

**FACULDADE DOCTUM
ANDRESSA WERNECK
VALMIR RODRIGUES LAMEU**

**APLICAÇÃO DE RELÉS MICROPROCESSADOS NA PROTEÇÃO DE MOTORES
DE MÉDIA TENSÃO**

Juiz de Fora
2018

**ANDRESSA WERNECK
VALMIR RODRIGUES LAMEU**

**APLICAÇÃO DE RELÉS MICROPROCESSADOS NA PROTEÇÃO DE MOTORES
DE MÉDIA TENSÃO**

Monografia de Conclusão de Curso,
apresentada ao curso de Engenharia
Elétrica, Faculdade Doctum de Juiz de
Fora, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. MSc. Mozart Ferreira
Braga Júnior.

Juiz de Fora
2018

WERNECK, Andressa. LAMEU, Valmir Rodrigues
Aplicação de Relés Microprocessados na
Proteção de Motores de Média Tensão
Andressa Werneck, Valmir Rodrigues Lameu.
Juiz de Fora, 2018 90 folhas.

Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) –
Faculdade Doctum Juiz de Fora.

1. Proteção de Motores de Média Tensão. 2.
Relés Microprocessados
I. Proteção – Estudo de Caso Usina de Separação de
Ar. II Faculdade Doctum Juiz de

**ANDRESSA WERNECK
VALMIR RODRIGUES LAMEU**

**APLICAÇÃO DE RELÉS MICROPROCESSADOS NA PROTEÇÃO DE MOTORES
DE MÉDIA TENSÃO**

Monografia de Conclusão de Curso,
submetida à Faculdade Doctum de Juiz de
Fora, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica e
aprovada pela seguinte banca
examinadora.

Prof. MSc. Mozart Ferreira Braga Júnior
Orientador e Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Prof. MSc. Luis Gustavo Schroder e Braga
Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Prof. Me. Marlon Lucas Gomes Salmento
Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Examinada em: ___/___/___.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus por ter nos dado saúde e força para superar as dificuldades e chegar a este momento tão sonhado.

Agradecemos aos nossos pais *Andrea e Gualter, Iris e Antônio*, por estarem sempre ao nosso lado e sempre nos incentivando nessa caminhada, sem o amor e apoio de vocês não teríamos concluído essa caminhada.

Ao nosso orientador *Prof. Mozart Ferreira Braga*, por toda atenção e dedicação em nos orientar, sempre presente e com informações importantes, para que este trabalho fosse concluído da melhor forma.

"Cada sonho que você deixa para trás, é
um pedaço do seu futuro que deixa de
existir"

Steve Jobs

RESUMO

WERNECK, ANDRESSA. LAMEU, VALMIR. **Aplicação de Relés Microprocessados na Proteção de Motores de Média Tensão**. Número de folhas (90f.). Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Faculdade Doctum, Juiz de Fora, 2018.

O sistema elétrico de potência está sujeito a constantes perturbações, resultado das mudanças aleatórias de cargas, devido a falhas de causas naturais, de equipamentos ou humanas. As atuações dos equipamentos de proteção devem ser rápidas e precisas, visando eliminar tais defeitos e promover a continuidade do fornecimento de energia. Os motores de média tensão são largamente utilizados em aplicações nas indústrias, e tornam-se equipamentos vulneráveis as perturbações do sistema elétrico de potência ou defeitos inerentes do motor, devido a sua importância nos processos produtivos e fabril, proteções efetivas garantem seu funcionamento em operação e prolongam sua vida útil. Portanto o uso dos relés microprocessados, permitem não somente funções de proteção, mas também funções de supervisão e controle, que auxiliam em ações preventivas e corretivas através de relatórios de falhas e alarmes. Este trabalho apresenta as principais funções de proteção disponíveis em relés microprocessados para aplicação em motores de média tensão. Através de um estudo de caso em uma Usina de separação de ar, apresenta os resultados de uma aplicação de relé microprocessado em um motor de média tensão, por meio de análise dos relatórios e eventos operacionais.

Palavras-chave: Média tensão. Motor de indução. Proteção. Sistemas industriais.

ABSTRACT

The electrical power system is subject to constant disturbances as a result of random load changes due to natural, equipment or human failure. The performance of the protective equipment must be fast and accurate, aiming to eliminate such defects and promote the continuity of the power supply. Medium voltage motors are widely used in industrial applications, and SEP disturbances or inherent motor defects become vulnerable due to their importance in manufacturing and production processes, effective protections ensure their operation in operation and extend their life useful. Therefore, the use of microprocessor relays allows not only protection functions, but also supervisory and control functions, which aid in preventive and corrective actions through fault reports and alarms. This work presents the main protection functions available in microprocessed relays for application in medium voltage motors. Through a case study in an Air Separation Plant, it presents the results of a microprocessed relay application in a medium voltage motor, through analysis of reports and operational events.

KEYWORDS: Medium voltage. Induction motor. Protection. Industrial systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Tipos de motores elétricos	22
Figura 3.2 – Vista em corte longitudinal de um motor de indução com rotor gaiola de esquilo	23
Figura 3.3 – Motor de rotor bobinado	23
Figura 3.4 – O modelo de um transformador para um motor de indução	24
Figura 3.5 – O modelo de um circuito de rotor de um motor de indução.....	27
Figura 3.6 – O modelo de circuito do rotor com todos os efeitos devidos à frequência (escorregamento) concentrados na resistência R_r	28
Figura 3.7 – O modelo de circuito equivalente por fase de um motor de indução.....	30
Figura 3.8 – Motor indução trifásico, linha M.....	31
Figura 3.9 – Motor indução trifásico, linha M (corte)	32
Figura 3.10 – Pacote estator motor trifásico de indução rotor de gaiola	32
Figura 3.11 – Rotor bobinado de um motor de indução trifásico	33
Figura 3.12 – Carcaça de um motor elétrico	33
Figura 3.13 – Processo de inserção das bobinas nas ranhuras do rotor	34
Figura 4.1 – Ampola a vácuo encapsulada no polo.....	39
Figura 4.2 – Disjuntores à vácuo de média tensão	40
Figura 4.3 – Esquema do circuito equivalente dos transformadores.....	45
Figura 4.4 – Conexão de transformador de corrente de linha de transmissão.....	48
Figura 4.5 – Transformador de potencial indutivo	49
Figura 4.6 – Transformador de potencial capacitivo.....	50
Figura 4.7 – Relé eletromecânico disco de indução.....	55
Figura 4.8 – Relé eletrônico estático	56
Figura 4.9 – Relé digital	57
Figura 4.10 – Relé microprocessado.....	58
Figura 4.11 – Arquitetura típica de <i>hardware</i> de um relé numérico.....	60
Figura 4.12 – Curva típica tempo versus corrente para proteção de motores.....	65
Figura 4.13 – Curvas de tempo inverso	67
Figura 4.14 – Curvas de características típicas do motor: sobrecarga, rotor bloqueado e proteção térmica.....	72
Figura 5.1 – Motor de indução trifásico de 600HP	80
Figura 5.2 – Relé multifunção microprocessado para proteção de motor	81

Figura 5.3 – Diagrama funcional do relé SEL-710.....	82
Figura 5.4 – Necessidade de espaço para tecnologias diferentes e mesma funcionalidade	84
Figura 5.5 – Diagrama unifilar antigo	86
Figura 5.6 – Diagrama unifilar atual	88
Figura 5.7 – Estatísticas de alarmes e TRIPS (Aberturas).....	89
Figura 5.8 – Oscilografia de acionamento manual (Trigger)	91
Figura 5.9 – Oscilografia de evento.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Comparação de disjuntores.....	43
Tabela 4.2 – Relação de transformação dos transformadores de corrente.....	48
Tabela 4.3 – Classes de exatidão de transformadores de potencial	51
Tabela 4.4 – Tensões primárias e relações nominais	52
Tabela 4.5 – Funções de proteção aplicáveis a motores trifásicos industriais..	63
Tabela 5.1 – Especificações nominais do motor de indução trifásico	80
Tabela 5.2 – Funções de proteção aplicadas ao motor WEG-600HP	81
Tabela 5.3 – Comparativo entre relés eletromecânicos x relés microprocessados... ..	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ANSI	<i>AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE</i>
CA	CORRENTE ALTERNADA
CC	CORRENTE CONTÍNUA
CCM	CENTRO DE CONTROLE DE MOTORES
EAT	EXTRA ALTA TENSÃO
EPRI	<i>ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE</i>
GVO	GRANDE VOLUME DE ÓLEO
IEC	<i>INTERNATIONAL ELECTROTECHINICAL COMMISSIO</i>
IEEE	<i>INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS</i>
I/O	<i>INPUT/OUTPUT</i>
MT	MÉDIA TENSÃO
NBR	NORMA BRASILEIRA
ONS	OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO
PVO	PEQUEVO VOLUME DE ÓLEO
RTD	<i>RESISTANCE TEMPERATURE DETECTOR</i>
SEL	<i>SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES</i>
SEP	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA
SIN	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL
TC	TRANSFORMADOR DE CORRENTE
TP	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL
TRB	TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO
UTE	USINA TERMOELÉTRICA

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização	15
1.2 Estado da Arte	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Motivação para o estudo de caso	19
1.4 Estrutura do trabalho	19
2 METODOLOGIA	20
3 REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1 Máquinas Elétricas Rotativas	21
3.2 Motor de indução CA	21
3.2.1 Circuito equivalente de um motor de indução	24
3.2.1.1 Modelo de circuito do rotor	25
3.2.1.2 Circuito equivalente final	28
3.3 Partes Construtivas.....	31
3.3.1 Estator	32
3.3.2 Rotor	33
3.3.3 Carcaça	33
3.3.4 Bobinamento	34
3.4 Aplicação dos Motores na Indústria	34
3.4.1 Aumento de temperatura	35
3.4.2 Classe de isolamento.....	36
3.4.3 Aumento de temperatura nos enrolamentos	36
4 ELEMENTOS DE PROTEÇÃO	38
4.1 Disjuntores.....	38
4.1.1 Disjuntores com interrupção à vácuo	38

4.1.2 Características construtivas	39
4.1.3 Vantagens do disjuntor à vácuo	40
4.1.4 Disjuntores a óleo	41
4.1.5 Disjuntor a grande volume de óleo (GVO)	41
4.1.6 Disjuntor a pequeno volume de óleo (PVO).....	41
4.1.7 Disjuntor a ar comprimido.....	42
4.1.8 Disjuntor a hexaflureto de enxofre (SF ₆).....	42
4.2 Transformadores de Medidas	45
4.2.1 Introdução.....	45
4.2.2 Transformador de corrente	46
4.2.3 Transformador de potencial	49
4.2.4 Transformador de potencial do tipo indutivo	49
4.2.5 Transformador de potencial do tipo capacitivo.....	50
4.3 Relés de Proteção	53
4.3.1 Relés eletromecânicos.....	54
4.3.2 Relés eletrônicos (estáticos).....	55
4.3.3 Relés digitais	56
4.3.4 Relés microprocessados	57
4.3.4.1 Vantagens e principais características	58
4.3.5 Arquitetura de <i>hardware</i>	59
4.3.5.1 Componentes da arquitetura de <i>hardware</i>	61
4.4 Funções de Proteção para Motores Trifásicos Industriais.....	63
4.4.1 Proteção de sobrecorrente.....	65
4.4.1.1 Proteção de sobrecorrente instantâneo (Função 50).....	67
4.4.1.2 Proteção de sobrecorrente instantâneo de neutro (Função 50N).....	68
4.4.1.3 Proteção de sobrecorrente temporizada (Função 51).....	68

4.4.1.4 Proteção de sobrecorrente temporizada de neutro (Função 51N).....	70
4.4.1.5 Proteção de sobrecorrente <i>ground sensor</i> (Função 50GS).....	71
4.4.2 Proteção térmica (Função 49)	71
4.4.3 Proteção de desbalanço de corrente ou corrente de sequência negativa (Função 46)	74
4.4.4 Proteção contra partida longa (Função 48).....	74
4.4.4.1 Proteção contra rotor bloqueado após a partida (Função 51LR).....	75
4.4.5 Proteção de sequência de fase de tensão (Função 47)	76
4.4.6 Proteção contra subtensão (Função 27)	77
4.4.7 Proteção contra sobretensão (Função 59).....	77
4.4.8 Proteção contra subfrequência (Função 81).....	78
5 ESTUDO DE CASO	79
5.1 Considerações iniciais.....	79
5.1.1 Apresentação do motor de indução trifásico	79
5.1.2 Relé de proteção SEL-710	81
5.2 Comparação entre relés eletromecânicos e microprocessados.....	83
5.2.1 Processo de modernização do sistema de proteção	85
5.2.2 Estatísticas de falhas e eventos	89
5.2.3 Análise de evento	90
6 CONCLUSÃO	93
6.1 Trabalhos futuros.....	94
REFERÊNCIAS.....	95
ANEXO A Nomenclatura das Funções de Proteção e Manobras dos Relés (ANSI/IEC 61850)	98
ANEXO B Complementação da Tabela (ANSI/IEC 61850).....	101
ANEXO C Valores ajustados no relé de proteção	102
ANEXO D Autorização Institucional	104

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O sistema elétrico de potência (SEP) pode ser classificado em sistemas de geração, transmissão e distribuição, com objetivo de gerar, transportar e fornecer energia elétrica para os consumidores. Com isso o sistema deve ser dimensionado e controlado com intuito de distribuir energia elétrica seguindo os parâmetros de qualidade, confiabilidade, disponibilidade, segurança e economia (RUSH, 2011; PRODIST 8, 2018).

A proteção dos elementos do SEP tem como princípio de funcionamento uma análise e reconhecimento do problema e uma rápida resposta de ações para que o sistema volte a sua normalidade de funcionamento (COURY et al., 2011). Os sistemas de proteção e controle são cruciais para a segurança das instalações, equipamentos e componentes, e também para garantir os níveis de segurança operacional do sistema elétrico como um todo (ONS, 2017).

O sistema elétrico de potência está sujeito a perturbações constantes formadas por mudanças aleatórias de cargas, devido a falhas por causas naturais, e também como resultado de falhas do equipamento ou do operador (HOROWITZ, 2014).

