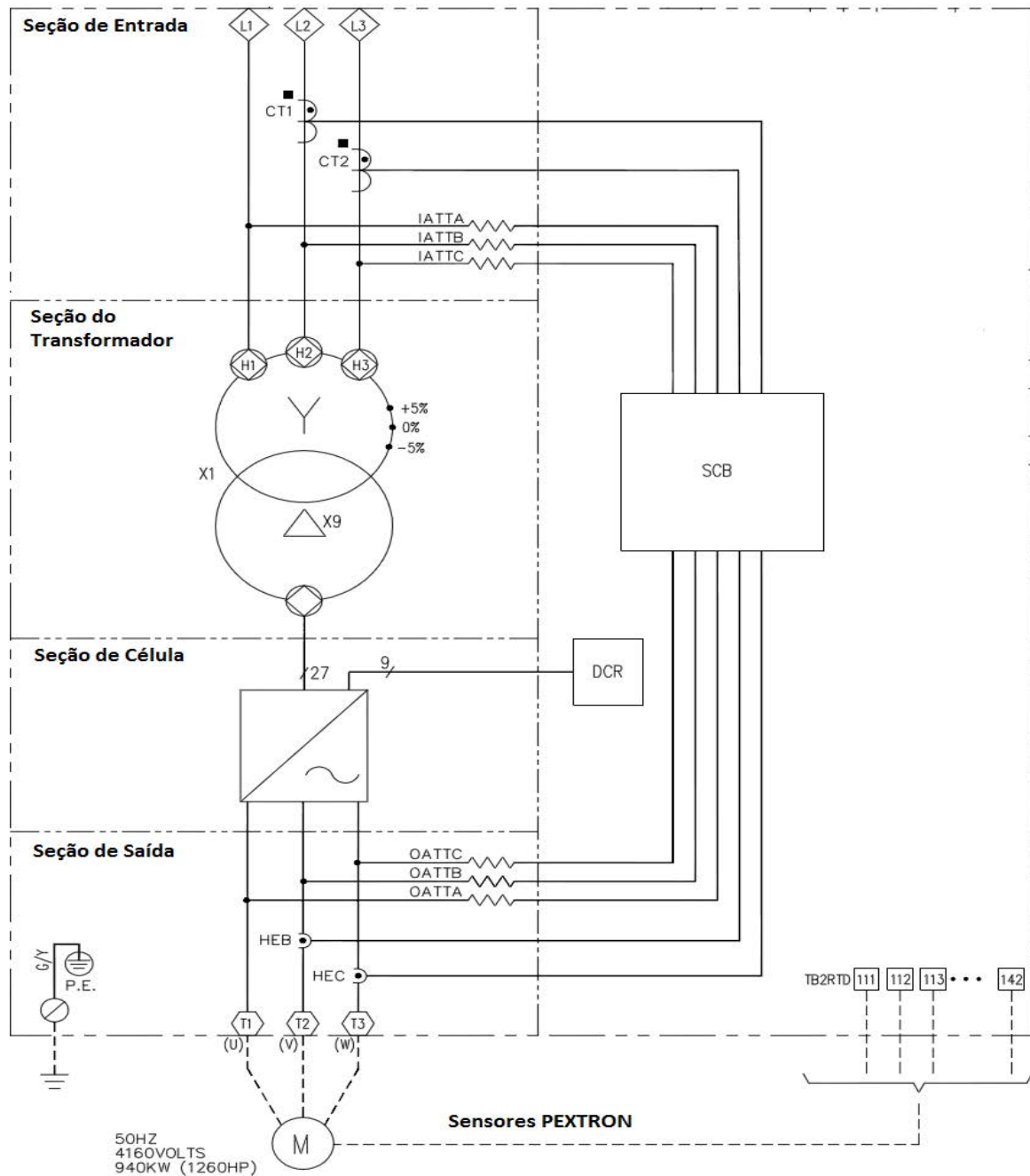
Os Resistores Atenuadores de entrada são elementos fixos utilizados para baixar a tensão, diminuindo a amplitude do sinal, para permitir medições ou proteger o dispositivo de medição, de níveis de sinais que possam vir a danificá-lo. O Transformador de Corrente é um dispositivo que reproduz no seu circuito secundário a corrente que circula em um enrolamento primário com sua posição vetorial substancialmente mantida, em uma proporção definida, conhecida e adequada. Os transformadores de corrente são utilizados em aplicações de alta tensão (situações essas onde circulam, frequentemente, altas correntes), fornecendo correntes suficientemente reduzidas e isoladas do circuito primário de forma a possibilitar o seu uso por equipamentos de medição, controle e proteção.

Ambos enviam essas informações à *Placa de Condicionamento de Sinais* (SCB). A SCB, devido à ampla gama de tensões e correntes de entrada e também aos perigosos níveis de sinais de entrada e saída, tem função de condicionar os sinais em formatos apropriados para serem lidos pela placa de controle.

¹⁸ O *Transformador Isolador* possui a característica de manter no secundário a tensão que recebe no enrolamento primário, ou seja, se uma tensão de 4160 V é adicionada ao primário do transformador isolador, teremos em seu secundário os mesmos 4160 V. Este tipo de transformador isola a tensão do secundário em relação ao primário proporcionando o isolamento físico entre os enrolamentos e, principalmente, a redução de ruídos no secundário.

¹⁹ O *Transformador Abaixador* realiza o rebaixamento da tensão presente no enrolamento primário do transformador. Este processo de transformação é possível em função do transformador possuir um número de espiras inferior no enrolamento secundário, fazendo com que a indução magnética seja menor, causando respectivamente a redução da tensão elétrica. No caso do conversor utilizado neste estudo, o transformador de entrada realiza a redução da tensão de 4160 V para 750 V, que é utilizada pelas células de potência.

Figura 4.4 – Diagrama de Conexão Geral do Conversor



Fonte: SIEMENS, 2013.

Os dados, após serem analisados pela SCB, são enviados ao *Rack de Controle Digital* (DCR), que pode ser chamado de cérebro do conversor, onde são realizadas as análises dos sinais de corrente e tensão.

O DCR é composto principalmente pela placa de controle *Next Generation Control* (NXG). Este controle possui a função de monitorar as condições de potência de entrada e status, coordena todos os componentes de potência, controla a potência de saída do motor,

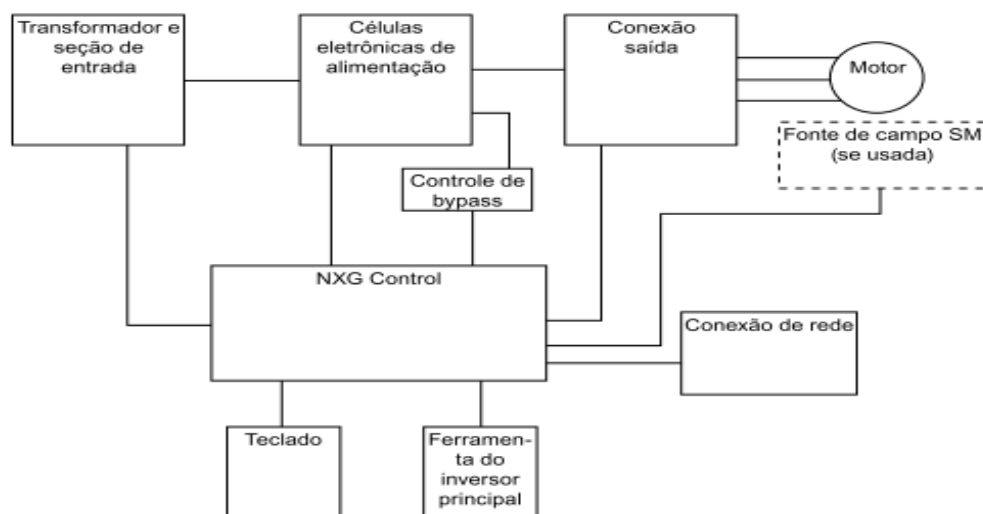
assim como também tem a função de proteger o inversor, o processo do sistema e o motor. É composto por diversas placas de controle, tais como:

- Placas de comunicação
- Placa de transição
- Placa de condicionamento do sinal
- Placa de transição
- Placa do modulador digital
- Placa de interface de fibra ótica
- Placa do adaptador do teclado.

Os parâmetros de controle são introduzidos pelo teclado, e serão comparados com as informações de entrada e de saída do conversor.

A Figura 4.5 detalha as conexões entre o controle NXG e os demais componentes do conversor.

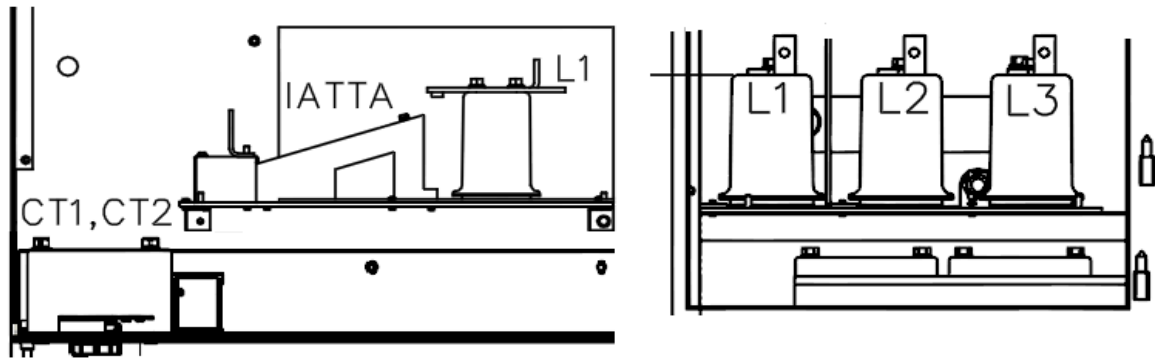
Figura 4.5 – Controle NXG.



Fonte: SIEMENS, 2009.

A Figura 4.6 representa a maneira como os resistores de atenuação e transformadores de corrente estão posicionados dentro do conversor.

Figura 4.6 – Resistores de Atenuação e Transformadores de Corrente



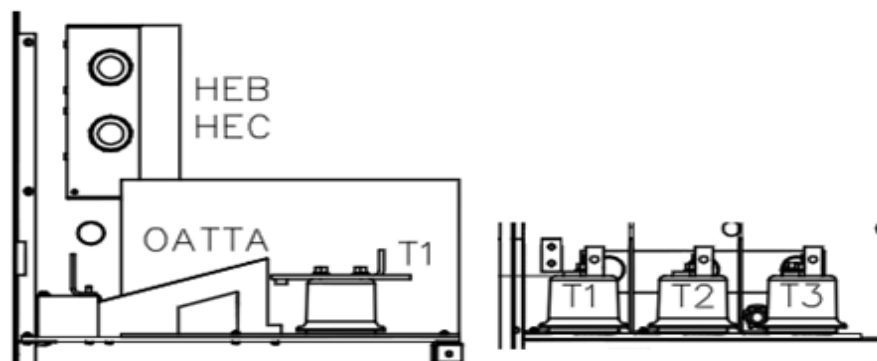
Fonte: SIEMENS, 2013.

Da mesma forma, a tensão de saída, antes de chegar ao motor, passa por Resistores Atenuadores, representados por OATTA, OATTB, OATTC e Sensores de Efeito Hall, representados por HEB e HEC.

O Sensor de Efeito Hall é um transdutor que varia sua tensão de saída em resposta a um campo magnético, ou seja, o condutor ao ser percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético proporcional a esta corrente, permitindo que o sensor, sem interromper o circuito, seja capaz de realizar a medição do valor da corrente que percorre o condutor. Os sinais obtidos pelo atenuador e pelo sensor são novamente enviados à placa SCB, os quais são novamente tratados de forma a ser possível serem utilizados pelo controle NXG, durante o processo de verificação dos parâmetros relacionados ao motor.

A Figura 4.7 representa de como os resistores de atenuação e sensores de efeito hall estão posicionados dentro do conversor.

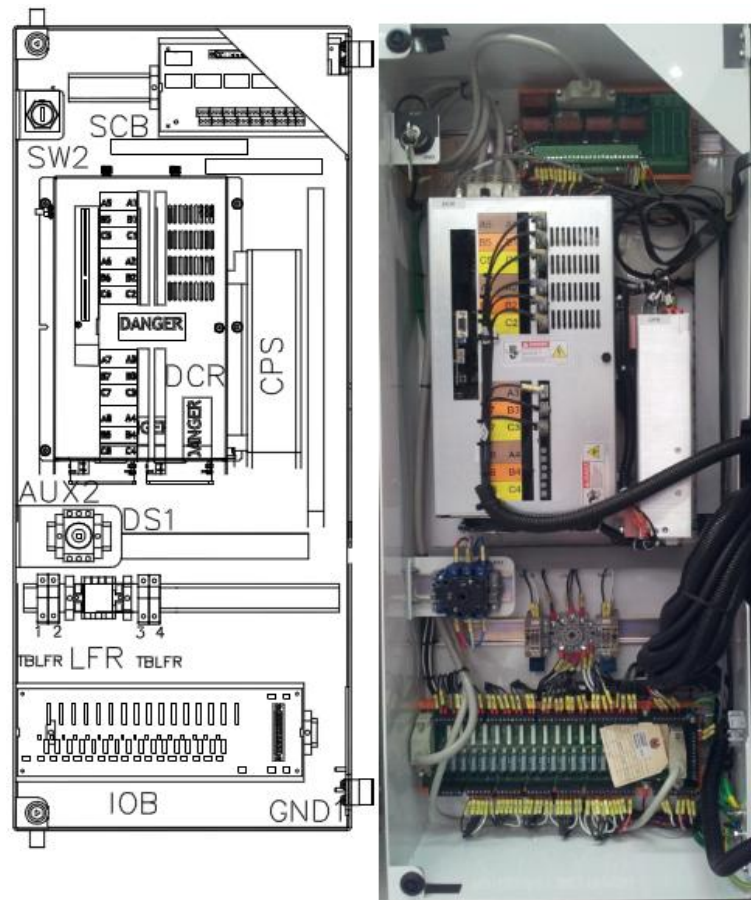
Figura 4.7 – Resistores de Atenuação e Sensores de Efeito Hall



Fonte: SIEMENS, 2013.

A Figura 4.8 representa o esquemático de projeto e uma imagem de como o DCR está posicionado dentro do conversor.

Figura 4.8 – Caixa de Controle.

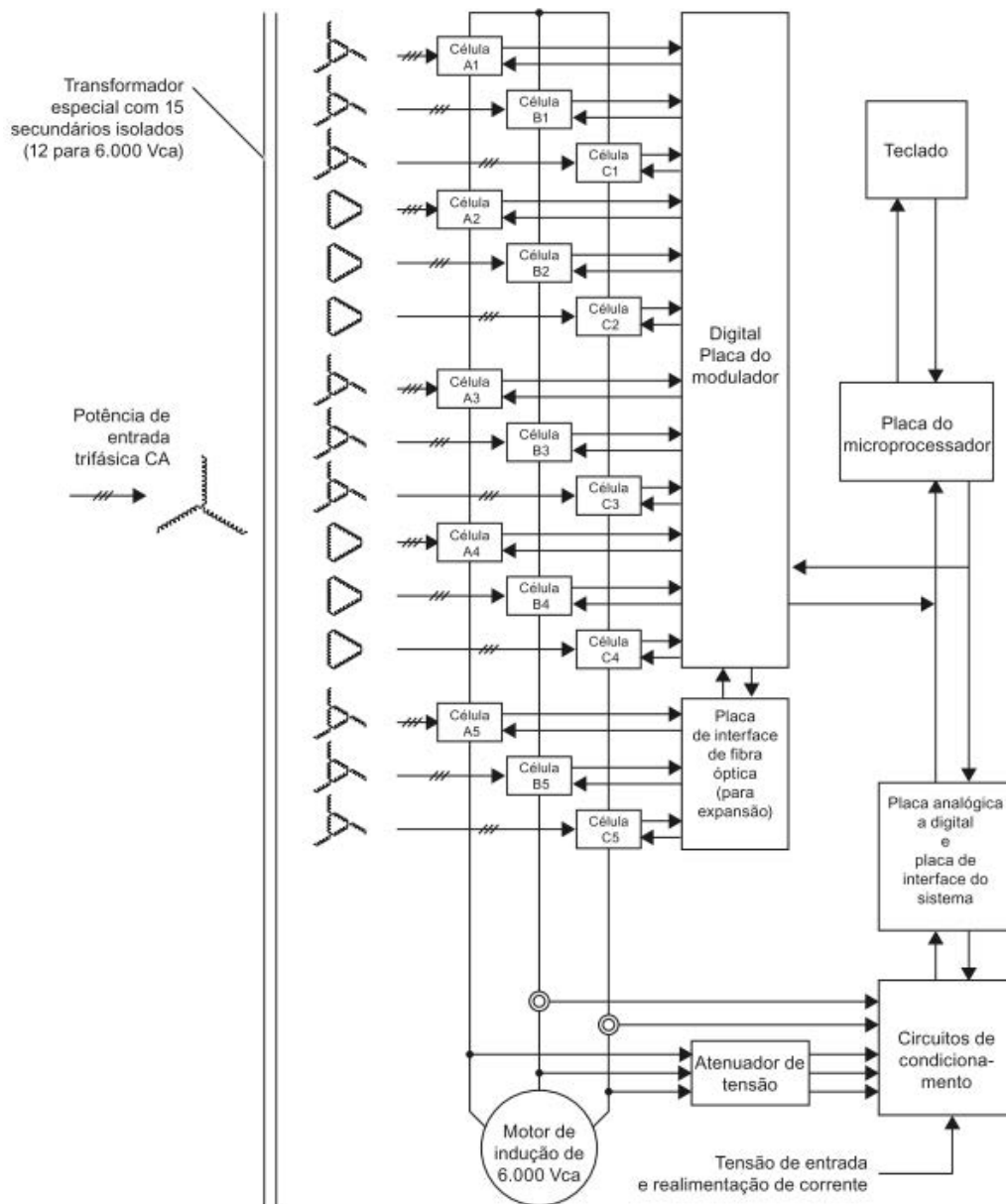


Fonte: SIEMENS, 2013.

O diagrama de blocos na Figura 4.9 mostra a implementação do Sistema de Controle. O Sistema de Controle é composto dos seguintes blocos funcionais: Interface e condicionamento do sinal, um conversor A / D, um processador, um modulador digital e interfaces de Fibra Óptica.

A interface do sinal processa a realimentação dos sinais lidos pelo conversor. Estes circuitos escalam e filtram os sinais de retorno antes de passá-los ao conversor A/D. Provisões estão incluídas para interfacear um sinal para parada de emergência.

Figura 4.9 – Diagrama de Blocos para estrutura de controle.



Fonte: SIEMENS, 2012.

A função do conversor A/D é amostrar as tensões e correntes na entrada e saída e convertê-las em sinais digitais para o processador. A taxa de amostragem varia de 3 kHz e 6 kHz e é uma função da frequência da portadora (que é também a frequência de comutação dos IGBTs), e do número de células "disponíveis" no sistema. O Modulador Digital gera o sinal para os conversores A/D para iniciar a amostragem. Uma vez que os conversores A/D terminarem a amostragem, eles fornecem uma interrupção para que o processador comece o seu ciclo de cálculo.

O processador realiza todas as funções de controle do motor e gera comandos de tensão trifásicos para o modulador digital. Além disso, ele monitora as tensões e as correntes de entrada para fornecer funções de medição (como o fator de potência, potência de entrada e cálculo dos harmônicos), proteção de entrada (perdas excessivas, excesso de corrente reativa, sub-tensão, e falta de fase), e a magnitude da tensão de entrada, frequência e ângulo de fase para transferência síncrona.

O modulador digital contém registros que são usados para comunicação com o processador. Para cada comando de tensão de fase, o processador escreve dois valores para o modulador. O primeiro para o instante atual e o segundo para o momento que é extrapolado para a metade do período de amostragem. Um incremento de tensão, ou passo correspondente a estes valores, bem como o número direto dos passos entre os valores, também são escritos para o modulador. Esses comandos de fase são escritos pelo processador uma vez a cada período de amostragem.

O modulador gera um conjunto de sinais de sincronismo que fazem com que o software de controle envie uma amostra dos sinais e executem os algoritmos de controle e monitorização. Estes sinais são usados para transmitir informação para as células simultaneamente, uma vez a cada 9-11 microssegundos. Este tempo, que é determinado pelo processador, é baseado na configuração do conversor, e é fixo para uma determinada configuração. Entre cada período de transmissão, o modulador faz interpolações, geração das portadoras de fases deslocadas, modulação por largura de pulso (PWM) e comunicação com as células. Os comandos PWM resultantes para cada célula, juntamente com o modo de operação, é montado como um pacote de dados que são transmitidos a cada célula através de interfaces de fibra ótica dedicadas. Em resposta aos dados transmitidos, os moduladores recebem um pacote de dados similares de cada uma das células. A mensagem de resposta das células contém os bits de status que são decodificados pelo modulador e transmitidos ao processador.

Toda a transmissão é verificada pela integralidade e paridade. Se for detectado um erro, uma falha de link é gerada. O pacote de dados enviado para as células de potência fornece informação do modo operacional e da comutação. Os circuitos de comunicação locais, em cada célula, operam como escravos para o modulador. Os circuitos de controle local em cada célula convertem a informação recebida em pulsos de disparo para os IGBTs.