Mesmo com a presença dessas perturbações, o sistema consegue manter seu estado quase estável devido a dois fatores: primeiro devido a extensão do sistema elétrico, como por exemplo o Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN) que possui 134.765 Km de linhas de transmissão (ONS, 2018), em relação ao tamanho das cargas individuais, e segundo devido as medidas corretivas e ações tomadas pelos equipamentos de proteção (HOROWITZ, 2014).

A velocidade de atuação dos equipamentos de proteção deve ser rápida e precisa, pois são características importantes para proteções de sistemas elétricos. Essas ações refletem no número de interrupções causadas no sistema elétrico, com isso a implementação de novos ajustes de proteção proporciona maior segurança e confiabilidade nas operações e minimizam as interrupções no SEP.

A partir da década de 70, os relés de proteção tornaram-se mais eficientes com maior sensibilidade e velocidade em atuações de ocorrências, confiabilidade e

relatório de análise na detecção de defeitos. Aliado a essas mudanças através de uma maior integração digital, a tecnologia tornou-se uma base de comunicação de dados, e flexibilidade funcional onde o relé pode ser programado para realizar diversas funções (COURY et al., 2011).

As classificações dos relés ocorrem de acordo com suas funções de proteção e manobra, sendo especificada por um código numérico da tabela ANSI (*American National Standards Institute*), de proteções de equipamentos que se indica o tipo de relé. Estes equipamentos ainda podem ser classificados como sendo equipamentos monofunção ou multifunção (MAMEDE FILHO, 2011).

Os relés eletromecânicos foram projetados para realizar um reconhecimento de uma característica do sistema particular, e realizar ações adequadas, se essa característica não estiver em condições normais do sistema. Esses relés utilizam como princípio de funcionamento uma força mecânica que resulta uma operação em um contato em resposta a um impulso. Através do fluxo de corrente nos núcleos magnéticos, a força mecânica é gerada (ANDERSON, 1999; RUSH, 2011).

Os relés digitais são constituídos em subsistemas de funções, onde cada subsistema possui suas características construtivas bem definidas. Como módulo interface, responsável por atenuar as tensões e correntes de entrada a níveis de tensão adequados aos microprocessadores; filtros analógicos para evitar erros nos processamentos de sinais; conversores analógicos/digitais (A/D), onde as entradas analógicas são convertidas para formas digitais em intervalos definidos pela taxa amostral; módulo de entrada lógica, onde é informado ao processador sobre o estado de chaves, disjuntores, seccionadoras e sobre atuações de outras proteções (COURY et al., 2011).

Os relés microprocessados tem por suas características funcionais proteger, monitorar, medir, controlar e comunicar (SEL, 2015). O uso dos relés em proteção de motores possibilita diagnosticar diversas variáveis, onde previamente pode ser identificada a origem da falha e qual função de proteção atuou e desligou o equipamento, mantendo a máquina segura.

Motores de grande porte são empregados nos processos industriais como usinas de separação de ar, óleo e gás, indústrias químicas, petrolíferas, papeleiras, sementeiras, metalúrgicas, hidroelétricas, entre outras. Operam com tensões nominais entre 2.400 a 13.800V, são desenvolvidos especialmente para aplicações

específicas de altas potências entre 1 a 6 MVA, e que operam ininterruptamente, tais como compressores, sopradores, moinhos e trituradores (SIEMENS, 2018).

Este trabalho tem a finalidade de apresentar um estudo prático e aplicação de proteções em motores de média tensão em operação nominais de 2.400 a 13.800V nos setores industriais que necessitam de processos produtivos estáveis. Com este estudo espera-se viabilizar a utilização de equipamentos de proteção com tecnologias avançadas em motores de média tensão.

1.2 Estado da arte

Os referenciais literários aqui descritos apresentam estudos similares aos do presente estudo de caso, e também abordam análises referentes ao sistema de proteção de motores e do sistema elétrico como um todo.

O estudo de Dias (2013), apresenta as análises das proteções elétricas, através de um sistema composto por um motor de indução trifásico acionado por um conversor de frequência, e também uma análise das funções de um relé eletrônico multifunção. É demonstrado um estudo comparativo entre as funções existentes em um conversor e em um relé.

O estudo de caso realizado em uma indústria de laticínios, apresentou a ampliação do parque fabril e setor de refrigeração. Para isso foi adquirido um conversor de frequência de média tensão e um motor de indução de média tensão interligado a um compressor *Chiller* de grande importância no processo de refrigeração do leite. A função do conversor de frequência era a proteção do motor, de modo a evitar parada de produção e prejuízos financeiros. O estudo de caso provou que a utilização do conversor de frequência tornou-se economicamente mais viável que a utilização do relé eletrônico, demonstrando que o valor da aquisição do conversor de frequência era menor do que o valor de parada do setor fabril.

Segundo Bulgarelli (2006), a proteção térmica de motores de indução trifásicos tem sido uma das maiores áreas onde o uso de relés microprocessados, tem proporcionado um aprimoramento nas funções de proteção dos motores. Os atuais relés microprocessados utilizados para proteção de motores são modelados através de algoritmos matemáticos, contendo uma nova abordagem para uma adequada proteção térmica. O estudo destaca que, especialmente para os motores industriais de grande porte e de importância operacional, somente os relés de proteção

microprocessados tem sido efetivamente capazes de fornecer proteção adequada, resultado da análise dos modelos térmicos estimados continuamente e em tempo real.

A tese apresenta ainda, as principais funções de proteção aplicáveis para motores trifásicos industriais, além de toda estrutura construtiva do relé de proteção microprocessado. Apresenta-se também um estudo de dois modelos térmicos, um baseado em proteção por sobrecorrente e outro em um sistema térmico de primeira ordem. Os algoritmos de proteção térmica dos dois modelos foram simulados e comparados, submetidos às correntes de carga e de sobrecarga.

De acordo com Silva (2012), os sistemas de proteção são fundamentais para a preservação da integridade dos equipamentos pertencentes aos sistemas elétricos e para a manutenção do bom funcionamento dos mesmos. É de extrema importância que os relés de proteção respondam da forma planejada, tornando necessário o processo de avaliação do desempenho desses dispositivos. O texto apresenta um estudo sobre os relés e suas principais funções de proteção utilizadas, e os procedimentos de avaliação de desempenho de relés digitais.

O estudo baseou-se em testes de desempenho do relé digital REL670, fabricado pela ABB, através de dados reais de parametrização aplicados no sistema de proteção de uma linha de transmissão do Sistema Interligado Nacional. Os testes foram realizados através de *software* específico, com base nos dados do sistema de proteção implementado na Linha de Transmissão de 138 kV UTE São João – São João da Boa Vista II. Este sistema de proteção está localizado no município de São João da Boa Vista no estado de São Paulo. A subestação de São João de 138kV pertence a uma unidade termoeletrica conectada ao sistema elétrico através do seccionamento do Circuito I da LT 138kV Euclides da Cunha e da LT São João da Boa Vista II. Através destes dados foram realizados testes com as funções de sobrecorrente, distância e sobretensão.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho, é apresentar as funções de proteções que se aplicam a motores trifásicos industriais utilizando relés de proteção microprocessados. Demonstrar os resultados de um estudo de caso, através da ação do relé microprocessado como equipamento de proteção de um motor de indução trifásico, apontando os benefícios na utilização deste equipamento em uma planta industrial.

Ao final deste trabalho, pretende-se apresentar as principais funções de utilização de relés de proteção microprocessados para operação em sistemas de proteção que possuem motores trifásicos industriais, de modo a contribuir para a melhoria de sistemas de proteção industrial.

1.3.1 Motivação para o Estudo de Caso

O estudo de caso foi realizado em um indústria de separação de ar, motivado pela substituição do equipamento de proteção do motor, por outro de tecnologia mais avançada, e após várias observações e análise de relatórios internos resultou na diminuição do número de falhas e paradas não programadas.

Os dados de análise de operação gerados pelo relé de proteção proporcionou verificar situações de possíveis falhas ou riscos fossem detectadas antes de uma parada definitiva do equipamento, o acompanhamento contínuo desses dados garantiu uma melhor eficiência do processo produtivo, não acarretando prejuízos de parada da planta, que não estivessem programadas para realização de alguma manutenção preventiva.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos. No primeiro capítulo são apresentadas, a introdução, o estudo da arte, os objetivos e a motivação do trabalho.

No segundo capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada na construção do trabalho.

No terceiro capítulo, o referencial teórico das características construtivas e funcionais de motores de indução trifásico, bem como suas principais aplicações na indústria.

No quarto capítulo, o conceito à filosofia de proteção, a evolução dos relés, e a análise das principais funções dos relés de proteção aplicadas aos motores de indução trifásicos.

No quinto capítulo, descreve-se como se desenvolveu o estudo de caso, os resultados e análises de relatórios.

No sexto capítulo, apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

O presente estudo foi realizado com base em pesquisas bibliográficas, artigos científicos, dissertações, livros do tema, a partir do ano 2000 a 2018. Este estudo analisa e apresenta um estudo teórico sobre aplicação de relés de proteção microprocessados em motores trifásicos de média tensão, demonstrando e exemplificando as funcionalidades, as principais falhas ocorrentes e os princípios de construção de cada equipamento.

O estudo de caso foi realizado na empresa White Martins Gases Industriais Ltda, conforme autorização no Anexo D, especificamente em um motor elétrico de indução trifásico de média tensão, fabricado pela WEG, cuja potência nominal é 600 HP e sua tensão nominal é 6.600V, protegido por um relé microprocessado fabricado por SEL (*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc*), modelo SEL-710.

Através de análise dos relatórios gerados pelo relé microprocessado SEL-710, entre 28 de dezembro de 2015 até 14 de novembro de 2018, possibilitou verificar as falhas no motor de indução trifásico de média tensão da fabricante WEG que ocorreram no período de observação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Máquinas elétricas rotativas

Os motores elétricos são máquinas que realizam a conversão de energia elétrica em energia mecânica. As máquinas rotativas em corrente contínua (CC) ou em corrente alternada (CA), geram tensões nos enrolamentos ou grupos de bobinas, quando estes giram no interior de um campo magnético, ou quando se têm a presença de um campo magnético girante próximo aos enrolamentos. Esse grupo de bobinas, interligadas em conjunto, são denominadas como enrolamento de armadura (FITZGERALD, 2014).

As máquinas CC, são máquinas elétricas onde o enrolamento de armadura encontra-se no rotor, denominado a parte rotativa da máquina, a parte móvel. Geralmente, o termo enrolamento de armadura é utilizado para mencionar um enrolamento ou grupo de enrolamentos que conduzem corrente alternada. Em máquinas CA, síncronas ou de indução, os enrolamentos de armadura encontram-se no estator, denominada a parte estacionária da máquina, a parte fixa. Estes enrolamentos também são conhecidos como enrolamentos do estator (CHAPMAN, 2013).

As máquinas CC e as máquinas síncronas possuem um segundo enrolamento, responsável por conduzir corrente contínua para produzir o fluxo principal de operação da máquina, tal enrolamento é conhecido como enrolamento de campo. O enrolamento de campo nas máquinas CC é encontrado no estator, e em máquinas síncronas no rotor, um contato mecânico rotativo é necessário para que ocorra o fornecimento de corrente ao enrolamento de campo (FITZGERALD, 2014).

3.2 Motor de indução CA

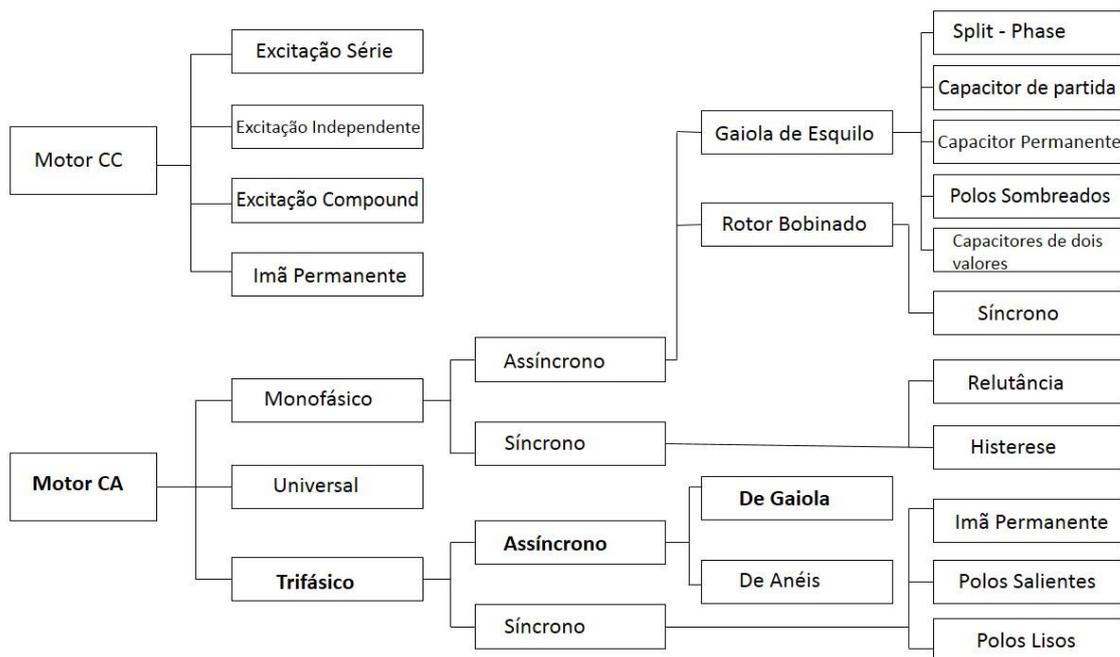
As máquinas CA classificam-se em duas categorias: máquinas síncronas e assíncronas. As máquinas síncronas possuem uma corrente de campo magnético por uma fonte de potência CC isolada, enquanto as máquinas assíncronas, também conhecidos como máquinas de indução, a corrente de campo é resultante de indução magnética em seus enrolamentos de campo. Normalmente os circuitos de campo de ambas as máquinas estão localizados em seus rotores (CHAPMAN, 2013).

Nas máquinas de indução os enrolamentos do rotor são eletricamente curto-circuitados, as correntes são induzidas no enrolamento do rotor quando este está em sincronismo com o fluxo de armadura. As máquinas assíncronas produzem conjugado apenas quando a velocidade do rotor é diferente da velocidade síncrona (FITZGERALD, 2014).