O pacote de retorno ecoa o modo de operação e o estado das células. Se uma célula individual entrar em modo de bypass, o modulador comanda que todas as células de potência desativem suas saídas na próxima mensagem para as células.

4.3.2 Relé Eletrônico para Proteção de Motor Trifásico de Média Tensão

A maneira mais usual de realizar a proteção de um motor trifásico é utilizando um relé eletrônico multifunção, o qual engloba diversas funções de proteção, as quais antes eram utilizadas separadamente.

O relé que foi utilizado como exemplo para proteção e monitoramento de motores é mostrado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Relé Eletrônico Multifunção para proteção de motores



Fonte: SEL, 2013.

O relé propicia uma proteção completa para motores de indução, combinada com monitoramento, emissão de relatórios e controle. Cada tipo de motor e rede de alimentação são os responsáveis por definir o relé a ser utilizado, sendo que um grande fator de escolha é a capacidade de proteção, pois os motores utilizados em média tensão possuem valores elevados, bem como as cargas e aplicações em que estão sendo utilizados.

De forma a realizar um comparativo entre relé multifuncional e conversor de frequência, a seguir serão descritas as principais funções de proteção presentes no relé, além de vantagens e desvantagens de se utilizar este equipamento.

1) Proteção Térmica do Motor – ANSI 49

O relé possui um elemento térmico que faz uma varredura dos efeitos do aquecimento do motor, causado por travamento de rotor, sobrecarga, entre outros.

2) Proteção Térmica do Motor via RTDs – ANSI 49T

Entradas opcionais para monitoração de RTDs complementam a proteção térmica, incluindo medições diretas da temperatura para proteção dos enrolamentos do motor, bem como dos mancais e da carga. Essa função é similar à proteção oferecida pelo *Pextron*.

3) Sobrecorrente instantânea – ANSI 50

Elementos de sobrecorrente permite que o relé detecte faltas causadas por curto circuito no cabeamento e no motor. Há um ajuste para trip instantâneo ou usar temporização em condições de curto.

4) Proteção Perda de Carga – ANSI 37

Essa função engloba perda de aceleração causada pela carga e perda de carga. É gerado um alarme e consequente trip, quando a condição é detectada. Protege contra partidas frequentes, evitando sobreaquecimentos.

5) Desbalanço de Corrente – ANSI 46

Possui um elemento que atua quando há falta de fase ou desbalanceamento de corrente. A proteção de fase reversa detecta a rotação de fases do motor e atua após um determinado período de tempo.

6) Sobretensão – ANSI 59

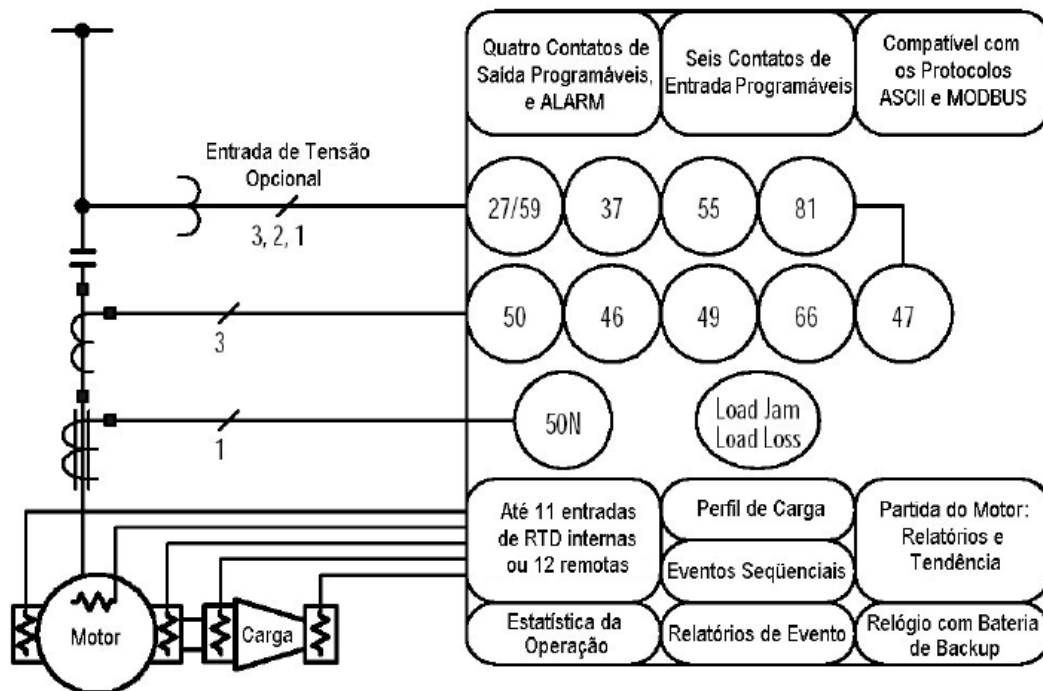
É possível configurar tensão fase-fase, tensão fase-neutro, tensão delta-aberto e conexão estrela a quatro fios. Há um monitoramento dos valores de tensão e comparadas aos parâmetros estabelecidos, ocorrendo alarme ou falha.

7) Subtensão – ANSI 27

Da mesma maneira como existe um monitoramento para os limites superiores de tensão, ocorre o controle dos valores mínimos de operação do motor, havendo alarme ou falha, caso esse valores sejam atingidos.

Para melhor entender a maneira como o relé é conectado à rede e ao motor, a Figura 4.11 exemplifica as conexões e as funções ANSI presentes no relé multifunção.

Figura 4.11 – Esquemático de conexão relé-motor.



Fonte: SEL, 2013.

O relé multifunção da SEL, quando se trata de proteção de motores, pode ser considerado uma solução eficiente. O custo do relé, se comparado a outras soluções, é realmente muito atrativo, e dependendo de onde será utilizado, acaba sendo uma grande aquisição.

Segundo o site da *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL), o valor para venda do relé SEL-710 é de \$2.500,00 ou R\$5.900,00 (Novembro, 2013).

Embora seja uma ótima relação custo-benefício, quando se trata de motores de alto valor e aplicações que movimentem cargas que, caso haja interrupção do processo, as perdas são enormes, existem outros tipos de proteção mais eficientes.

4.3.3 Teste do Conversor de Frequência com Motor Trifásico de Média Tensão

Nesta seção será mostrado passo a passo os procedimentos de teste do conversor de frequência.

Existe um plano de teste para o conversor, o qual alguns procedimentos são realizados e seguidos na seguinte ordem:

- a) Inspeção Visual
- b) Teste de Isolamento e Hipot
- c) Energização de Controle
- d) Teste do Sistema sem Motor
- e) Teste do Sistema com Motor
- f) Teste do Sistema com Carga
- g) Inspeção Final
- h) Equipamentos Utilizados

Neste capítulo foi dada ênfase no Teste com Sistema com Motor e Teste do Sistema com Carga.

Inicialmente conecta-se o conversor à rede, e o motor ao conversor com cabos apropriados para os valores de tensão e correntes. O sistema de controle do conversor é energizado.

Os parâmetros relacionados aos valores e características nominais do motor são introduzidos no Menu do circuito de controle. Os principais são:

- Potência – *Parâmetro: ID 1010*
- Frequência – *Parâmetro: ID 1020*
- Tensão – *Parâmetro: ID 1040*
- Corrente total – *Parâmetro: ID 1050*

Como exemplo, a Figura 4.12 mostra alguns parâmetros utilizados para o motor, bem como os respectivos valores utilizados como referência.

Figura 4.12 – Parâmetros do motor SIEMENS modelo ILA4.

Motor	1	0 00
Motor parameter	1000	0 00
Motor frequency = 60.0 Hz	1020	5 10
Full load speed = 1780 rpm	*1030	5 10
Motor voltage = 4160 V	*1040	5 10
Full load current = 200.0 A	*1050	5 10
No load current = 25.0 %	*1060	5 00
Motor kw Rating = 940.0 kw	*1010	5 10
Leakage inductance = 16.0 %	1070	5 00
Stator resistance = 0.10 %	*1080	5 00
Inertia = 30.0 Kgm2	*1090	5 00

Fonte: SIEMENS, 2013.

Esta parte inicial do teste verifica a conexão e operação dos Transformadores de Corrente e Atenuadores de entrada, Sensor de Efeito Hall e Atenuadores de Saída.

A Figura 4.13 mostra os TCs presentes no conversor.

Figura 4.13 – Transformador de Corrente.



Fonte: SIEMENS, 2013.

A Figura 4.14 apresenta os transdutores de corrente.

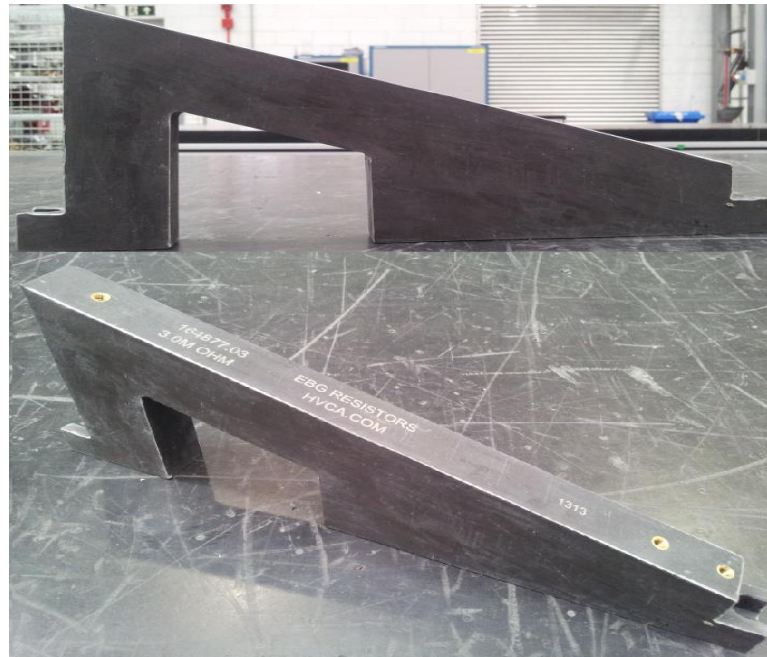
Figura 4.14 – Transdutor de corrente por Efeito Hall.



Fonte: SIEMENS, 2013.

A Figura 4.15 mostra os resistores atenuadores.

Figura 4.15 – Resistor Atenuador de 3,0 MΩ.



Fonte: SIEMENS, 2013.

Verificado as conexões dos transdutores, altera-se o modo de controle, utilizando o parâmetro ID 2050 para *Open Loop Vector Control*²⁰. Esse parâmetro realiza a medição do fluxo para máquinas indutivas, o qual relaciona a velocidade rotacional do motor baseado em medições de corrente de saída do conversor e as utiliza como feedback.

A Figura 4.16 representa os parâmetros utilizados para o conversor, e seus respectivos valores.