Desde o século XIX que motores de indução trifásicos estão presentes na indústria, devido suas características construtivas serem simples e robustas, estas máquinas são comumente utilizadas nos acionamentos elétricos das plantas industriais (TRZYNADLOWSKI, 2000). Devido à alta popularidade dos motores de indução é importante conhecer suas partes construtivas e seu funcionamento para o dimensionamento de suas proteções.

Os motores podem ser classificados conforme o tipo de ligação e excitação, de acordo com a figura 3.1:

Figura 3.1 - Tipos de motores elétricos



Fonte: Adaptado de Catálogo WEG DT-6 (2015)

Os motores de indução trifásicos são classificados através das características construtivas dos rotores:

- Motores de Indução tipo Gaiola de esquilo: o rotor é composto através de um núcleo de chapas ferromagnéticas, onde são inseridas barras de material condutor localizadas paralelas entre si, curto-circuitados por

anéis condutores nas extremidades (CHAPMAN, 2013). Na figura 3.2 pode- se observar um desenho ilustrativo de um motor de indução tipo rotor gaiola de esquilo.

Figura 3.2 - Vista em corte longitudinal de um motor de indução com rotor gaiola de esquilo



Fonte: SIEMENS (2018)

- Motores de Indução tipo Rotor Bobinado: os terminais de enrolamento do rotor são colocados em curto-circuito através de escovas apoiada sobre os anéis deslizantes no eixo do rotor. O acesso das correntes no rotor é realizado através dessas escovas, onde as correntes são examinadas e resistências extras podem ser incluídas no circuito do rotor (FITZGERALD, 2014; CHAPMAN, 2013). Na figura 3.3 é demonstrado um motor de rotor bobinado.

- Figura 3.3 - Motor de rotor bobinado



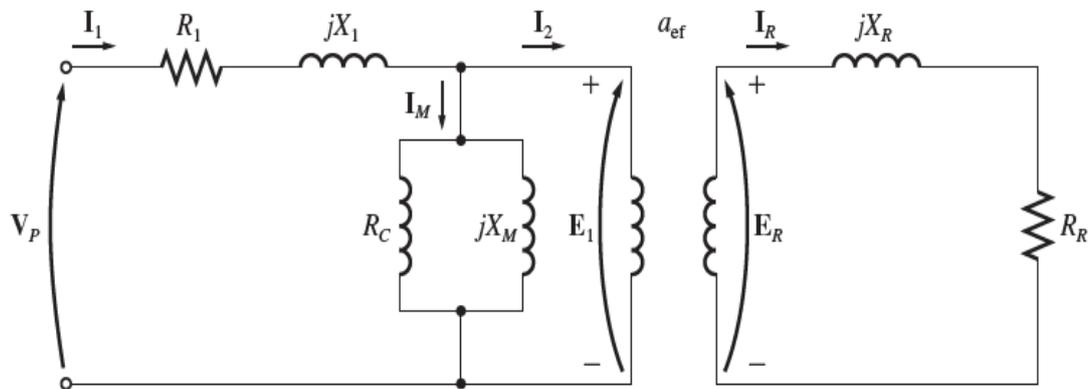
Fonte: Catálogo WEG DT-6 (2015)

Os motores de indução trifásicos são altamente utilizados em aplicações que exigem alta eficiência e altos torques até mesmo em baixas rotações. Essas características asseguram confiabilidade e eficiência para funcionamento em altas potências (SIEMENS, 2018).

3.2.1 Circuito equivalente de um motor de indução

O circuito equivalente de um motor de indução é muito semelhante ao circuito equivalente de um transformador, já que as tensões e correntes no circuito do rotor de um motor são resultados de uma ação de transformador. O motor de indução, também pode ser chamado máquina de excitação simples, pois a potência é fornecida somente ao circuito do estator do motor (CHAPMAN, 2013). A figura 3.4 apresenta o modelo de transformador para o circuito de um motor de indução.

Figura 3.4 - O modelo de transformador para um motor de indução



Fonte: CHAPMAN (2013)

Onde:

I_1 - Corrente no primário [A];

V_p - Tensão de entrada no primário [V];

R_1 - Resistência do estator [Ω];

jX_1 - Reatância de dispersão do estator [Ω];

I_m - Corrente de magnetização [A];

R_c - Resistência de perdas no núcleo [Ω];

jX_m - Reatância de magnetização [Ω];

E_1 - Tensão interna primária [V];

I_2 - Corrente no secundário [A];

a_{ef} - Relação de espiras efetiva;

I_r - Corrente no secundário do rotor [A];

E_r - Tensão interna no rotor [V];

jX_r - Reatância do rotor [Ω];

R_r - Resistência do rotor [Ω];

A diferença entre o circuito equivalente de um transformador e o circuito equivalente de um motor de indução se dá na variação de frequência produzida na tensão do rotor E_r e nas impedâncias do rotor R_r e jX_r (CHAPMAN, 2013).

3.2.1.1 Modelo de circuito do rotor

No motor de indução, quando ocorre uma tensão aplicada ao enrolamento do estator, uma tensão é induzida nos enrolamentos do rotor do equipamento. Normalmente, o máximo aumento de movimento relativo entre os campos magnéticos do rotor e do estator, resultam na superior tensão e frequência do rotor. Denominada rotor bloqueado ou travado, é a condição onde ocorre o movimento relativo máximo, que é resultante quando o rotor está estático (CHAPMAN, 2013).

O valor e a frequência da tensão induzida no rotor para qualquer velocidade é relacionada proporcionalmente ao escorregamento do rotor. Logo, quando o rotor estiver bloqueado, o valor da tensão induzida no mesmo, sendo denominado E_{r_0} , para qualquer escorregamento será dado pela equação (3.1):

$$E_r = sE_{r_0} \quad (3.1)$$

Onde:

E_r - Tensão interna no rotor [V];

E_{r_0} - Tensão induzida no rotor [V];

s - Escorregamento [%].

O escorregamento do rotor, define-se pela equação (3.2):

$$s = \frac{\eta \sin - \eta m}{\eta \sin} \quad (3.2)$$

Onde:

$\eta \sin$ - Velocidade dos campos magnéticos [rpm];

η_m - Velocidade mecânica do eixo do motor [rpm].

E a frequência de tensão induzida para qualquer escorregamento é definida pela equação (3.3):

$$f_{re} = s \cdot f_{se} \quad (3.3)$$

Onde:

f_{re} - Frequência do rotor [Hz];

s - Escorregamento [%];

f_{se} - Frequência do estator [Hz].

A resistência do rotor R_r é constante, independente do escorregamento. A reatância do rotor de um motor de indução é dependente da indutância do rotor, da frequência da tensão e da corrente do rotor. Considerando uma indutância de rotor L_r , a reatância do rotor é definida pela equação (3.4):

$$X_r = \omega_{re} \cdot L_r = 2\pi \cdot f_{re} \cdot L_r \quad (3.4)$$

Onde:

X_r - Reatância do rotor [Ω];

ω_{re} - Velocidade do rotor [rad/s];

L_r - Indutância do rotor [H];

f_{re} - Frequência do rotor [Hz].

Através da equação (3.3), logo a reatância do rotor define-se através da equação (3.5):

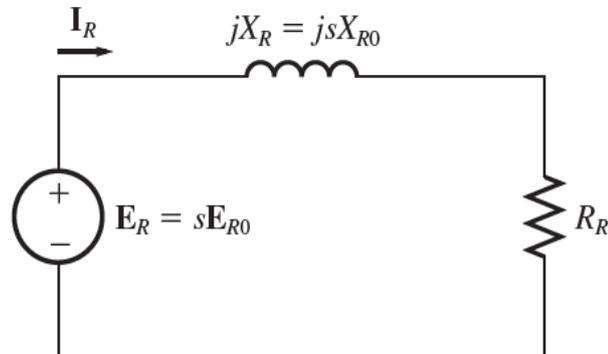
$$\begin{aligned} X_r &= 2\pi \cdot s \cdot f_{se} \cdot L_r \\ X_r &= s (2\pi \cdot f_{se} \cdot L_r) \\ X_r &= s \cdot X_{r_0} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Onde:

X_{r_0} - Reatância do rotor quando este está bloqueado [Ω].

O circuito equivalente resultante do rotor, é apresentado na figura 3.5:

Figura 3.5 - O modelo de um circuito de rotor de um motor de indução



Fonte: CHAPMAN (2013)

Onde:

E_{r0} - Fonte de tensão constante [V];

I_r - Corrente do rotor [A].

A corrente do rotor, pode ser definida através da equação (3.6):

$$I_r = \frac{E_r}{R_r + jX_r}$$

$$I_r = \frac{E_r}{R_r + jsX_{r0}} \quad (3.6)$$

$$I_r = \frac{E_{r0}}{R_r/s + jX_{r0}}$$

Onde:

I_r - Corrente do rotor [A];

E_r - Tensão de entrada do rotor [V];

R_r - Resistência do rotor [Ω];

jX_r - Reatância do rotor [Ω];

E_{r0} - Tensão de entrada constante [V];

jX_{r0} - Reatância do rotor quando este está bloqueado [Ω];

s - Escorregamento [%].

Através da equação (3.6), é possível analisar os efeitos que atingem o rotor, devido a uma velocidade variável, resultando na impedância variável do mesmo. Portanto, a impedância equivalente do rotor é demonstrada pela equação (3.7):

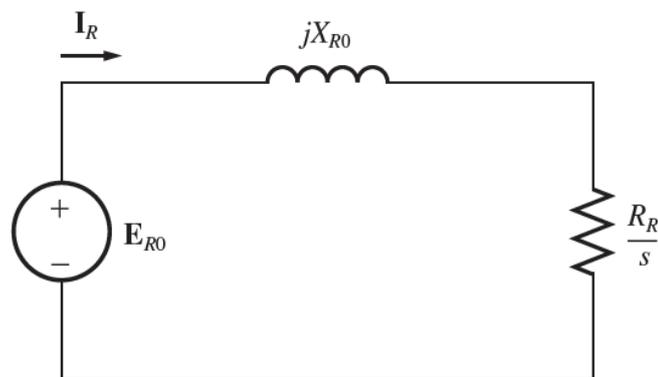
$$Z_{r,eq} = R_r/s + jX_{r0} \quad (3.7)$$

Onde:

$Z_{r,eq}$ - Impedância equivalente do rotor [Ω].

O circuito equivalente do rotor, é demonstrado na figura 3.6. Neste circuito, a tensão do rotor é um valor constante de E_{R0} , e a impedância equivalente do rotor $Z_{r,eq}$, demonstra os efeitos devido a um escorregamento variável do mesmo.

Figura 3.6 - O modelo de circuito do rotor com todos os efeitos devidos à frequência (escorregamento) concentrados na resistência R_r



Fonte: CHAPMAN (2013)

3.2.1.2 Circuito equivalente final

O circuito equivalente final por fase de um motor de indução, pode ser encontrado referindo a parte do rotor ao lado do estator. Em um modelo de transformador, é possível referir tensões, correntes e impedâncias do lado secundário para o lado primário, através da relação de espiras do transformador, conforme as equações (3.8), (3.9) e (3.10):

$$V_p = V'_s = a.V_s \quad (3.8)$$

$$I_p = I'_s = \frac{I_s}{a} \quad (3.9)$$

$$Z'_s = a^2 \cdot Z_s \quad (3.10)$$

Onde:

V_p - Tensão de entrada no primário [V];

V'_s - Tensão de linha referida ao secundário [V];

a - Relação de espiras;

V_s - Tensão de saída no secundário [V];

I_p - Corrente de entrada no primário [A];

I'_s - Corrente de linha referida ao secundário [A];

I_s - Corrente de saída no secundário [A];

Z'_s - Impedância de linha referida ao secundário [Ω];

Z_s - Impedância do transformador [Ω].

O mesmo tipo de transformação pode ser realizado para o circuito do motor de indução. Quando a relação de espiras efetivas de um motor de indução for a_{ef} , a tensão de rotor transformada é definida pela equação (3.11):

$$E_1 = E'_r = a_{ef} E_{r_0} \quad (3.11)$$

Onde:

E_r - Tensão de entrada do rotor referida ao lado do estator [V];

E'_r - Tensão de linha do rotor [V];

a_{ef} - Relação de espiras efetivas;

E_{r_0} - Tensão de entrada constante [V].

A corrente do rotor é definida pela equação (3.12):

$$I_2 = \frac{I_r}{a_{ef}} \quad (3.12)$$

Onde:

I_2 - Corrente do rotor referida ao lado do estator [A];

I_r - Corrente do rotor [A].

A impedância do rotor, é definida através da equação (3.13) como:

$$Z^2 = a^2 \cdot ef \left(\frac{Rr}{s} + jXr_0 \right) \quad (3.13)$$

Onde:

Z_2 - Impedância do rotor referida ao lado do estator [Ω];

Rr - Resistência do rotor [Ω];

s - Escorregamento [%];

jXr_0 - Reatância do rotor com rotor bloqueado [Ω].

Assumindo, as seguintes equações (3.14) e (3.15):

$$R^2 = a^2 \cdot ef \cdot Rr \quad (3.14)$$

$$X^2 = a^2 \cdot ef \cdot Xr_0 \quad (3.15)$$

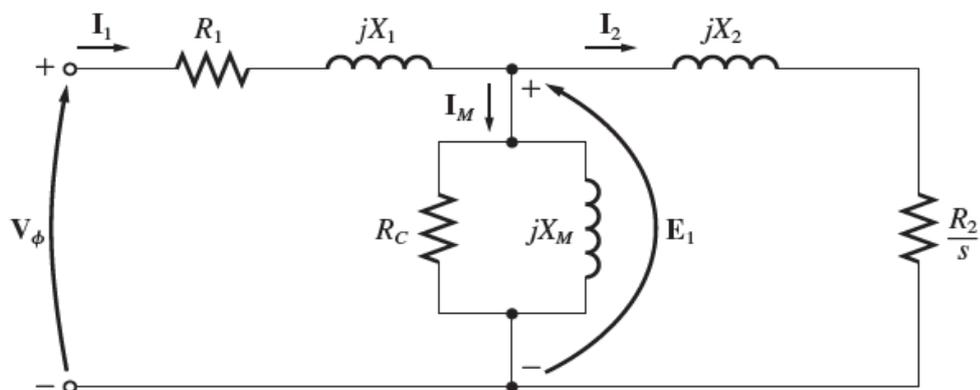
Onde:

R_2 - Resistência do rotor referida ao lado do estator [Ω];

X_2 - Reatância do rotor referida ao lado do estator [Ω].