Figura 4.16 – Parâmetros de Modo de Controle.

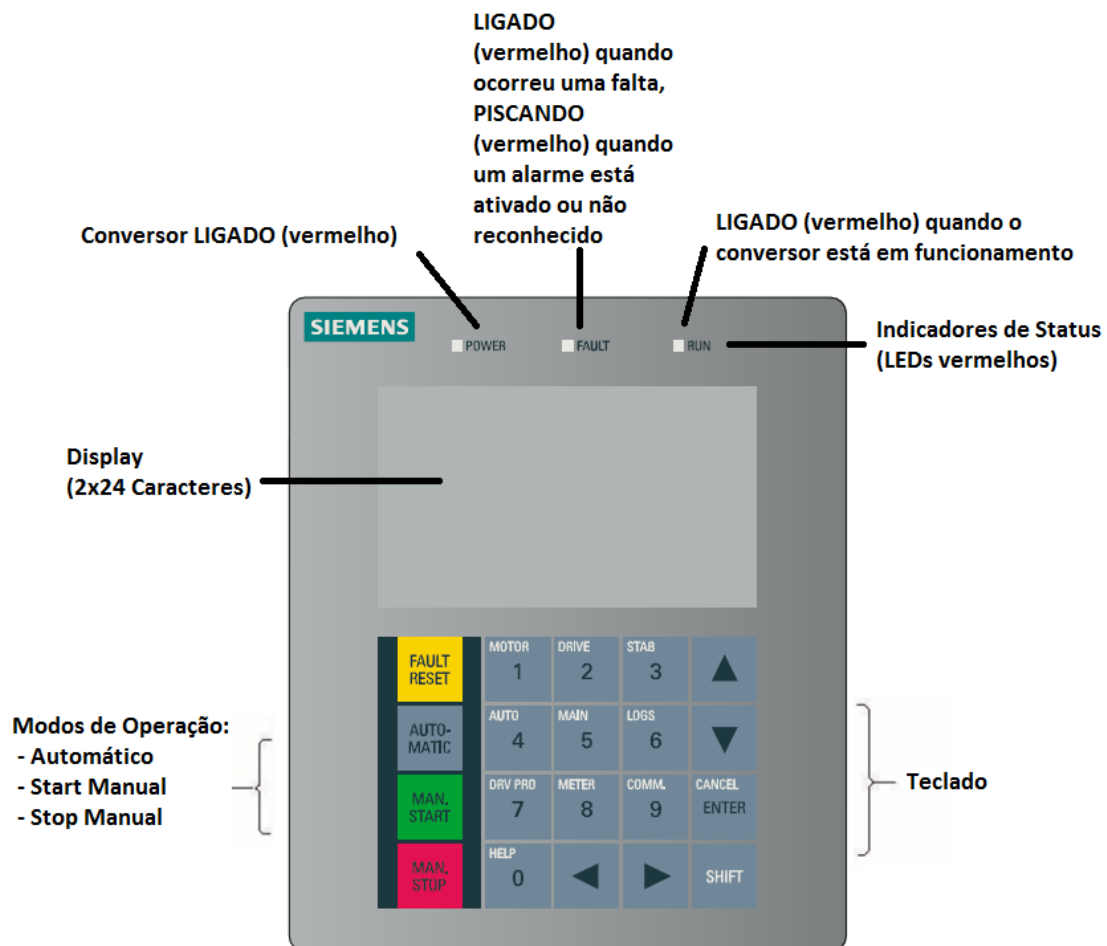
Drive	2	0 00
Drive parameters	2000	0 00
Rated input voltage = 4160 V	*2010	7 10
Rated input current = 155.0 A	*2020	7 10
Rated output voltage = 4160 V	*2030	7 10
Rated output current = 200.0 A	*2040	7 10
Control loop type = OLVC	*2050	7 10
Parallel system = Disable	2051	0 00

Fonte: SIEMENS, 2013.

²⁰ *Open Loop Vector Control* ou Controle Vetorial em Malha Aberto, também conhecido como Controle Vetorial sem Tacômetro. OLVC é um controle do vetor de fluxo que é um dos seis modos de controle do inversor NXG. O inversor calcula a velocidade de rotação do rotor e usa-o para realimentação de velocidade.

O conversor é energizado com média tensão, e o botão de *Fault Reset* presente no teclado é acionado uma vez para limpar e reiniciar qualquer falha anterior, e é acionado uma segunda vez para reconhecer qualquer alarme. O modelo de teclado utilizado nos conversores é mostrado na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Keypad do Conversor.



Fonte: SIEMENS, 2009.

O teclado é utilizado para monitorar uma variedade de parâmetros, sendo os principais descritos a seguir:

- Potência de saída [kW]
- Corrente de saída [A]
- Tensão de saída [V]
- Eficiência do conversor
- Torque do motor [Nm]

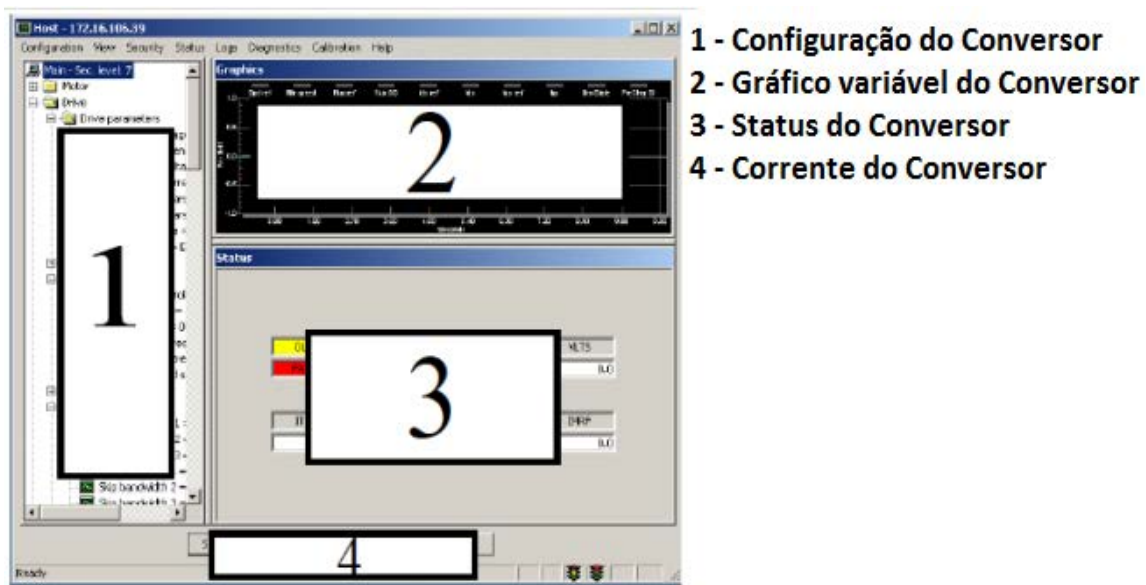
- Velocidade do motor [RPM]
- Corrente de magnetização [A]
- Corrente de torque [A]

O display é configurado de modo a mostrar a corrente de magnetização do motor, corrente de torque do motor e tensão do motor.

Para visualizar as diversas funções, e fornecer ao usuário uma visão simples das curvas de tensão, correntes, velocidade, utiliza-se um software chamado NXG Drive Tool.

A Figura 4.18 representa a tela padrão do software.

Figura 4.18 – NXG Drive Tool.

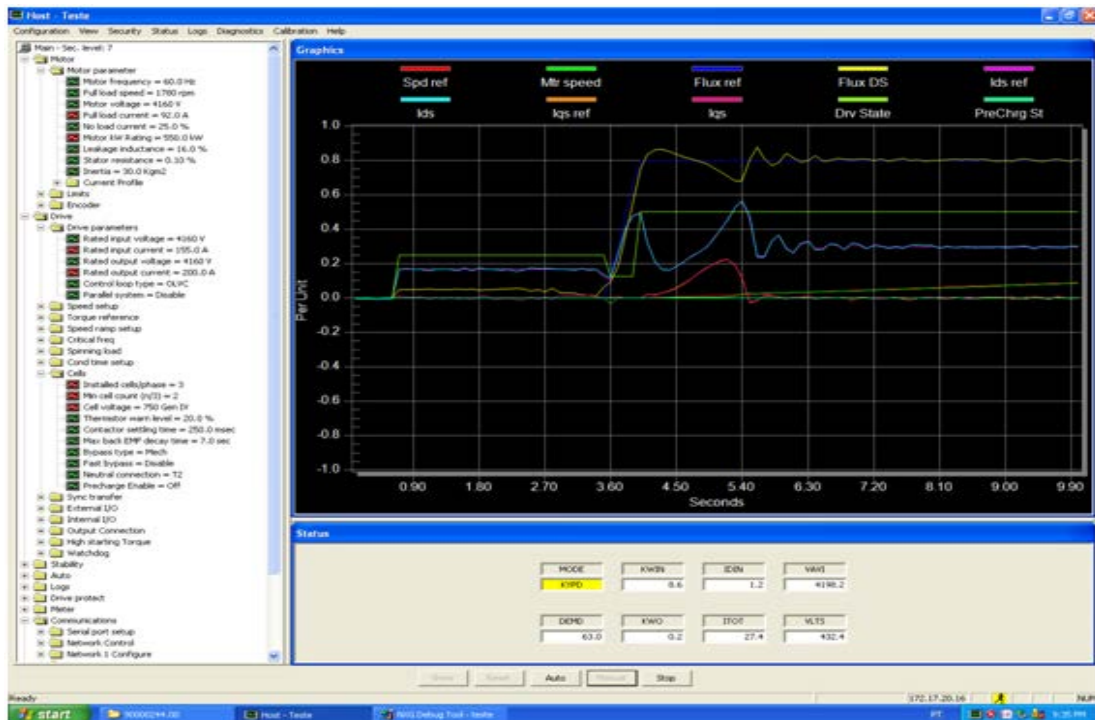


Fonte: SIEMENS, 2010.

Inicia-se a energização do motor, sendo que a velocidade e tensão são gradativamente aumentadas, até que a tensão nominal seja atingida.

O gráfico de tensão, corrente, velocidade, parâmetros utilizados na configuração inicial e os valores de corrente e tensão de entrada e saída do conversor são mostrados na Figura 4.19, de modo a exemplificar o comportamento do motor durante a partida.

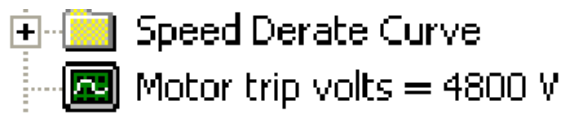
Figura 4.19 – Gráficos durante a partida do motor.



Fonte: SIEMENS, 2013.

Em continuação ao procedimento de teste, o parâmetro *Motor Trip Volts* é colocado a um valor de 120% do valor da tensão nominal do motor, sendo mostrado na Figura 4.20.