O circuito equivalente final é demonstrado na figura 3.7:

Figura 3.7 - O modelo de circuito equivalente por fase de um motor de indução



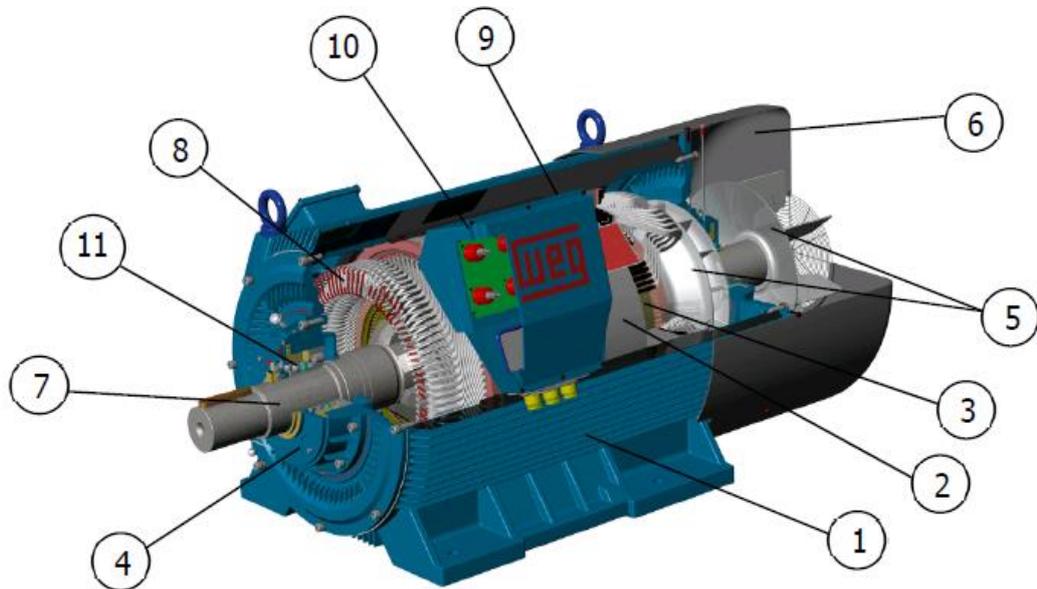
Fonte: CHAPMAN (2013)

3.3 Partes construtivas

Os motores elétricos possuem em comum elementos construtivos de diversas classificações de motores. E também alguns elementos que caracterizam certos motores para funções distintas ou aplicações específicas de suas funções.

A figura 3.8, apresenta os aspectos construtivos de um motor de indução trifásico da linha M da fabricante WEG:

Figura 3.8 - Motor indução trifásico, linha M



Fonte: Catálogo WEG DT-6 (2015)

Legenda:

1. Carcaça;
2. Núcleo de chapas do estator;
3. Núcleo de chapas do rotor;
4. Tampas do mancal;
5. Ventilador interno e externo;
6. Tampa defletora ou proteção do ventilador;
7. Eixo do rotor;

8. Enrolamento trifásico;
9. Caixa de ligação de força;
10. Placa de bornes com isolador e pino de ligação;
11. Rolamento;
12. Gaiola ou enrolamento do rotor.

A figura 3.9 apresenta a ilustração de um enrolamento do rotor (gaiola):

Figura 3.9 - Motor indução trifásico, linha M (corte)

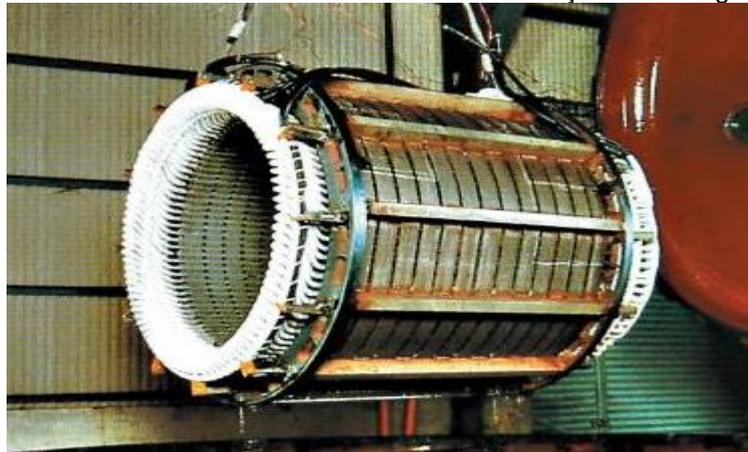


Fonte: Catálogo WEG DT-6 (2015)

3.3.1 Estator

Em motores é a parte magnética fixa na carcaça, é constituído por um núcleo de lâminas de chapas de aço, e em suas ranhuras, são colocadas as bobinas que compõem o enrolamento do estator. A figura 3.10 apresenta a montagem de um pacote de estator de um motor:

Figura 3.10 - Pacote estator motor trifásico de indução rotor de gaiola



Fonte: Catálogo TECO - *Large and High Voltage Motors* (2011)

3.3.2 Rotor

É o componente rotativo da máquina, é constituído pelo seu eixo e por um núcleo de chapas de aço. Nas ranhuras do núcleo podem ser colocadas as bobinas do rotor, em caso de motores de anéis ou gaiola. A figura 3.11 representa um modelo de rotor bobinado:

Figura 3.11 - Rotor bobinado de um motor de indução trifásico



Fonte: Catálogo TECO - *Large and High Voltage Motors* (2011)

3.3.3 Carcaça

É o componente estrutural do motor, seu principal objetivo é suportar e proteger o estator. Sua estrutura permite boa rigidez e baixos níveis de vibração ao motor. De acordo com a figura 3.12 é demonstrado a ilustração de um modelo de carcaça de um motor elétrico:

Figura 3.12 Carcaça de um motor elétrico

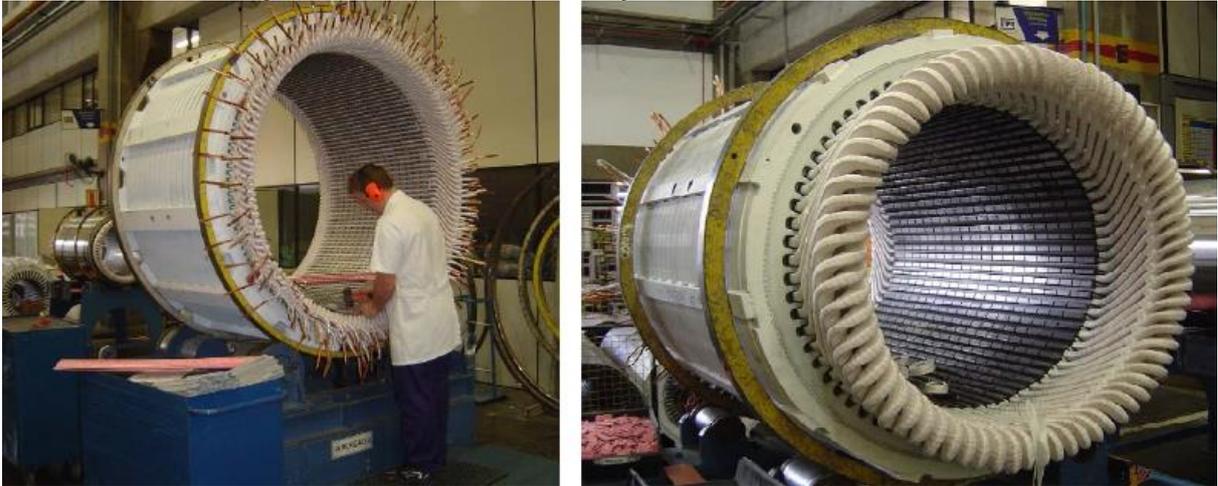


Fonte: Catálogo TECO - *Large and High Voltage Motors* (2011)

3.3.4 Bobinamento

As bobinas dos motores são especificadas para a tensão e aplicação do motor. São produzidas de fio de cobre e isoladas por fitas condutoras e semicondutoras. A figura 3.13 demonstra o processo de inserção das bobinas nas ranhuras do rotor de um motor elétrico:

Figura 3.13 - Processo de inserção das bobinas nas ranhuras do rotor



Fonte: Catálogo WEG DT-6 (2015)

3.4 Aplicações dos motores na indústria

Os motores em suas diversas aplicações acabam sendo expostos a diversos tipos de situação que podem gerar de alguma forma danos a sua vida útil, como operação em condições anormais, como por exemplo com corrente desbalanceada, sobrecarga, sobretensão, subtensão, em condições de temperatura elevada, umidade excessiva, entre outros fatores. Como estes equipamentos operam com tensões e potências elevadas, torna-se necessárias aplicações de medidas protetivas eficazes. Para uma proteção ser eficaz para um determinado motor devem ser levados em consideração as seguintes características do equipamento (CATÁLOGO WEG DT-6, 2015):

- Tamanho do motor (potência);
- Nível de tensão da rede alimentação (baixa ou média);
- Tipo de partida do motor (partida direta, estrela triângulo, *softstarter* e inversor de frequência);
- Impacto que uma falta no motor causará para o sistema de alimentação;

- Grau de necessidade da operação do motor para o processo industrial em que está em funcionamento;
- Considerações econômicas quanto ao custo de proteção em relação ao motor e uma interrupção no processo industrial.

Os institutos de normatização internacional *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) e *Electric Power Research Institute* (EPRI) demonstram em seus estudos que normalmente, 33% das falhas em motores são de origem elétricas, 31% de origem mecânicas e 35% devido as condições do ambiente, manutenções ou outros motivos.

Os potenciais riscos de falhas de funcionamento dos motores de indução trifásicos são classificados, segundo os institutos IEEE e EPRI, como (BLACKBURN, 2006):

- Falta entre fases ou para a terra.
- Danos térmicos provenientes de sobrecarga e rotor bloqueado.
- Condições anormais: operação com correntes de fase desbalanceadas, subtensão ou sobretensão, reversão de fases, reenergização do motor.
- Condições ambientais: atmosferas explosivas, temperatura ambiente elevada, umidade ou sujeira.
- Sequência inicial incompleta.

3.4.1 Aumento de temperatura

As perdas nos motores são oriundas da diferença de potência entre a potência fornecida na ponta do eixo do motor e a potência fornecida na sua alimentação. Estas perdas originam calor que aquecem o enrolamento do motor. Este calor deve ser dissipado para fora da máquina a fim de evitar que o grau de temperatura atinja o limite dos materiais isolantes da bobina.

É de elevada importância que a dissipação do calor seja realizada sempre que a temperatura atingir níveis elevados, o calor é dissipado para fora do interior do motor através da carcaça ou por dispositivos de refrigeração. A realização da dissipação de forma satisfatória depende dos seguintes fatores, segundo a (CATÁLAGO WEG DT-6, 2015):

- Eficiência do sistema de ventilação;
- Área total de dissipação da carcaça;

- Diferença de temperatura entre a superfície externa da carcaça e do ar ambiente.

3.4.2 Classes de isolamento

Materiais isolantes possuem suas próprias características e especificações de trabalho, que os classificam de acordo com a aplicação no qual serão empregados. Quando esses materiais são expostos a situações que os levam a realizar o extremo de suas funções, isso diminui seu tempo de serviço ou sua utilização. Os materiais isolantes podem ser afetados por diversos fatores como temperatura, umidade do ar, vibrações, esforço mecânicos, ambientes corrosivos e entre outros (CATÁLOGO WEG DT-6, 2015).

O material isolante do motor é altamente afetado pela temperatura de trabalho a qual a máquina vai estar exposta, e isso contribui para a longevidade da vida útil do motor. A Classe de Isolamento de máquinas elétricas foi normatizada com a função de que os materiais isolantes e sistemas isolantes fossem definido pelo respectivo limite de temperatura que o mesmo pode suportar sem afetar sua vida útil.

De acordo com as normas NBR-17094 e IEC 60034-1, a classe de isolamento são as seguintes:

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

3.4.3 Aumento de temperatura nos enrolamentos

A medição de temperatura nos enrolamentos da máquina não é uma tarefa simples, pois existe a dificuldade de encontrar o ponto quente que está causando a elevação da temperatura. Sensores de temperatura e termômetros não são muito assertivos para essas funções, justamente porque podem medir um ponto de temperatura que está longe do ponto quente do enrolamento. Existem dois métodos assertivos que realizam esta medição através de variação de resistência ôhmica com

a temperatura e com os sensores tipo RTD's (*Resistance Temperature Detector*) (CATÁLAGO WEG DT-6, 2015).

Em motores elétricos, o ponto mais quente do enrolamento da máquina deve estar abaixo do limite da classe de isolamento. A temperatura total que deve ser analisada é a soma da temperatura ambiente com elevação da temperatura (θ) e a diferença da temperatura média do enrolamento com o a temperatura do ponto mais quente.

As normas NBR-17094 e IEC 60034-1 define a temperatura ambiente como sendo de 40°C, acima desse valor o equipamento está em condições de trabalho especiais. A diferença entre a temperatura média e a do ponto mais quente também é estabelecido de acordo com as classes de isolação, sendo:

- Classe A (5°C)
- Classe E (5°C)
- Classe B (10°C)
- Classe F (10°C)
- Classe H (15°C)

O objetivo da normatização dos limites de temperatura de operação do equipamento é evitar ocorrências acidentais e o envelhecimento precoce dos isolamentos do enrolamento.

4 ELEMENTOS DE PROTEÇÃO

4.1 Disjuntores

Os disjuntores são equipamentos destinados a interromper o fluxo de corrente e manter um isolamento permanente entre elementos da rede. Este equipamento é capaz de interromper correntes elevadas, durante um curto-circuito, inserindo uma barreira de isolamento com o menor espaço de tempo (ANDERSON, 1999).