Figura 4.20 – Parâmetro Motor Trip Volts.

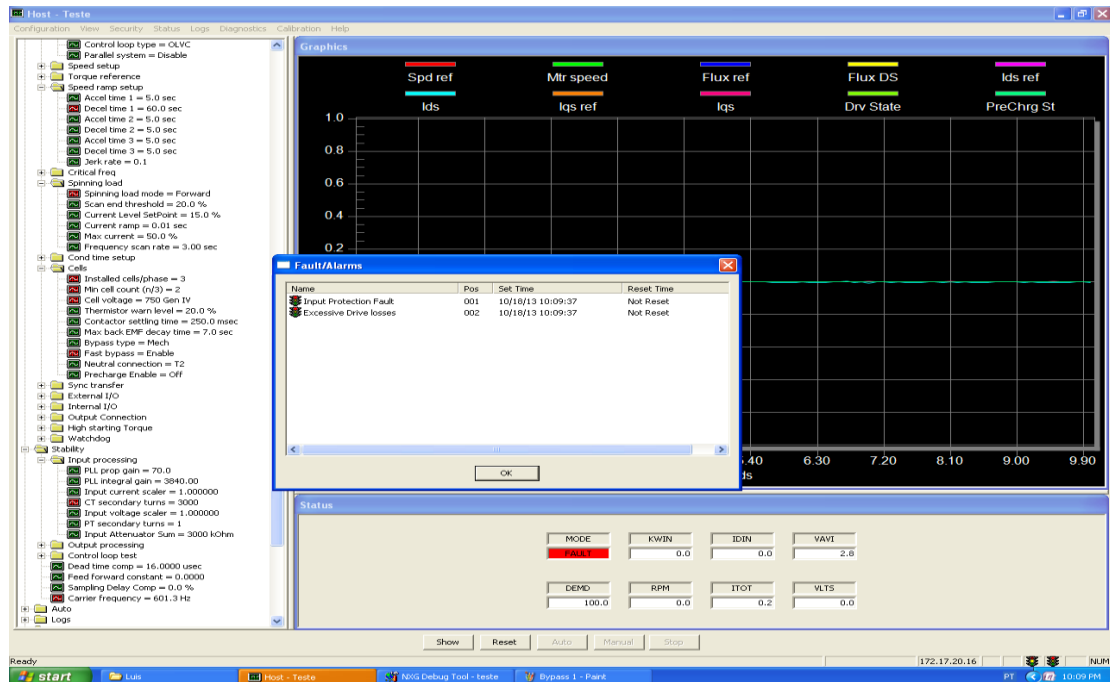


Fonte: SIEMENS, 2013.

Altera-se a entrada do transformador de corrente, determinado pelo parâmetro ID 3035, com o intuito de causar uma falha no motor por “*Excessive Drive Losses*”, ou seja, *Excesso de Perdas do Conversor*.

A partir da Figura 4.21 é possível visualizar que quando ocorre esta falha, tanto a alimentação do conversor quando do motor são desabilitadas, ou seja, o motor passa a estar desligado.

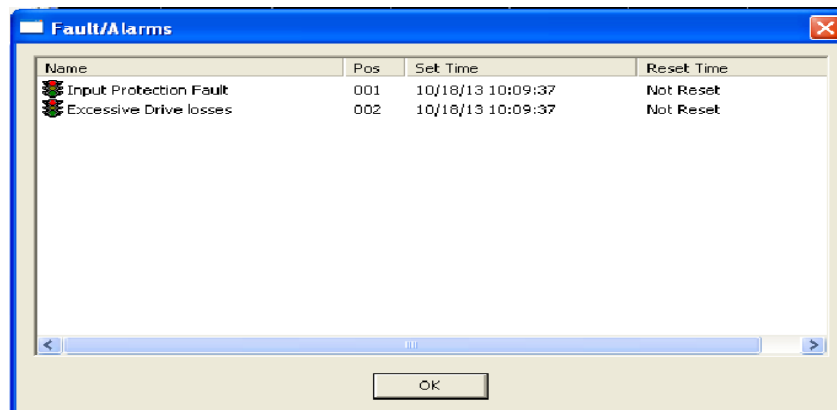
Figura 4.21 – Falha na saída do Conversor por Excesso de Perdas.



Fonte: SIEMENS, 2013.

Quando ocorre a falha por *Excesso de Perdas*, uma mensagem de erro é mostrada pelo conversor. A Figura 4.22 exemplifica a maneira como o aviso de falha é mostrado.

Figura 4.22 – Mensagem Falha Conversor.



Fonte: SIEMENS, 2013.

Como uma falha ocorreu, para reiniciar o drive, é necessário utilizar o botão *Fault Reset*, voltando ao estado inicial e pronto para ser iniciado.

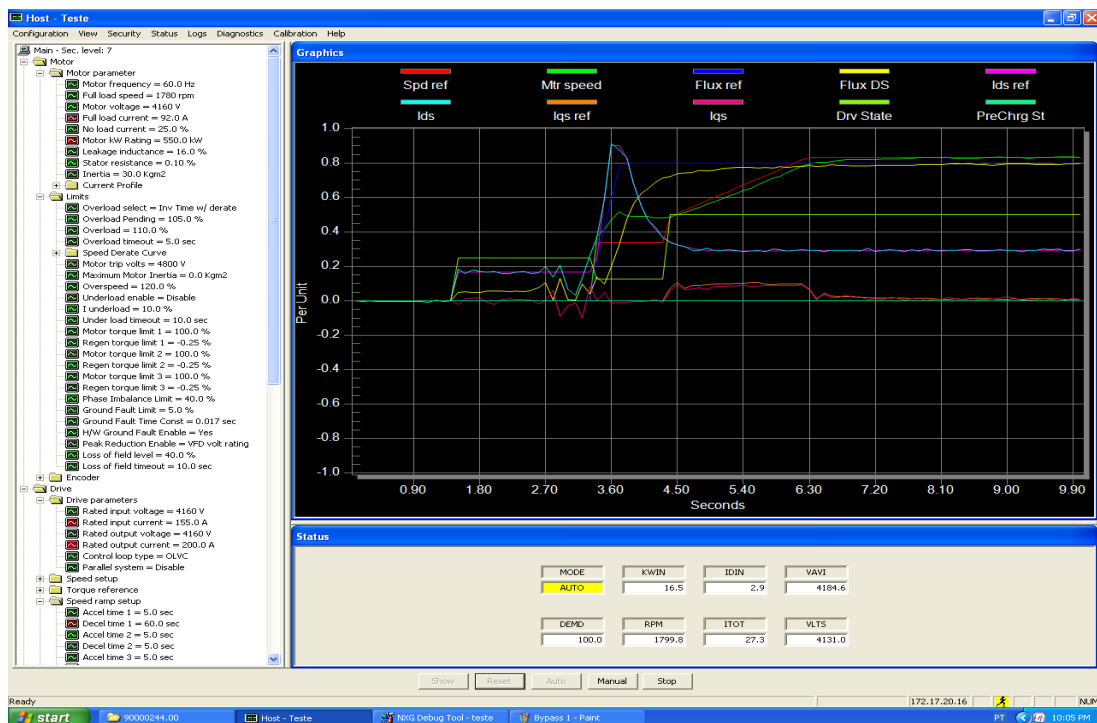
Reiniciado o motor, agora será testada a proteção de *Spinning Load*. O motor deve estar funcionando a 100% da sua velocidade nominal, e uma falha é simulada, e neste caso o botão

de emergência é acionado. A alimentação do motor é cortada, e o motor começa o processo de desaceleração.

O *Spinning Load* é caracterizado por não permitir que a rotação do motor chegue a zero, ou seja, parado. Caso a tensão de saída do conversor seja reestabelecida, o motor é novamente energizado com o rotor em movimento, diminuindo o desgaste dos rolamentos, mancais, bem como o estresse da instalação elétrica e do próprio motor devido às altas correntes de partida.

De modo a verificar o comportamento do motor durante o *Spinning Load*, a Figura 4.23 mostra as grandezas em formato gráfico.

Figura 4.23 – Partida do motor com Spinning Load.



Fonte: SIEMENS, 2013.

Com o motor em pleno funcionamento, mais proteções são testadas. Agora será a vez do *Pextron*. O *Pextron* é um relé de proteção térmica, no qual está contido um dispositivo de controle de temperatura, um dispositivo térmico do equipamento, dispositivo de proteção de mancal e um relé térmico.

A função principal é monitor a temperatura do motor através de sensores tipo *RTD*²¹. Para este caso há 8 saídas para sensores *RTDs*, os quais serão alocados em posições que se deseja realizar o monitoramento do motor.

²¹ *Resistive Temperature Detector* ou Detector Resistivo de Temperatura.

A Figura 4.24 mostra um relé de proteção térmica *Pextron*.

Figura 4.24 – Pextron.



Fonte: PEXTRON, 2009.

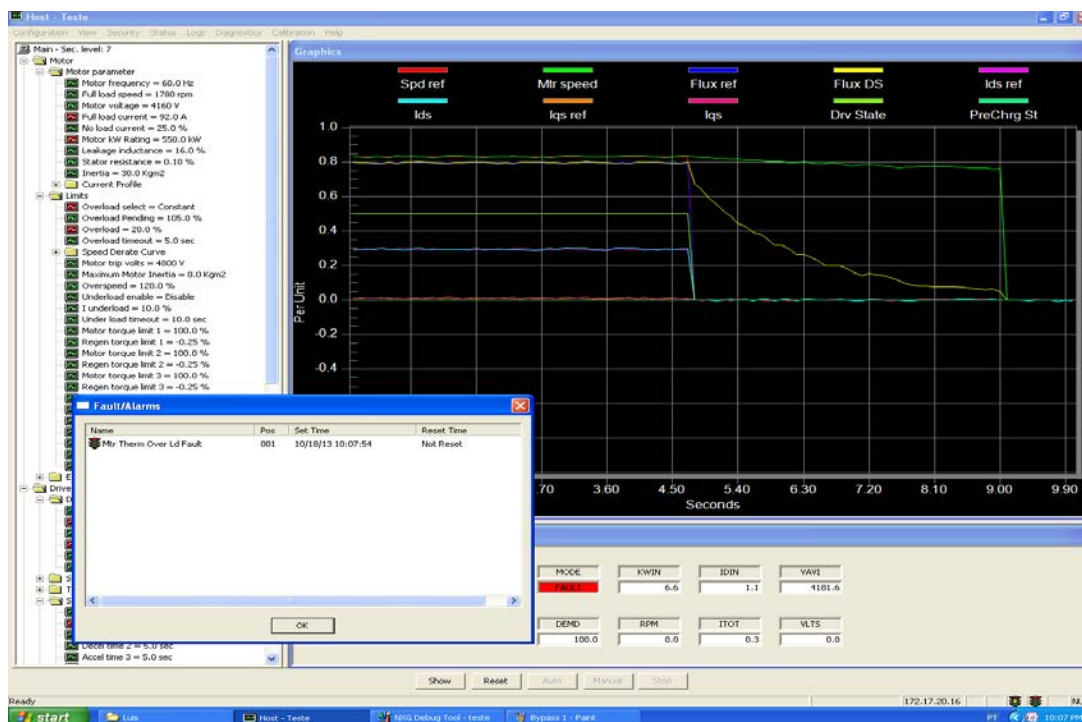
O estado de cada sensor é enviado à placa SCB, e posteriormente ao controle NXG, que efetua as comparações e análises, baseado nos parâmetros estabelecidos inicialmente.