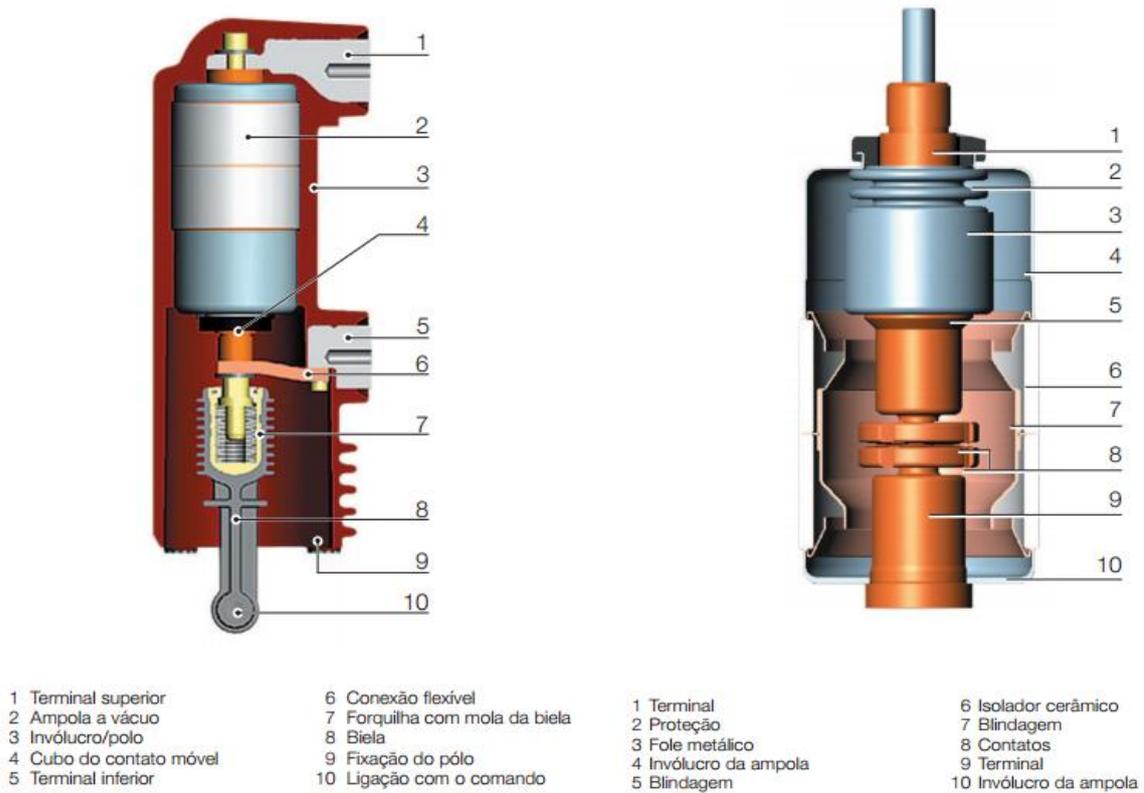
Durante o funcionamento do SEP, frequentemente é necessário ligar ou desligar vários circuitos como, por exemplo, linhas de transmissão, transformadores, usinas geradoras, etc, em condições normais ou anormais. Um disjuntor pode fazer a abertura de um circuito sem carga, sob carga total ou em condições de curto-circuito. Estas características tornam este equipamento muito útil para comutação e proteção de várias partes do sistema elétrico (MEHTA, 2009).

Os disjuntores são classificados com base no meio de extinção de arco utilizado. De modo geral, utilizam métodos de extinção de arco normalmente a óleo isolante, ar comprimido, a gás SF₆ (hexafluoreto de enxofre) ou à vácuo.

4.1.1 - Disjuntores com interrupção à vácuo

Durante a abertura dos contatos no disjuntor à vácuo, um arco elétrico é produzido entre os contatos. No entanto, é rapidamente extinto, devido a presença de vapores, elétrons e íons metálicos produzidos durante o arco, que se condensam rapidamente nas superfícies dos contatos do disjuntor, resultando em uma recuperação rápida da rigidez dielétrica do contato (MEHTA, 2009). A Figura 4.1 demonstra o princípio construtivo de um disjuntor de extinção de arco à vácuo.

Figura 4.1 - Ampola a vácuo encapsulada no polo



Fonte: Manual ABB VD4 disjuntores de média tensão à vácuo (2016)

O nível de vácuo no disjuntor, usado como meio de extinção de arco, é expresso em torr (equivalente a unidade barométrica) na faixa de 10^{-7} a 10^{-5} torr. O vácuo oferece maior resistência isolante e possui propriedades de resfriamento de arco superiores as de qualquer outro meio de extinção. Quando os contatos de um disjuntor são abertos no vácuo, a interrupção ocorre no primeiro instante da abertura dos contatos prevenindo o reinício do arco. (RAO, 2010).

4.1.2 Características construtivas

O disjuntor à vácuo é constituído de um contato fixo, contato móvel e protetor de arco enclausurado dentro de uma câmara de vácuo (Ampola). O contato móvel é conectado ao mecanismo de controle, molas e contatos auxiliares. A ampola é protegida através de um isolamento externo geralmente de vidro ou cerâmica. A figura 4.2 apresenta um disjuntor a vácuo.

Figura 4.2 - Disjuntores à vácuo de média tensão



Fonte: Manual ABB VD4 disjuntores de média tensão a vácuo (2016)

4.1.3 Vantagens do disjuntor à vácuo

- Construção simples;
- Dispositivos independentes, isto é, sem necessidade de recarga periódica de gás ou óleo;
- Tamanho compacto;
- Livre de poluição;
- Vida longa;
- Suporta repetidas manobras operacionais;
- Alta velocidade de recuperação dielétrica;
- Operação silenciosa;
- Oferecem baixa manutenção.

4.1.4 Disjuntores a óleo

Os disjuntores a óleo utilizam como meio de isolamento e extinção de arco o óleo isolante, como nos transformadores. Os contatos são abertos sob carga imerso ao óleo e um arco elétrico é produzido entre eles. O calor gerado pelo arco evapora o óleo ao redor do contato e se separa em um volume substancial de hidrogênio gasoso de alta pressão. O gás hidrogênio ocupa um volume cerca de mil vezes maior que o do óleo. O óleo é, portanto, empurrado para longe do arco e uma bolha de gás de hidrogênio em expansão circula a região do arco e partes adjacentes dos contatos.

A extinção do arco é facilitada principalmente por dois processos, no primeiro instante, o gás hidrogênio possui alta condutividade térmica e esfria o arco, auxiliando assim a desionização do meio entre os contatos. No segundo instante, o gás proporciona maior fluxo no óleo e a força para o espaço entre os contatos, eliminando assim o arco e a corrente do circuito é interrompida (MEHTA, 2009).

4.1.5 Disjuntor a grande volume de óleo (GVO)

Os disjuntores a grandes volumes de óleo possuem alta capacidade de ruptura, são compostos basicamente por um grande reservatório metálico conectado ao potencial de terra. Dentro do reservatório estão instalados os contatos principais, os mecanismos de acionamento e a câmara de extinção. Disjuntores GVO de alta tensão possuem unidades individuais por fase, conectadas mecanicamente pelo mecanismo de operação de abertura e fechamento.

Cada fase é constituída por um reservatório individual contendo duas buchas externas com a função de isolar as partes metálicas do potencial. Os disjuntores GVO foram descontinuados e se tornaram equipamentos obsoletos (RAO, 2010).

4.1.6 Disjuntor a pequeno volume de óleo (PVO)

Os disjuntores a grande volume de óleo executam basicamente duas funções, uma delas é atuar como meio de extinção de arco e a outra é isolar as partes vivas energizadas de partes metálicas. Verificou-se que apenas uma pequena porcentagem de óleo é realmente usada para a extinção de arco, enquanto a maior parte é utilizada para fins de isolamento. Por esta razão, a quantidade de óleo nos disjuntores GVO atinge grandes proporções de tamanho e medida de acordo que a tensão do sistema

aumento. Isso não só aumenta o custo do disjuntor, mas também o tamanho do tanque e sua forma construtiva, em conjunto com o aumento do risco de incêndio e problemas de manutenção.

Apenas uma pequena porcentagem de óleo (cerca de 10% do total) do disjuntor realmente é utilizada para extinção de arco, isso levou pesquisadores e fabricantes a buscar novas técnicas de isolamento e extinção de arco. Levantaram questões econômicas na redução da massa e tanques e sobre o risco de incêndio, isso levou ao desenvolvimento de um disjuntor a pequeno volume de óleo.

Um disjuntor a pequeno volume de óleo emprega materiais sólidos para fins de isolamento e usa uma pequena quantidade de óleo que é suficiente para extinção de arco. Em relação ao arrefecimento do arco, o óleo se comporta de maneira idêntica tanto para GVO quanto para os disjuntores a PVO (RAO, 2010).

4.1.7 Disjuntor a ar comprimido

Os disjuntores a ar comprimido empregam um jato de ar de alta pressão como um meio de extinção de arco. Os contatos são abertos em um fluxo de sopro de ar estabelecido pela abertura da válvula de sopro. O jato de ar esfria o arco e expulsa os resíduos para a atmosfera. Isso aumenta rapidamente a força dielétrica e o meio entre os contatos e impede o restabelecimento do arco e conseqüentemente, o arco é extinguido e o fluxo de corrente é interrompido (MEHTA, 2009).

Os disjuntores a ar comprimido utilizam o ar natural comprimido em reservatórios como elemento de extinção do arco elétrico gerado durante a abertura e fechamento dos contatos.

4.1.8 Disjuntor a hexaflureto de enxofre (SF_6)

Os disjuntores a gás hexaflureto de enxofre são usados como meio de extinção de arco. O SF_6 é um gás eletronegativo, tem uma forte tendência a absorver elétrons livres. Os contatos do disjuntor são abertos em um fluxo de alta pressão de gás SF_6 quando um arco é ocorrido entre eles. Os elétrons livres condutores no arco são rapidamente capturados pelo gás para formar íons negativos relativamente imóveis. Essa perda de elétrons condutores no arco aumenta rapidamente a resistência do isolamento (MEHTA, 2009).

O gás SF₆ demonstra-se eficiente como meio isolante e extinção, possibilitou o aumento dos níveis de tensão e corrente em disjuntores, já que suas propriedades químicas garantem uma isolação mais alta em relação aos disjuntores de ar comprimido. Assim, um disjuntor a gás SF₆ pode ser construído em tamanho reduzido em relação aos disjuntores a ar comprimido, possuindo as mesmas capacidades dielétricas.

Os disjuntores possuem em seu interior dois circuitos com pressões distintas. Um circuito com alta pressão (20 bar), e outro com baixa pressão (2,5 bar). Essa diferença de pressão é necessária para que haja fluxo constante de gás do circuito de alta pressão para o de baixa, passando entre os contatos do disjuntor por meio das válvulas de descarga. O gás é injetado em um reservatório intermediário de pressão, extinguindo o arco elétrico. Os próprios mecanismos de transmissão do disjuntor injetam o gás, que se movimentam no momento da operação. Após a abertura dos contatos, o gás é descarregado para o circuito de baixa pressão, e assim, bombeado de volta ao circuito de alta pressão por meio de um compressor (RAO, 2010).

Na tabela 4.1 é apresentada a comparação entre os diversos tipos de disjuntores e suas principais características.

Tabela 4.1 - Comparação de disjuntores

Tipo	Método de extinção	Capacidade de ruptura de tensão	Características de projeto	Observações
Disjuntor de interrupção de ar	Ar à pressão atmosférica	430-600V, 5-15-35 MVA recentemente 3,6-12 kV, 500 MVA	Incorpora: dissipadores de arco, divisores de arco e bobinas magnéticas	Usado para baixas e médias tensões A.C. D.C. Disjuntores industriais. Tem recursos de limitação atuais.
Disjuntores de pequeno porte	Ar à pressão atmosférica	430-600 V	Tamanho pequeno, recurso limitador de corrente	Usado para baixas tensões.

Disjuntor a óleo (Grandes volumes)	Óleo dielétrico	12 kV, 36 kV	Um tanque até 36 kV, 3 tanques acima de 36 kV, equipado com dispositivos de controle de arco	Ficando obsoleto usado até 12 kV, 500 MVA.
Disjuntor de óleo (Pequenos Volume)	Óleo dielétrico	Preferencialmente para 3,6 kV a 145 kV	A câmara de interrupção do circuito é separada da câmara de suporte. Tamanho pequeno, dispositivo de controle de arco usado.	Usado para painéis fechados de metal até 36 kV, tipo Outdoor entre 36 e 245 kV. Agora substituído pelo disjuntor SF ₆
Disjuntor de jato de ar	Ar comprimido (20-30) kg / cm ²	245 kV, 35,000 MVA até 1100kV, 50,000 MVA	Construção do tipo de unidade várias unidades por polo, sistema de ar comprimido auxiliar necessário.	Adequado para todas as aplicações de EHV, fecho rápido da abertura. Também para o forno de forno a arco. Agora CB por 145 kV, e acima
Disjuntor SF ₆	Gás SF ₆ (5 kg / cm ²)	145 kV, 7500 MVA 245 kV, 70,000 MVA 12 kV, 1000 MVA 36 kV, 2000 MVA 420 kV, 40 kA	Um polo do interruptor até 245 kV	Adequado para comutadores SF ₆ e Swgr de média tensão. Disjuntor EHV. Livre de manutenção.
Disjuntor a vácuo	Vácuo	Preferencialmente para quadros internos com classificação de até 36 kV, 750 MVA	Variedade de projetos, longa vida, pequena manutenção.	Adequado para uma variedade de aplicações de 3,6 kV a 36 kV
H.V.D.C. Disjuntor	Óleo ou jato de ar	33 kV, 2kA	Corrente artificial zero, ligando os condensadores.	Usado para o disjuntor de transferência de retorno metálico.

4.2 Transformadores de medidas

4.2.1 Introdução

O transformador de corrente e o transformador de potencial são conhecidos também como transdutores. Convertem valores de correntes e tensões do sistema de potência em níveis aceitáveis para instrumentos de medição e controle. Proporcionam um isolamento galvânico entre os enrolamentos primário e secundário, e entre os relés de proteção e outros instrumentos de medição.

Quando os valores de corrente ou tensão em um circuito de potência são elevados, da ordem de milhares de Amperes (kA) ou Volts (kV), as conexões entre o sistema de potência aos relés ou instrumentos de medição são feitas através de transformadores. Os transformadores de medição são necessários para reproduzir em escala reduzida os valores de entrada do SEP (RUSH, 2011).

Os transformadores de corrente e de potencial medem continuamente estas grandezas em um sistema elétrico. São responsáveis para dar sinais de realimentação para os relés de proteção que permitem detectar condições anormais de funcionamento (HEWITSON et al, 2004).

Os transformadores de medida, de modo geral, podem ser representados eletricamente através do esquema da figura 4.3:

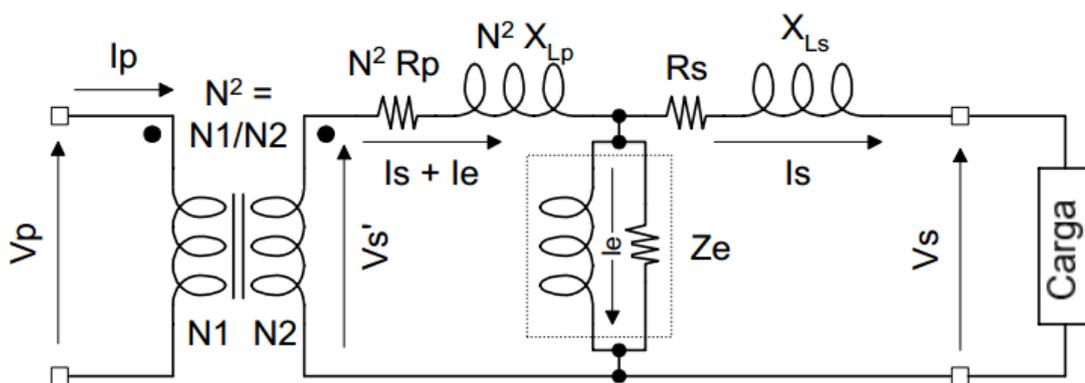


Figura 4.3 - Esquema do circuito equivalente dos transformadores
Fonte: HOROWITZ (2014)

Onde:

V_p – Tensão primária [kV];

I_p – Corrente do enrolamento primário [A];

N^2 - Relação de transformação;

N_1/N_2 – Números de espiras do primário/secundário;
 V_s' – Tensão induzida no secundário [V];
 $I_s + I_e$ – Corrente de magnetização [A];
 $N^2 R_p$ – Resistência do primário refletida ao secundário [Ω];
 $N^2 X_{lp}$ – Reatância do primário refletida ao secundário [Ω];
 Z_e – Impedância do ramo de magnetização do núcleo [Ω];
 I_s – Corrente do enrolamento secundário [A];
 $R_s + X_{ls}$ – Impedância do secundário [Ω];
 V_s – Tensão na carga [V].

4.2.2 Transformador de corrente

Os transformadores de corrente utilizados na proteção possuem formas construtivas semelhantes, apresentando pequenas particularidades. Os TCs são constituídos por enrolamentos primários e secundários acoplados magneticamente e enrolados em um núcleo de ferro. O enrolamento primário está ligado em série com a rede, ao contrário dos transformadores de tensão. Portanto, devem suportar a corrente de curto-circuito da rede (HEWITSON et al, 2004).

Os transformadores de correntes possuem enrolamento primário, geralmente com poucas espiras e fios com seções maiores para suportar a condução de corrente nominal do sistema. O secundário é constituído por um número maior de espiras e corrente máxima padronizada em 5 A, conforme as normas IEC 61689-2-2011 e NBR-6856-1992. No Brasil, os TCs têm sua corrente secundária padronizada em 5 A, enquanto na Europa a mesma é normalizada em 1 A. Através do fenômeno de conversão eletromagnética, os TCs convertem correntes elevadas que circulam no enrolamento primário, reduzindo em pequenas correntes no secundário (MAMEDE FILHO, 2011).

As principais funções dos transformadores de corrente são:

- Transformar correntes ou tensões normalmente de valores elevados para um valor de fácil manuseio para relés e instrumentos;
- Isolar a parte de proteção, controle e medição do circuito de alta tensão primária;

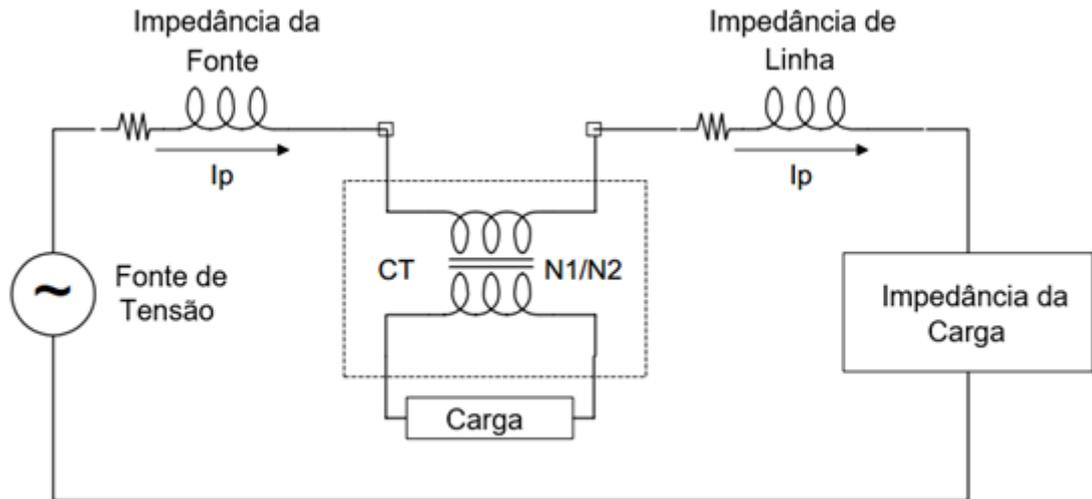
- Estabelecer um valor de corrente adequada para ser usada nos equipamentos tanto de medição quanto de proteção.

Os TCs podem ser classificados quanto ao tipo construtivo e de ligação de seus enrolamentos. Os principais tipos de TCs são:

- **TC tipo barra:** O enrolamento primário é constituído por uma barra fixa através do núcleo do transformador. São utilizados em painéis de comando de corrente elevada, em subestações de potência de média e alta tensão e para uso em proteção e medição.
- **TC tipo enrolado:** O enrolamento primário é constituído por uma ou mais espiras envolvendo o núcleo do transformador.
- **TC tipo janela:** O transformador não possui conexões físicas no enrolamento primário. É constituído por uma abertura através do núcleo, por onde passa o condutor para formar o circuito primário.
- **TC tipo bucha:** Semelhante ao TC do tipo barra. Porém, a instalação é feita na bucha dos equipamentos, tais como transformadores, disjuntores, entre outros, atuando como enrolamento primário.
- **TC tipo núcleo dividido:** Semelhante ao TC do tipo janela, onde o núcleo pode ser separado permitindo envolver o condutor, funcionando como um enrolamento primário.
- **TC com vários enrolamentos primários:** É constituído por vários enrolamentos primários, montado isoladamente um do outro e possui apenas um enrolamento secundário.
- **TC com vários núcleos secundários:** É constituído de dois ou mais enrolamentos secundários com núcleos individuais, formando somente um conjunto com um enrolamento primário.
- **TC com vários enrolamentos secundários:** Apresenta um único núcleo envolvido pelo enrolamento primário e possui dois ou mais enrolamentos secundários individuais, que podem ser interligados em série ou em paralelo.
- **TC tipo derivação no secundário:** Apresenta um único núcleo envolvido pelos enrolamentos primário e secundário, sendo o núcleo dotado de uma ou mais derivações.

A Figura 4.4 demonstra um transformador de corrente conectado a uma linha de transmissão:

Figura 4.4 - Conexão de transformador de corrente de linha de transmissão



Fonte: HOROWITZ (2014)

A classe de exatidão é a grandeza que expressa o erro nominal do transformador de corrente, levando em conta o erro de relação de transformação e de defasagem entre as correntes primárias e secundárias. Os limites de erro para classes de exatidão entre o intervalo de 0,1% a 1,0% são aplicados para fins de testes de laboratório e medição de faturamento. Os limites de erro para classe de exatidão de 3% a 10% são utilizados em TCS visando a proteção do sistema elétrico.

A tabela 4.2 apresenta as relações de transformações simples dos transformadores de corrente de acordo com a NBR 6856-1992.

Tabela 4.2- Relação de transformação dos transformadores de corrente

Relações nominais simples					
Corrente primária nominal (A)	Relação nominal	Corrente primária nominal (A)	Relação nominal	Corrente primária nominal (A)	Relação nominal
5	1:1	100	20:1	1000	200:1
10	2:1	125	25:1	1200	240:1
15	3:1	150	30:1	1500	300:1
20	4:1	200	40:1	2000	400:1
25	5:1	250	50:1	3000	600:1
30	6:1	300	60:1	4000	800:1

40	8:1	400	80:1	5000	1000:1
50	10:1	500	100:1	6000	1200:1
60	12:1	600	120:1	8000	1600:1
75	15:1	800	160:1	-	-

Fonte: ABNT NBR 6856-1992

4.2.3 Transformador de potencial

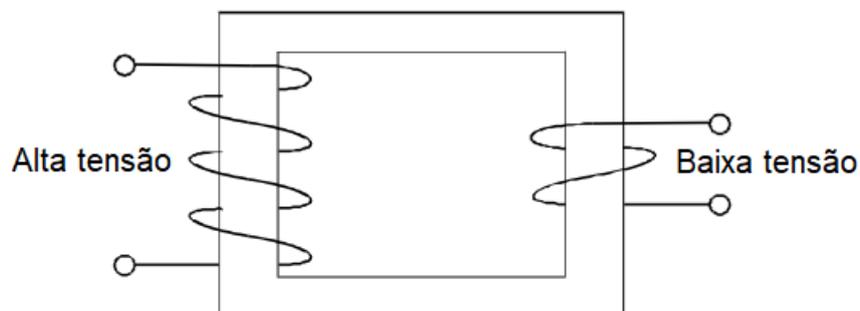
Os transformadores de potencial são equipamentos que reduzem o nível de tensão de forma a permitir que os instrumentos de medição e proteção funcionem adequadamente, sem que estejam conectados a tensão nominal do sistema elétrico. Na sua forma mais simples, o transformador de potencial possui um enrolamento primário de muitas espiras e um enrolamento secundário, de tal forma que a sua relação de transformação permita obter no secundário um valor padrão de tensão de 115 V ou $115/\sqrt{3}$ conforme as normas IEC 61689-3:2011 e NBR 6855-1992 (MAMEDE FILHO, 2011).

4.2.4 Transformador de potencial do tipo indutivo

São constituídos em grande parte para utilização em níveis de tensão de até 138kV devido ao seu menor custo em relação aos transformadores de potencial do tipo capacitivo. Os transformadores de potencial funcionam com base na conversão eletromagnética entre o enrolamento primário, envolvido por um núcleo de ferro silício que é comum ao enrolamento secundário (MAMEDE FILHO, 2011).

Os transformadores de potencial do tipo indutivo, de modo geral, podem ser representados conforme demonstrado na figura 4.5:

Figura 4.5 - Transformador de potencial indutivo



Fonte: HEWITSON et al (2004)

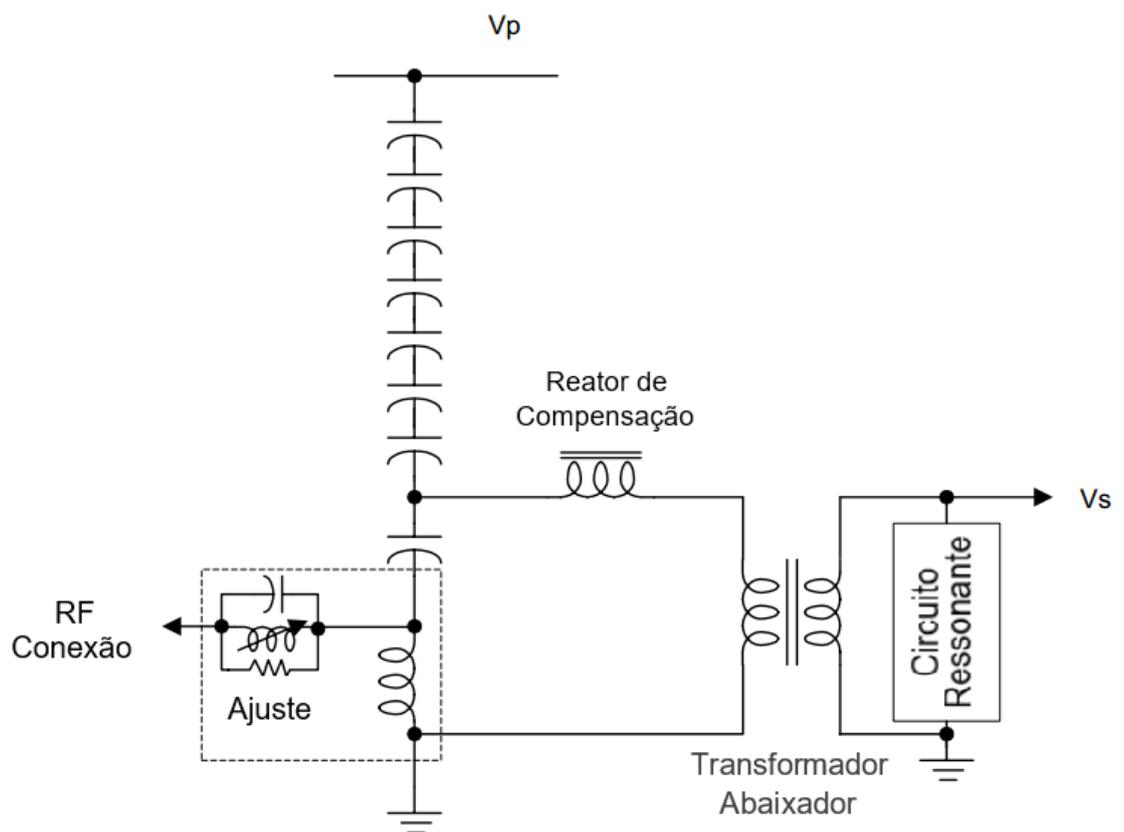
4.2.5 Transformador de potencial do tipo capacitivo

Os transformadores de potencial capacitivos são constituídos de um divisor capacitivo, onde as células que formam o condensador são ligadas em série e o conjunto fica imerso a óleo isolante no interior de um invólucro de porcelana.