O *Pextron* possui dois estados: Alarme e Falha. Para cada um destes estados, são inseridos parâmetros, que serão a base para que o conversor atue da maneira correta. Os valores atribuídos aos parâmetros podem variar de caso a caso, sendo que para este estudo foi considerado os valores de 70 °C e 90 °C como parâmetros.

De modo a verificar o funcionamento do *Pextron*, um cabo de potência é desconectado. Uma mensagem de alarme é enviada, mas o conversor continua em funcionamento. Em seguida outro cabo de potência é desconectado, de forma a simular uma falha. Quando uma falha ocorre, a tensão de saída do conversor é cortada, desligando o motor.

A Figura 4.25 utiliza o software NXG Drive Tool para mostrar as curvas características de tensão, corrente quando ocorre uma falha do relé de temperatura, indicando que a tensão de saída do conversor foi para zero.

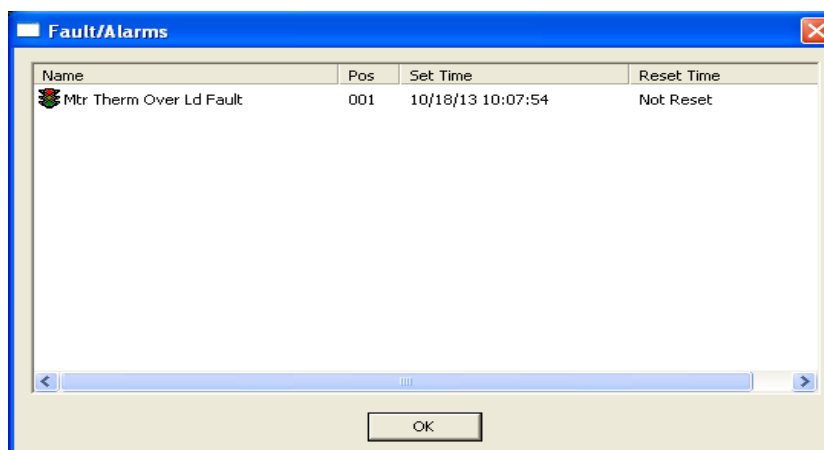
Figura 4.25 – Falha na saída do conversor por elevação de temperatura.



Fonte: SIEMENS, 2013.

A Figura 4.26 mostra a maneira como o aviso de falha da saída do conversor é mostrado.

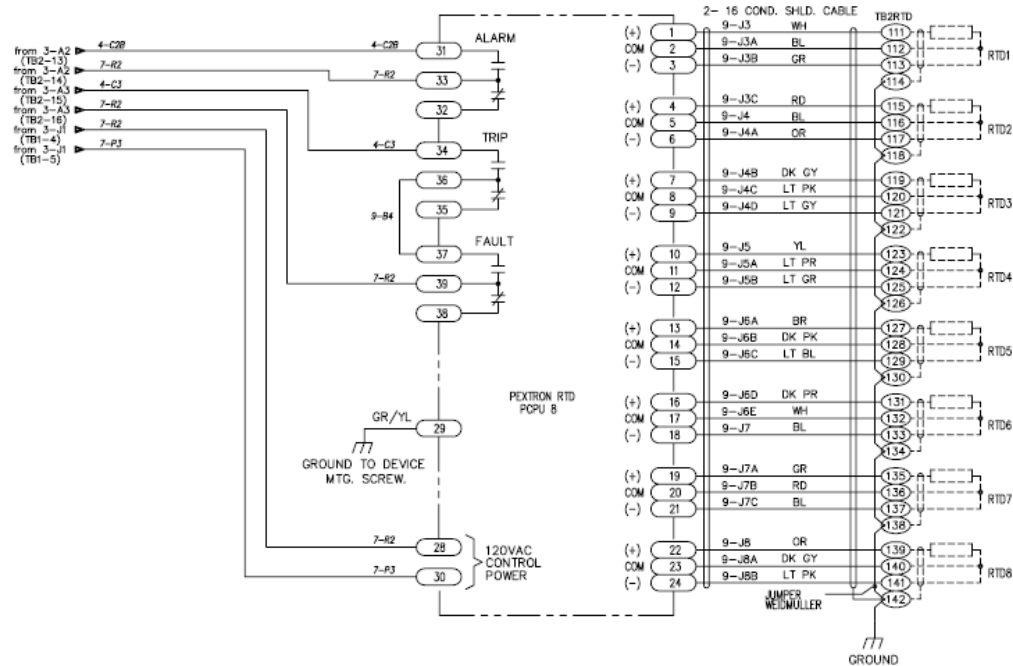
Figura 4.26 – Mensagem Falha Pextron.



Fonte: SIEMENS, 2013.

De modo a ilustrar como é feita as conexões do *Pextron* com os sensores *RTDs* e demais componentes do conversor, a Figura 4.27 exemplifica uma parte do circuito esquemático utilizado no projeto do conversor.

Figura 4.27 – Circuito esquemático do Pextron.



Fonte: SIEMENS, 2013.

Outros relés de proteção térmica podem ser utilizados no lugar do *Pextron*. É o caso do relé *Multilin*. Basicamente opera da mesma forma, mas quando comparado ao *Pextron*, possui um número maior de funcionalidades. O emprego de um ou de outro depende da escolha do cliente.

Para proteção do motor elétrico foi utilizado ainda um sistema denominado: *Bypass mecânico de células de potência*.

Quando o bypass de células avançado é incluído com o conversor, o modulador se comunica com o controlador de bypass e monitora as falhas de hardware, como IOC, ESTOP, e falhas da fonte de alimentação. O controlador de bypass está configurado para controlar os contadores de bypass (mecânicos). Após a detecção de uma falha da célula, o processador se comunica com o controlador de bypass para “bypassar” as células com falhas. Além do Bypass de células, o controlador bypass verifica constantemente o status dos contadores para verificar se eles estão em seus estados requeridos.

O bypass permite que, caso haja falha em uma das células, o conversor não seja desligado, possibilitando que o motor continue seu regime de trabalho, mas com tensão de saída reduzida. De modo a proteger o motor, o conversor pode trabalhar até com três células ausentes.

A Interface de Fibra Ótica transfere dados entre o modulador e as células através de canais de fibra óptica dedicados. Cada célula recebe seus comandos de gatilhamento e sinais de status através de um canal de fibra óptica full-duplex.

A Figura 4.28 representa um contator eletromecânico de dois polos.

Figura 4.28 – Contator Eletromecânico



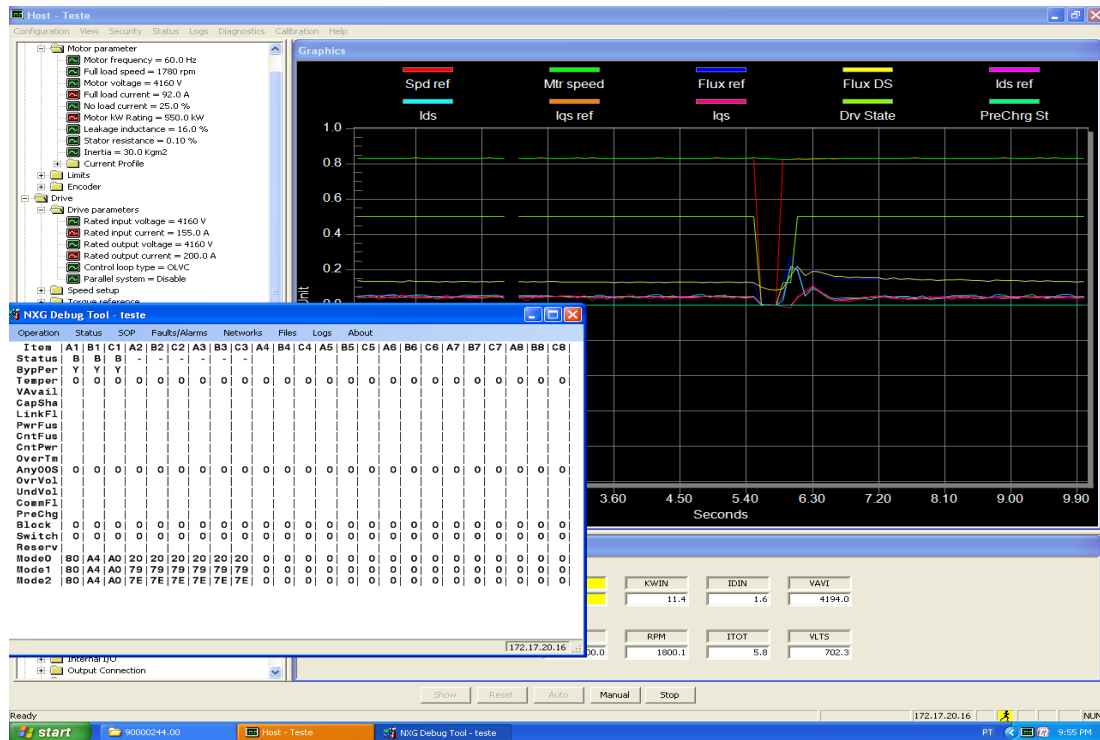
Fonte: SIEMENS, 2013.

Os contadores de bypass são montados por trás da célula de potência. Todas as ligações são feitas com cabos isolados e barramentos. A *Fonte de Alimentação da Placa de Bypass* (BPPs) e o *Circuito de Controle de Bypass* (BCC) estão localizados dentro do DCR. A BCC se conecta ao controlador NXG através de um link de fibra ótica e os controles dos contadores que estão ligados ao BCC são conectados por cabos. A placa da fonte de alimentação do Bypass é energizada de um dos enrolamentos secundários do transformador e está referenciada com o neutro de saída.

Neste estudo foi realizado o bypass mecânico para os três enrolamentos do transformador.

A Figura 4.29 ilustra o comportamento da tensão e corrente do motor, quando a primeira célula foi “bypassada”. Os gráficos mostram uma queda da tensão de saída do conversor, ou seja, o motor continua em funcionamento com a mesma rotação, mas com uma tensão reduzida. Esse processo dura alguns minutos, até que haja um pico de tensão, que inicia o processo de frenagem do motor.

Figura 4.29 – Bypass primeira célula.