Os TPs do tipo capacitivo são normalmente utilizados em tensões iguais ou superiores a 138 kV e em redes de extra alta tensão, a partir de 230 kV. Os capacitores também permitem a injeção de sinais de alta frequência, da ordem de 50kHz a 400kHz nos condutores das linhas de transmissão e fornecem comunicação de ponta a ponta entre subestações para relés de distância, telemetria, supervisão e comunicações de voz. Os TPCs são usados tanto para fins de proteção como para comunicação (HEWITSON et al, 2004).

Os transformadores de potencial do tipo capacitivo, de modo geral, podem ser representados eletricamente através do esquema da figura 4.6:

Figura 4.6 - Transformador de potencial capacitivo



Fonte: HOROWITZ (2014)

Onde:

Vp – Tensão primária [kV];

Vs – Tensão do enrolamento secundário [V];

RF – Rádio frequência [kHz].

Os transformadores de potencial devem ser capazes de produzir tensões secundárias proporcionais as tensões primárias em uma ampla faixa de tensão de um sistema. Transformadores de potencial utilizados na proteção de sistemas elétricos devem apresentar precisão razoável em uma ampla faixa de tensão de 0 a 173% do normal. No entanto, a precisão é mais relevante para fins de medição, enquanto que para fins de proteção, os erros admissíveis variam dependendo da carga e da finalidade de utilização e os valores típicos representados na tabela 4.3 de acordo com a norma IEC 61689-3:2011 (HEWITSON et al, 2004).

Tabela 4.3 - Classes de exatidão de transformadores de potencial

Classe	Alcance		Limites de Erros		Aplicação
	Carga (%)	Tensão (%)	Relação (%)	Deslocamento de Fase (Minutos)	
0.1	25-100 ¹⁾	80-120	0.1	5	Laboratório
0.2	25-100 ¹⁾	80-120	0.2	10	Precisão e medição de faturamento
0.5	25-100 ¹⁾	80-120	0.5	20	Medição de faturamento padrão
1.0	25-100 ¹⁾	80-120	1.0	40	Medidores industriais
3.0	25-100 ¹⁾	80-120	3.0	-	Instrumentos
3P	25-100 ¹⁾	5-FV ²⁾	3.0	120	Proteção
6P	25-100 ¹⁾	5-FV ²⁾	6.0	240	Proteção

Fonte: IEC 61689-3:2011

Os TPs são separados em três grupos de ligação:

- Grupo 1: São projetados para sistemas onde se necessita somente as tensões fase-fase, como em algumas funções de proteção e circuitos de medição. Normalmente são utilizados em circuitos até 69 kV, devem suportar continuamente 10% de sobrecarga.
- Grupo 2: São projetados para sistemas diretamente aterrados, conectados entre fase-neutro. Normalmente são utilizados em circuitos de AT e EAT.

- Grupo 3: São projetados para sistemas isolados, onde não se garante a eficácia do aterramento. São conectados entre fase-neutro e normalmente são utilizados em circuitos de AT e EAT.

As tensões nominais primárias e as relações de transformações estão especificadas na tabela 4.4 em seus respectivos grupos.

Tabela 4.4 - Tensões primárias e relações nominais

Tensões primárias nominais e relações nominais				
Grupo 1 para ligação de fase para fase		Grupos 2 e 3 para ligação de fase para neutro		
Tensão primária nominal (V)	Relação nominal	Tensão primária nominal (V)	Relação nominal	
			Tensão secundária nominal (V)	
			$115\sqrt{3}$	Aprox. 115
115	1:1	-	-	-
230	2:1	$230\sqrt{3}$	2:1	1,2;1
402,5	3,5:1	$402,5\sqrt{3}$	3,5:1	2:1
460	4:1	$460\sqrt{3}$	4:1	2,4:1
575	5:1	$575\sqrt{3}$	5:1	3:1
2300	20:1	$2300\sqrt{3}$	20:1	12:1
3450	30:1	$3450\sqrt{3}$	30:1	17,5:1
4025	35:1	$4025\sqrt{3}$	35:1	20:1
4600	40:1	$4600\sqrt{3}$	40:1	24:1
6900	60:1	$6900\sqrt{3}$	60:1	35:1
8050	70:1	$8050\sqrt{3}$	70:1	40:1
11500	100:1	$11500\sqrt{3}$	100:1	60:1
13800	120:1	$13800\sqrt{3}$	120:1	70:1
23000	200:1	$23000\sqrt{3}$	200:1	120:1
34500	300:1	$34500\sqrt{3}$	300:1	175:1
46000	400:1	$46000\sqrt{3}$	400:1	240:1
69000	600:1	$69000\sqrt{3}$	600:1	350:1
-	-	$138000\sqrt{3}$	1200:1	700:1
-	-	$230000\sqrt{3}$	2000:1	1200:1

Fonte: ABNT NBR 6855-1992

Nota: As relações nominais de TPI com tensões primárias nominais superiores a 69 kV, para o grupo 1, e 230 kV, para os grupos 2 e 3.

4.3 Relés de proteção

O instituto de padronização internacional IEEE, define relés de proteção como um dispositivo elétrico projetado para responder a condições de entradas prescritas, após a ocorrência de condições específicas, que resulta em operações de contatos elétricos ou em uma mudança abrupta nos circuitos elétricos associados. Em uma nota adicional, acrescentou-se que geralmente os sinais de entradas são elétricos, mas podem ser sinais de origem mecânica, térmica, outras grandezas físicas ou uma combinação (BLACKBURN, 2006).

O objetivo do relé de proteção é reconhecer uma condição específica do sistema, sendo ela uma condição anormal, uma ação é iniciada em resposta aos ajustes pré-definidos. Consistem em elementos lógicos onde se analisa as informações recebidas em relação à condição do sistema, caso ocorra alguma anormalidade no sistema o dispositivo realiza uma ação. Comparações de grandezas elétricas, tempo de duração e repetidas ocorrências são parâmetros observados através do relé (ANDERSON, 1999).

Um dos requisitos básicos de proteção são medições corretas das condições normais e anormais de um sistema. Nos sistemas elétricos, as medições de tensão e corrente são coletadas através de transformadores de corrente e transformadores de potencial capazes de medir esses parâmetros, estes equipamentos são eficazes para fornecer medições precisas ao decorrer de condições de falhas (HEWITSON et al, 2004).

Através dos TCs e TPs as grandezas medidas são convertidas em sinais analógicos e/ou digitais para os relés serem sensibilizados, que por sua vez isolam os circuitos, em caso de defeitos. Na maioria dos casos, os relés fornecem dupla função, ou seja, alarme e abertura (*trip* – comando de abertura), quando uma anormalidade ocorre no sistema.

O objetivo principal do sistema de proteção é manter níveis satisfatórios de continuidade de serviço e disponibilidade de máquinas e equipamentos, e com isso minimizar o tempo de interrupções. A falta de energia elétrica no sistema pode ser relacionada com sua causa de origem, e às vezes inevitáveis, como, consequências de eventos naturais, acidentes físicos, falhas de equipamentos ou falhas de operações devido a erro humano (BLACKBURN, 2006).

4.3.1 Relés eletromecânicos

Os relés eletromecânicos foram um dos primeiros equipamentos de proteção a serem utilizados no SEP, surgiram em 1901 e consistiam em um relé de proteção do tipo indução (MAMEDE FILHO, 2011).

Existem diferentes tipos de relés eletromecânicos e são classificados de acordo com seu mecanismo de ação, dentre eles:

- Armadura de atracamento;
- Disco de indução;
- Bobina móvel;
- Térmico;
- Motorizado e mecânico.

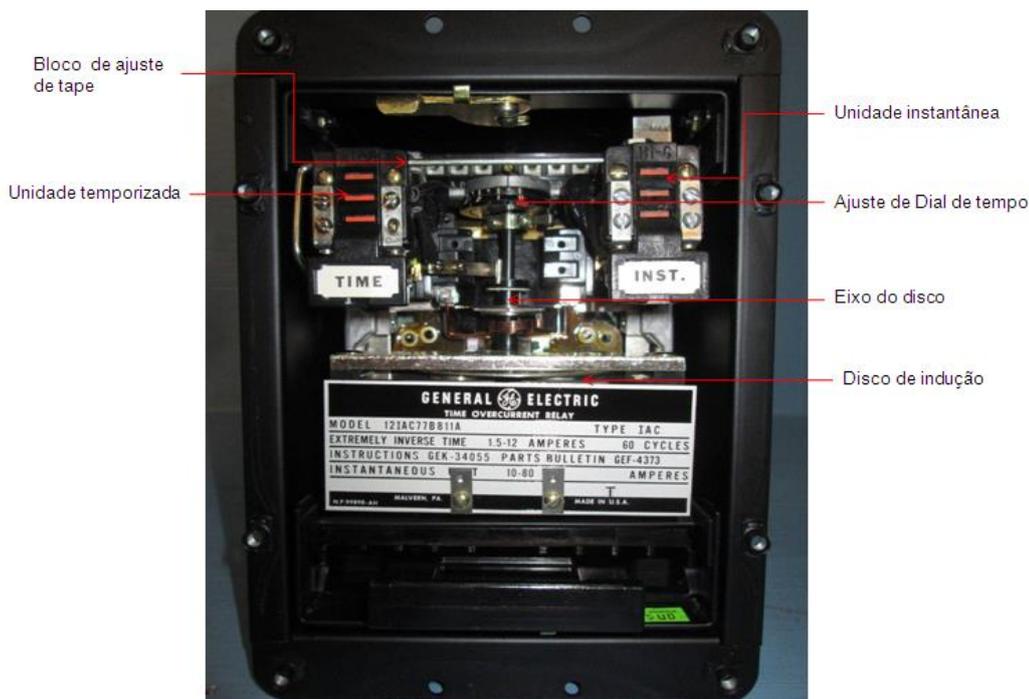
Porém o tipo de relé com maior destaque entre eles foi o disco de indução (RUSH, 2011).

Os relés de indução são equipamentos robustos, constituídos por bobinas, disco de indução, molas, contatos fixos e móveis, e apresenta facilidade de ajustes nas funções de proteções (MAMEDE FILHO, 2011).

Seu princípio de funcionamento ocorre através do uso de força mecânica. O fluxo de corrente percorre o enrolamento de uma bobina envolvida em um ou mais núcleos magnéticos que induz uma corrente ao disco. Devido a essa corrente, surge um novo fluxo que interage com o anterior produzindo um torque no disco (RUSH, 2011).

A figura 4.7 apresenta os aspectos construtivos de um relé eletromecânico de indução:

Figura 4.7 - Relé eletromecânico disco de indução



Fonte: Autor (2018)

4.3.2 Relés eletrônicos (estáticos)

Com o desenvolvimento dos dispositivos eletrônicos, tais como o transistor na década de 1950, os relés de proteção eletrônicos foram introduzidos entre as décadas de 1960 e 1970. A experiência adquirida com o uso da eletrônica nos sistemas de proteção permitiu maior flexibilidade, confiabilidade e melhor desempenho, devido a estes avanços os relés eletrônicos foram instalados nas primeiras subestações de alta tensão (HEWITSON et al, 2004).

O termo estático está relacionado a ausência de partes móveis, restrita somente aos contatos de saída que são geralmente atraídos como os relés de armadura (RUSH, 2011).

Apresentam dimensões reduzidas em relação aos relés eletromecânicos de indução e são constituídos de circuitos integrados dedicados a cada função desempenhada. Os relés eletrônicos não trouxeram grandes inovações para o sistema de proteção, na prática os relés eletrônicos foram projetados para igualar ou melhorar as características básicas dos relés eletromecânicos. As funções aplicadas aos relés eletromecânicos utilizando peças mecânicas e tecnologias de indução magnética foram reproduzidas através de circuitos impressos nos relés eletrônicos (MAMEDE FILHO, 2011).

A figura 4.8 apresenta a interface de um relé de proteção eletrônico (estático):

Figura 4.8 - Relé eletrônico (estático)



Fonte: Autor (2018)

4.3.3 Relés digitais

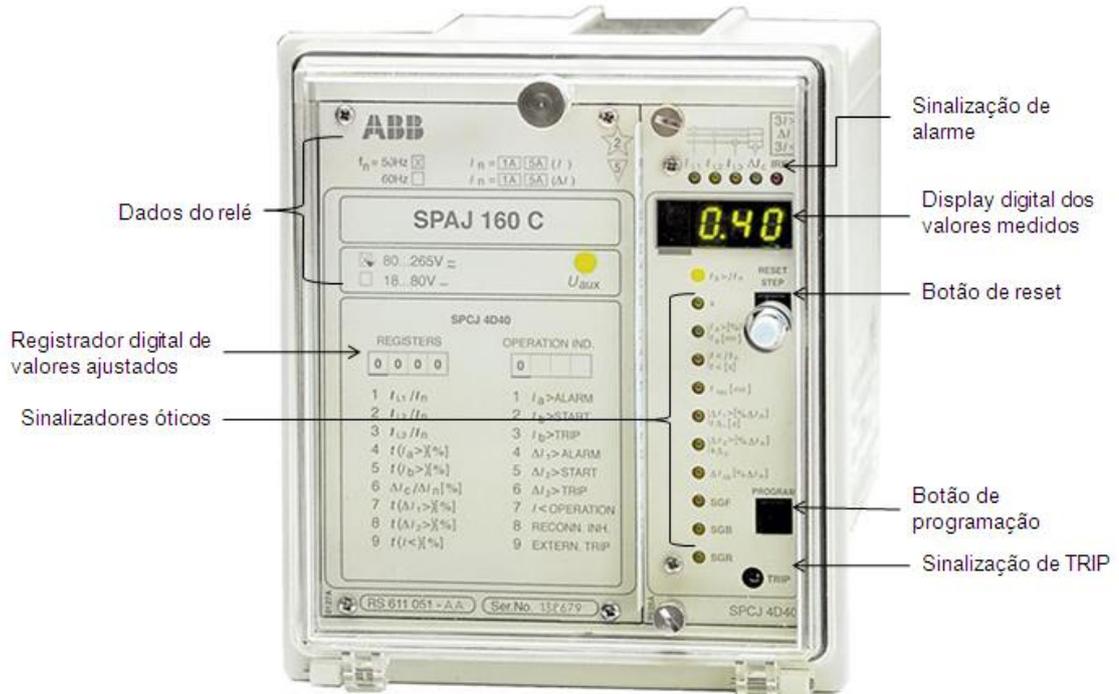
Na década de 1980, com o avanço na tecnologia os microprocessadores e microcontroladores, passaram a substituir os circuitos analógicos utilizados nos relés estáticos. Os relés digitais introduziram os conversores analógicos/digitais (A/D) para medição de variáveis analógicas. O microprocessador utiliza técnicas de cálculo através da transformada discreta de *Fourier* para implementação de algoritmos. No entanto, esses microprocessadores têm capacidade de processamento e memória associadas limitadas em comparação com relés numéricos (RUSH, 2011).