Fonte: SIEMENS, 2013.

A Figura 4.30 ilustra o comportamento da tensão e corrente do motor, quando a segunda célula foi “bypassada”.

Figura 4.30 – Bypass segunda célula.



Fonte: SIEMENS, 2013.

A Figura 4.31 ilustra o comportamento da tensão e corrente do motor, quando a terceira célula foi “bypassada”.

Figura 4.31 – Bypass terceira célula.



Fonte: SIEMENS, 2013.

Além dessas proteções aqui exemplificadas, o conversor possui inúmeras outras funções, as quais por inviabilidade de testes práticos, serão detalhadas a seguir e as causas potenciais.

1) Alarme/Falha de Excesso de Velocidade (Over Speed) – ANSI 12

A velocidade do motor é maior do que 95% do parâmetro de excesso de velocidade (ID 1170). Quando isto ocorre, é enviado um sinal de alarme. Se a velocidade do motor continuar a aumentar, de forma a ultrapassar os valores estabelecidos pelos parâmetros de limite (ID 1120), ocorre uma falha.

Pode ser causada por um conversor configurado inadequadamente ou mal ajustado.

2) Falha de terra (Output Ground Fault) – ANSI 64

Esta falha é causada devido a uma condição de falha de terra de saída, quando a tensão de terra estimada excede o parâmetro de limite (ID 1245).

3) Alarme/Falha de Sobretensão do Motor (Motor Over Volt) – ANSI 59

A tensão do motor é maior do que 90% do parâmetro de excesso de tensão (ID 1160). Quando isto ocorre, é enviado um sinal de alarme. Se a tensão do motor continuar a aumentar, de forma a ultrapassar os valores estabelecidos pelos parâmetros de limite (ID 1120), ocorre uma falha.

Pode ser causada por um conversor configurado inadequadamente ou mal ajustado. Pode ser incluído como causa o ajuste do tap secundário e uma condição de linha elevada.

4) Sobrecorrente Instantânea (Instantaneous Over Current) – ANSI 50

As falhas de sobrecorrente (IOC) do conversor normalmente acontecem quando o sinal vindo do ponto de teste na placa de interface do sistema excede o nível estabelecido pelo parâmetro “IOC Setpoint” (ID 7110).

5) Desequilíbrio de Fase (Output Phase Imbal) – ANSI 46

Quando o software detecta um desbalanceamento nas correntes do motor, ocorre um sinal de alarme.

6) Desequilíbrio de Fase (Output Phase Open) – ANSI 46

O software detecta uma condição de fase aberta na saída do inversor para o motor. Se isto ocorre, o problema está na realimentação. Uma fase de saída realmente aberta resulta em um alarme e em um desarme IOC.

7) Velocidade Mínima (Minimum Speed Trip) – ANSI 14

A velocidade do motor está abaixo do ajuste de parâmetro zero speed (ID 2200). Se a velocidade permanecer abaixo do limite por 15 segundos, ocorre um alarme ou falha. Isto é devido a uma condição de travamento do motor.

8) Falha de Magnetização (Failed to Magnetize) – ANSI 2 / 6

Ocorre devido à corrente de magnetização elevada, I_{ds} , ou ao fator de potência fraco. Se I_{ds} é maior que 80% da corrente nominal por um período maior que cinco vezes a configuração do parâmetro “Flux Ramp Rate” (ID 3160).

Geralmente o desarme ocorre durante a partida, pois ou o parâmetro de resistência do estator (ID 1080) ou o ajuste de resistência do cabo (ID 2940) estão incorretos.

9) Perda de Carga (Under Load) – ANSI 37

O torque que produz a corrente do conversor está abaixo de um valor pré-definido pelo usuário, gerando um alarme. Caso essa condição se mantenha, e seja caracterizada uma condição de perda de carga, ocorre uma falha do conversor.

A Figura 4.32 indica alguns parâmetros utilizados para estabelecer as condições de operação de algumas proteções do motor de indução aqui descritas.

Figura 4.32 – Parâmetros para proteção de motor de indução.

Motor			
Motor parameter	1000	0	00
Stator resistance = 0.10 %	*1080	5	00
Limits	1120	5	00
Overload select = Constant	*1130	5	00
Overload = 110.0 %	1140	5	00
Overload timeout = 30.0 sec	*1150	5	00
Motor trip volts = 4800 V	*1160	5	00
Overspeed = 120.0 %	1170	5	00
Phase Imbalance Limit = 40.0 %	1244	5	00
Ground Fault Limit = 8.0 %	*1245	5	00
Speed setup	2060	0	00
Zero speed = 0.0 %	2200	5	00
Output Connection	2900	0	00
Cable resistance = 5.0 %	*2940	5	00
Cable inductance = 6.1 %	*2941	5	00
Drive protect			
Input protection	7000	0	00
Drive IOC setpoint = 150.0 %	7110	7	00

Fonte: SIEMENS, 2013.

Durante o todo o procedimento de teste, embora o motor estivesse sendo alimentado com a tensão nominal de 4160 V e com rotação nominal de 1800 rpm, a corrente máxima que percorria o motor era aproximadamente 27 A. Isso ocorre devido ao fato de que em todo o período de teste do conversor e das proteções presentes para o motor, são realizados sem carga.

Depois de finalizado os procedimentos de teste até aqui apresentados, é iniciado o último estágio de testes. Nesta etapa é feito o acoplamento de uma carga ao motor, de maneira a simular as condições de trabalho em campo, e o conversor alimenta o motor com tensão, potência e correntes nominais.

Esse procedimento é realizado durante um período de 4 horas sem interrupção,

A Figura 4.33 mostra o comportamento do motor trifásico no período de acionamento com carga, que para um processo padrão e sem falhas, permanece em regime contínuo de funcionamento.

Figura 4.33 – Motor com carga nominal.



Fonte: SIEMENS, 2013.

A utilização de um conversor de frequência, além de proteger o motor, fornece outras vantagens durante a partida, funcionamento em regime contínuo e frenagem do motor, permitindo uma maior precisão e confiabilidade do sistema.

O preço médio de um conversor de frequência equivalente ao utilizado durante este ensaio é aproximadamente R\$ 320.000,00 (Outubro/2013).

Se for analisado apenas o valor do conversor, quando comparado ao valor do relé multifunção, surgirá a dúvida se é realmente necessário o uso do mesmo, ou algum componente mais barato pode fazer a vez do conversor.

Para exemplificar o porquê da escolha de um conversor, segue abaixo um estudo de caso real para uma empresa do ramo de laticínios.

A empresa em questão é formada por quatro cooperativas agropecuárias com capacidade de produção de 20 milhões de litros de leite mensais. A necessidade deste cliente era de ampliar a sua produção, expandindo o parque fabril e seção de refrigeração.

A solução desejada era baseada em:

- Baixo nível de harmônicos
- Disponibilidade (processo não pode parar)
- Controle de rotação do Chiller (compressor parafuso)

O Chiller é utilizado principalmente no processo de pasteurização do leite, mantendo a água que resfria os tanques em baixas temperaturas (cerca de 1 °C). O seu funcionamento é baseado na compressão e expansão de um gás refrigerante dentro de um circuito fechado.

O compressor parafuso é uma parte do Chiller que é responsável pela compressão do gás refrigerante. Possui um torque aproximadamente constante na faixa de variação da rotação. Para melhor visualização, a Figura 4.34 representa um compressor Chiller.

Figura 4.34 – Chiller



Fonte: SIEMENS, 2013.

Assim, o processo deve ser o mais confiável possível, uma vez que uma parada de máquina implica em perdas de produção e matéria-prima.

Foi adquirido pela empresa um conversor de frequência de média tensão, com bypass opcional para aumentar a disponibilidade do sistema e um motor de média tensão com isolamento standard. A Figura 4.35 exemplifica o sistema de conexão completo para acionamento do motor de média tensão, bem como a tensão de entrada e saída do conversor de frequência.

Figura 4.35 – Sistema completo de acionamento do motor.



Fonte: SIEMENS, 2013.

O motor acionado pelo conversor é o modelo H-Compact 400 CV, 4160 V de entrada e 4 pólos, além de possuir opcionais, como sensores RTDs, para monitoramento de temperatura. O valor deste motor é R\$ 89.000,00 (Novembro, 2013).

Ainda é questionável o uso do conversor para proteção apenas do motor, mas se for analisado o custo da fábrica parada, fica evidente que o conversor de frequência é a melhor solução.

Considerando a informação fornecida anteriormente de 20 milhões de litros de leite por mês, e supondo que a empresa trabalhe 30 dias por mês, 8 horas por dias, chega-se ao valor de 83.333 litros de leite processado por hora.

Caso haja uma parada da produção devido à falta de disponibilidade de operação do motor, o prejuízo para a empresa é enorme, tornando o valor do conversor irrisório, quando comparado ao valor total do que desperdício, viabilizando assim a utilização do mesmo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de proteção existentes para motores trifásicos de grande porte desempenham um papel fundamental para a integridade tanto do motor, como também da instalação elétrica, protegendo de falhas ou qualquer evento anormal que venha a ocorrer.

Um correto dimensionamento das proteções garante não só a segurança dos equipamentos e dispositivos instalados, mas também é responsável por assegurar o funcionamento adequado de um processo industrial.

Considerando os resultados obtidos na análise de um relé eletrônico multifunção para proteção de um motor elétrico trifásico, e o uso de um conversor de frequência de média tensão para acionar e proteger o mesmo motor, algumas considerações serão feitas.

A proteção de motores realizada por relés eletrônicos multifunção mostra-se muito eficiente, sendo que os relés possuem uma variedade de funções que monitoram diversos parâmetros do motor. Um relé é capaz de proteger contra sobretensões, sobrecorrentes, variações na velocidade do eixo, variações no torque, perda de sincronismo, variação de temperatura, dentre outras características.

Quando o intuito é proteger motores de baixa tensão, os quais são comumente utilizados para funções fabris, o relé eletrônico é altamente viável, devido à relação de custo-benefício. Motores de baixa tensão possuem valores não tão elevados, não sendo necessário um grande investimento em termos de proteção, e os relés usuais possuem preços acessíveis, sendo extremamente funcionais.

Para motores de médio e grande porte, alimentados por média ou alta tensão, os relés multifunção são capazes de realizar uma proteção efetiva, mas com ressalvas. Motores de media tensão, geralmente são muito mais caros que os de baixa tensão e requerem um maior cuidado em sua instalação e monitoramento de seu funcionamento. Isso ocorre por vários fatores, tais como: altas correntes durante a partida do motor e elevadas tensões de entrada, requerendo do sistema elétrico de alimentação, um maior dimensionamento de condutores e transformadores de entrada.

De forma a conciliar o acionamento, período de funcionamento contínuo e proteção de um motor, o conversor de frequência possui relevante importância operacional e financeira, pois de maneira inicial atua na partida e na variação da velocidade de um motor, obtendo uma eficiência energética considerável, aumentando a vida útil dos equipamentos, pois em menores rotações há um menor aquecimento do motor, diminuição de ruídos mecânicos e consequente menor gasto de energia.

O conversor se comparado a um relé multifunção, é extremamente caro, mas atende as necessidades de um motor de média tensão, visando proteger de maneira adequada um bem de maior valor. Mas embora o valor seja elevado, o conversor é fundamental para um processo de fabricação de alto valor agregado.

A escolha do conversor deve ser analisada de forma criteriosa, considerando a aplicação em que será utilizado, as características das máquinas à serem operadas e a potência do motor que fará parte do conjunto acionado.

Se for levado em conta o custo do motor, e do custo operacional de uma fábrica parada por hora, o emprego do conversor é altamente justificado, elevando a disponibilidade do sistema fabril, aumentando a taxa de confiabilidade, protegendo o motor de paradas inesperadas, evitando maiores prejuízos para a indústria de forma geral.

REFERÊNCIAS

ABB (SUI). **Motor Protection Relay REM610.**

Disponível em:

<<http://www.abb.com.br/product/db0003db004281/c12573e700330419c2256d94003fcd65.aspx?productLanguage=us&country=BR>>

Acesso em: 25 ago. 2012.

ARTECHE. **Fusíveis Limitadores de Corrente HH para Média Tensão Linha IN.**

Disponível em:

<[http://www.artech.com/artech/html/pdfs/7/Fusiveis\(PT\).pdf](http://www.artech.com/artech/html/pdfs/7/Fusiveis(PT).pdf)>

Acesso em: 22 set. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão.** Rio de Janeiro, 2004. 209p.

BONALDI, Erik Leandro et al. **Identificação e análise de falhas em motores de indução trifásicos.** Poços de Caldas: Eletricidade Moderna, 2008.

BULGARELLI, Roberval. **Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais.**

Disponível em:

<<http://www.centralmat.com.br/Artigos/Mais/protecaoTermicaMotoresIndustriaisBulgarelli.pdf>>

Acesso em: 18 set. 2013.

CAMINHA, Amadeu Casal. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos.** São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 209 p.

CLARK, Harrison K. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** 2. Ed. Santa Maria: Edições UFSM, 1983. 298 p.

EATON. **CH-Series.**

Disponível em:

<<http://www.eaton.com/Eaton/ProductsServices/Electrical/ProductsandServices/ElectricalDistribution/ProtectiveRelays/MotorRelays/CH-Series/index.htm>>

Acesso em: 25 ago. 2012.

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Motor de Indução.** São Paulo: Érica, 2013. 243p.

GAZZANA, Daniel da S. et al. **Análise da assinatura de corrente para detecção de falhas.** Poços de Caldas: Eletricidade Moderna, 2008.

GE ENERGY MANAGEMENT. **Disjuntor NEMA.**

Disponível em: <http://www.geindustrial.com.br/download/catalogs/GE_Disjuntores_NEMA.pdf>

Acesso em: 23 set. 2012.

GENERAL ELECTRIC (USA). **Motor Protection Principles.**

Disponível em:

<<http://www.gedigitalenergy.com/multilin/family/motors/principles.htm>>

Acesso em: 19 ago. 2012.

IEEE. **Draft Guide for AC Motor Protection.**

Disponível em:

<<http://standards.ieee.org/develop/project/C37.96.html>>

Acesso em: 01 ago. 2012.

KRON. **Transformador TC.**

Disponível em:

<<http://sao-paulo.all.biz/transformadores-tcmdia-tensao7-2kv-at-25-kv-g47447>>

Acesso em: 23 set. 2013.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais.** 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2010. 666 p.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2011. 778 p.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos.** 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 669 p.

MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** Rio de Janeiro: Ltc, 2011. 605 p.

MARDEGAN, C. **Dispositivos de proteção.**

Disponível em:

<http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed52_fasc_protecao_seletividade_capV.pdf>

Acesso em: 10 ago 2013.

MARDEGAN, C. **Proteção de Motores.**

Disponível em:

<http://www.oseletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed55_fasc_protecao_capVIII.pdf>

Acesso em: 20 set 2013.

PEXTRON. **Manual de Operação PCPU8 e PCPU8-T.** Relé de Proteção Térmica – Versão 3.04. 2009.

REHTOM. **Transformadores de Potencial.**

Disponível em:

<<http://www.rehtom.com.br/rehtom-produtos-transformadores-de-potencial.html>>

Acesso em: 25 set 2013.

SEL. **Relé de proteção SEL-701.**

Disponível em:

<<http://www.selinc.com.br/Produtos/SEL-701.aspx>>

Acesso em: 06 nov. 2013.

SEL. **Relé de Proteção de Motores SEL-701.** Proteção e Monitoramento de Motores.

Disponível em:

<<http://www.selinc.com.br/catalog/SEL-701.pdf>>

Acesso em: 06 nov. 2013.

SEL. **Relé de proteção SEL-710.**

Disponível em:

<<http://www.selinc.com.br/Produtos/SEL-710.aspx>>

Acesso em: 06 nov. 2013.

SEL. **Relé de Proteção SEL-751A.**

Disponível em:

<<http://www.selinc.com.br/produtos/SEL-751A.aspx>>

Acesso em: 16 set. 2013.

SEL. **SEL-701 Motor Protection Relay.**

Disponível em:

<<https://www.selinc.com/SEL-701/>>

Acesso em: 06 nov. 2013.

SEL. SEL-710 Motor Protection Relay.

Disponível em:

<<https://www.selinc.com/SEL-710/>>

Acesso em: 06 nov. 2013.

SENAI. Iniciação a Proteção.

Disponível em:

<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA7SsAI/apostila?part=2>>

Acesso em: 11 set. 2013.

SCHNEIDER ELECTRIC (FRA). AC Motors Starting and Protection Systems.

Disponível em:

<<http://www.schneider-electric.hu/documents/automation-and-control/asg-4-motor-starting-and-protection.pdf>>

Acesso em: 20 ago. 2012.

SCHULZ, Bill; MYINT, Thet; DEIBEL, Pat. Induction Motor Protection: Protective Relaying. Mar.2003.

Disponível em:

<http://www.ece.mtu.edu/faculty/bamork/EE5223/Old_Rpts/file_2.pdf>

Acesso em: 25 julho 2012.

SCHWEITZER III, E.o.; ZOCHOLL, S.e.. Aspectos da proteção de sobrecorrentes para alimentadores e motores. SEL, Pennsylvania, 1995. 10 p.

Disponível em:

<http://www.selinc.com.br/art_tecnicos/6003.pdf>

Acesso em: 26 agosto 2012.

SHARKEY, J. Protective Relays: Numerical Protective Relays. EPRI, Palo Alto, Califórnia, 2004.

Disponível em:

<<http://pt.scribd.com/doc/24100453/EPRI-Numerical-Protective-Relays>>

Acesso em: 07 agosto 2012.

SIEMENS. Case de Sucesso. CEMIL Acionamento de Compressor Parafuso. 2013.**SIEMENS. Conversor CA de media tensão ROBICON Perfect Harmony:** Manual de operação. 2012. 376 p.**SIEMENS. Conversor CA de media tensão ROBICON Perfect Harmony:** Manual do Usuário do software NXG Tool suíte. 2010. 198 p.

SIEMENS. Conversores de Média Tensão.

Disponível em:

< <http://www.industry.siemens.com.br/drives/br/pt/conversores/conversores-media-tensao/robicon/pages/default.aspx>>

Acesso em: 19 out. 2013.

SIEMENS. Disjuntores abertos (ACBs)

Disponível em:

<<http://www.industry.siemens.com.br/buildingtechnologies/br/pt/produtos-baixa-tensao/protecao-eletrica/disjuntores-acb/3wl/Pages/Default.aspx>>

Acesso em: 15 set. 2013.

SIEMENS. Fault Reference for Harmony NXG. 2009.170 p.

SIEMENS. Guia técnico. Ajuda teórica e prática para o Instalador Eletricista.

Disponível em:

<<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CEUQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.siemens.com.br%2Ftemplates%2Fv2%2Ftemplates%2FgetDownload.axd%3Fid%3D6554%26type%3DFILES&ei=C-wnUv7HKdT54APk0oDICA&usg=AFQjCNHhiXuDJtbku8fKdIjU8icCSzzN8g&bvm=bv.51773540.d.dmg>>

Acesso em: 15 ago. 2013.

SIEMENS. Inversor de Frequência variável de Média Tensão ROBICON Perfect Harmony: Comunicação NXG. 2013. 326 p.

SIEMENS. Inversor de Média Tensão refrigerado a Ar ROBICON Perfect Harmony: Instruções de Operação do GENIV. 2012. 212 p.

SIEMENS. Manual do Usuário do Produto. 2008. 148 p.

SIEMENS. Medium-Voltage AC-Converter ROBICON Perfect Harmony: NXG Control Manual. 2010. 494 p.

SIEMENS. Motores trifásicos de média tensão.

Disponível em:

< <http://www.industry.siemens.com.br/drives/br/pt/motores-eletricos/motores-trifasicos-mt/H-Compact/Pages/H-Compact.aspx>>

Acesso em: 15 set. 2013.

SIEMENS. **Perfect Harmony Air-Cooled & Liquid-Cooled Drives:** Engineering Manual. 2013. 300 p.

SIEMENS. **Relés de sobrecarga SIRIUS**

Disponível em:

<<http://www.industry.siemens.com.br/AUTOMATION/BR/PT/DISPOSITIVOS-BAIXA-TENSAO/RELES/RELES-DE-SOBRECARGA/3RB/Pages/3rb.aspx>>

Acesso em: 17 set. 2013.

SIEMENS. **VL Motor Circuit Protectors.**

Disponível em:

<<https://w3.usa.siemens.com/powerdistribution/us/en/product-portfolio/circuit-breakers/molded-case-circuit-breakers/vl-motor-circuit-protector/Pages/vl-motor-circuit-protector.aspx>>

Acesso em: 30 ago. 2012.

SOUSA, Eduardo da Costa; SILVA, Victor de Paula e. **Inversores de frequência em sistemas de bombeamento.** São Paulo: Eletricidade Moderna, 2012. N° 455, 177p.

WEG. **Disjuntor em caixa moldada.**

Disponível em:

<<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Controls/Protecao-de-Circuitos-Eletricos/Disjuntor-em-Caixa-Moldada>>

Acesso em: 15 set. 2013.

WEG. **Motor Elétrico Trifásico.**

Disponível em:

<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-brasil-50023622-catalogo-portugues-br.pdf>>

Acesso em: 22 set. 2012.

WEG. **Partida e Proteção de Motores.** Disponível em: <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Controls/Partida-e-Protecao-de-Motores>>

Acesso em: 25 ago. 2012.