Os relés digitais normalmente usam microprocessadores de 8 ou 16 *bits*. A capacidade limitada dos microprocessadores usados nos relés digitais restringe o número de amostras da forma de onda que podem ser medidas por ciclos, limitando a velocidade de operação do relé (ALSTOM, 2011).

A funcionalidade do relé tende a ser limitada, ficando restrita basicamente às funções de proteção. Quando comparados aos relés eletromecânicos ou estáticos, nota-se uma variedade de funções e ajustes, maior precisão e recursos de comunicação integrado (RUSH, 2011).

A figura 4.9 apresenta um relé de proteção digital:

Figura 4.9 - Relé digital



Fonte: Manual ABB capacitor protection relay SPAJ 160 C (1995)

4.3.4 - Relés microprocessados

Os relés de proteção microprocessados podem ser vistos como a evolução natural dos relés digitais com o avanço tecnológico. Os relés microprocessados, tornaram-se conhecidos como relés numéricos ou, em inglês “*Intelligent Electronic Device*” (IED) que significa dispositivos eletrônicos inteligentes. São mais que dispositivos de proteção, são computadores multifuncionais com alta capacidade de processamento, e integração de *softwares* (RUSH, 2011).

Embora os relés digitais tenham representado um grande salto tecnológico nas décadas de 80 e 90, os dispositivos digitais ainda possuíam, pequena capacidade de processamento e números de funções de proteção limitadas. Os relés digitais permitiam conexões e configuração através do computador, mas ainda não era possível a execução de lógicas, medições, supervisão, registro de eventos, oscilografia, pois estas funções poderiam comprometer o tempo de processamento das funções de proteção (RUSH, 2011).

O relé microprocessado é um dispositivo eletrônico digital, que deriva as suas características por meio de uma série de instruções pré-programadas e cálculos algoritmos, com base nas configurações selecionadas, os sinais de corrente ou tensões medidas através dos TCs e TPs (HEWITSON et al, 2004).

Com o avanço tecnológico e custos mais acessíveis dos componentes digitais (memória, conversores, entradas e saídas, etc) convergiu para fabricação de um único equipamento com uma variedade de funções denominado, *one box solution*, (solução caixa única). O desempenho computacional proporcionou o uso de múltiplos processadores e a implementação de diversas funções fossem desenvolvidas em equipamentos de *hardware* diferentes e possam ser executadas por um único equipamento (RUSH, 2011).

A Figura 4.10 apresenta a estrutura de um relé microprocessado para aplicação em motores:

Figura 4.10 - Relé multifunção microprocessado



Fonte: Manual SEL-710 Motor Protection Relay (2017)

4.3.4.1 Vantagens e principais características

- Diversos grupos de ajustes;
- Maior faixa de ajuste de parâmetros;
- Comunicação remota;

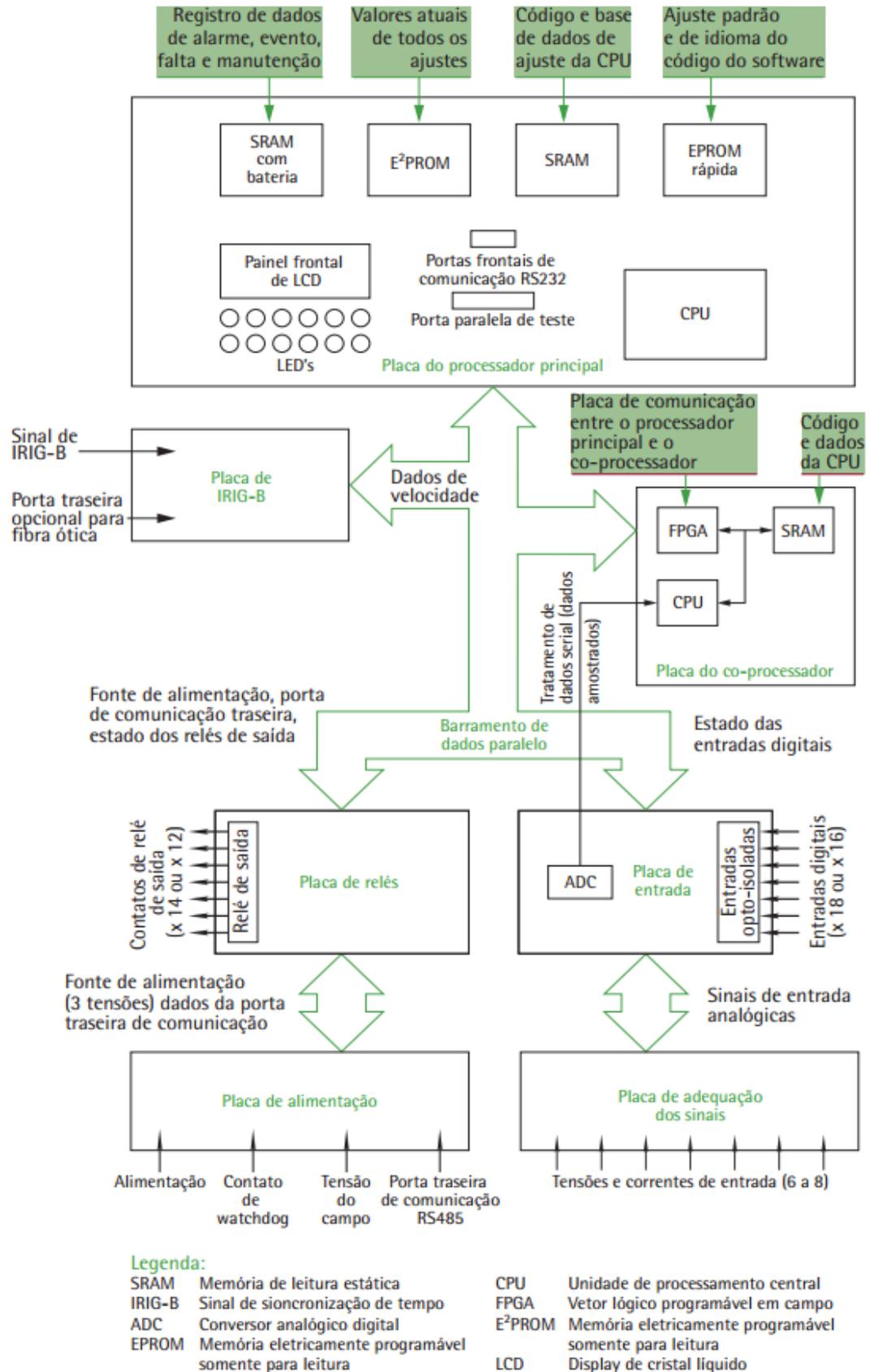
- Auto supervisão (monitoramento constante feito por *software* dedicado que informa o funcionamento de diversos componentes de *hardware* que integram o relé, tais como, processadores, memórias, entradas e saídas);
- Medições de grandezas elétricas;
- Localizador de distância de falta;
- Monitoramento do disjuntor (estado, condição);
- Funções de proteção de retaguarda (*backup*) embarcada;
- Consistência no tempo de operação;
- Lógica definida pelo usuário;
- Relatório e registro de ocorrências;
- Maior flexibilidade;
- Redução no espaço físico.

4.3.5 - Arquitetura de *hardware*

A arquitetura básica do *hardware* consiste em um ou mais microprocessadores, memórias, entradas e saídas digitais, entradas e saídas analógicas e uma fonte de alimentação. Os sinais analógicos são convertidos para digitais usando conversores A/D que são interpretados pela CPU. Múltiplos processadores são utilizados para otimização do relé. Um deles, é usado para controlar interfaces I/O, interface homem máquina (IHM) e qualquer lógica associada.

Os outros são dedicados aos algoritmos e as funções de proteção e *software*. O barramento de comunicação interno interliga os *hardwares*, portanto, é um componente crítico no projeto e deve funcionar em alta velocidade e baixos níveis de tensão, mas que sejam imunes a interferência e ruídos de centro de controle de motores (CCM) e subestações. Entradas digitais são opticamente isoladas para impedir que transientes sejam transmitidos para o circuito interno. Já as entradas analógicas são isoladas usando transformadores de precisão para manter a exatidão das medições coletadas do sistema (RUSH, 2011). A arquitetura típica de um relé numérico é mostrada na figura 4.11:

Figura 4.11 - Arquitetura típica de *hardware* de um relé microprocessado (numérico)



Fonte: RUSH (2011)

4.3.5.1 Componentes da arquitetura de *hardware*

De maneira geral, os *hardwares* instalados nos relés microprocessadores realizam as seguintes funções:

- Conversor Analógico Digital: A função do conversor analógico digital é converter os valores de amostras de grandezas elétricas (tensão, corrente) para a forma digital, geralmente uma palavra de 8 ou 16 *bits*. Os dados digitais são então passados para o microprocessador, nos quais algoritmos atuam sobre ele para produzir representações matemáticas fasoriais das grandezas medidas (BLACKBURN, 2006).

- Unidade de processamento Central (CPU): O processador central é o ponto principal do sistema, toda lógica é executada através dele. A CPU recebe os sinais digitais do conversor e executa os programas de proteção, medição, supervisão e controle (ANDERSON, 1999).

- Memórias:

- A memória estática de acesso aleatório (SRAM), é utilizada como um bloco de rascunho para medir e calcular os resultados das amostras de entradas e também armazenar dados que serão guardados posteriormente em uma memória não volátil.
- A memória somente de leitura (ROM), contém os programas de inicialização do sistema, memória programada somente pelo fabricante do equipamento.
- A memória apagável apenas de leitura (EPROM), pode ser programada por diversas vezes. Contém ajustes padrão e de idioma do código do *software*. Antes de qualquer gravação, seu conteúdo prévio é apagado com uso de raios ultravioletas antes de qualquer regravação.
- A memória eletricamente apagável programável apenas de leitura (EEPROM), é responsável pelo armazenamento dos ajustes de programação do relé (HEWITSON et al, 2004).

- Métodos de Comunicação: Permitem a troca de informação remota ou locais para ajustes de parâmetros, leitura de registro de faltas e relatórios. O protocolo RS232 (*Recommended Standart 232*), permite comunicação bidirecional (*fullduplex*) através de uma porta serial, sendo limitada apenas uma comunicação entre dois dispositivos. O protocolo RS484 (*Recommended Standart 485*) permite comunicação

unidirecional (*Half-duplex*), através de uma conexão simples de par trançado com os dispositivos, sendo possível 32 dispositivos em um mesmo canal. O principal inconveniente deste método, está relacionado ao tipo de técnica de perguntas conhecida por sondagem (*Polling*), que solicita a cada dispositivo o valor necessário e então espera a resposta antes de seguir para o dispositivo seguinte (RUSH, 2011).

- Entradas e Saídas Digitais (*I/O*): Entradas e saídas digitais operam com valores binários, ou seja, 0 ou 1. As entradas digitais recebem todas as informações de intertravamentos e estado de equipamentos, tais como seccionadoras, disjuntores, transformadores, etc. As saídas digitais são destinadas a cumprir as funções do relé, podendo estar associadas a alarmes, comandos de abertura, fechamento de disjuntores e sinais de *trip*.

- Fonte de alimentação: Fornece energia ao relé normalmente por bancos de baterias proveniente de um retificador. As tensões auxiliares mais empregadas são: 24 - 48 - 125 - 220 Vcc. A tolerância de variação da tensão auxiliar está compreendida entre 10 a 20% do valor nominal.

- *Watchdog*: O microprocessador e a execução de programas são supervisionados. Caso o sistema encontre arquivos corrompidos ou falhas no armazenamento de ajustes, o dispositivo reinicia o sistema eliminando o erro no programa principal (HEWITSON et al, 2004).

- *Inter-Range Instrumentation Group* (IRIG-B): Função de sincronização por meio de um relógio externo. O sinal IRIG-B pode ser recebido por diversas fontes. Atualmente, a fonte externa mais utilizada são os satélites com tecnologia GPS (*Global Positioning System*), onde é permitido o registro de perturbações e dados de consumo de energia em alta velocidade (RUSH, 2011).

- *Field Programmable Gate Array* (FPGA): Implementa diversos blocos de circuitos adicionais responsáveis por agrupar as saídas seriais dos conversores A/D, por monitorar os módulos de entrada e saída digital e disponibilizar status para os processadores, teclas e display.

4.4 Funções de proteção para motores trifásicos industriais

O objetivo da proteção do motor elétrico é acompanhar constantemente a corrente que flui para o motor para protegê-lo contra falhas de diversas origens, tais como sobrecorrentes ou sobrecargas, e assim desliga-lo quando surgir uma situação anormal. A principal função de proteção utilizada para os motores é a proteção térmica, pois evita danos de isolamento através de superaquecimento (HEWITSON et al, 2004).

O fabricante de equipamentos ABB, detalha que as principais causas de falhas nos seus motores são:

- Sobreaquecimento prolongado (26%);
- Falha do rotor ou rolamento (20%);
- Falha de isolamento (30%);
- Proteção defeituosa (5%);
- Outras causas (19%)

Os relés de proteção microprocessados possuem capacidade de operação para qualquer condição do sistema elétrico ou da carga, possuem desenvoltura para serem configurados com os dados dos motores e oferecer os dados de condição de operação do motor. As funções de proteção ANSI estão descritas no Anexo A, e a complementação das funções no Anexo B. Os relés de proteção microprocessados possuem as funções de proteção aplicáveis a motores de indução trifásicos industriais, de acordo com a tabela 4.5:

Tabela 4.5 - Funções de proteção aplicáveis a motores trifásicos industriais

Função	Descrição da função de proteção aplicável a motores de indução trifásicos industriais
21	Distância
23	Dispositivo de controle de temperatura
26	Dispositivo térmico do equipamento
27	Proteção contra subtensão
30	Dispositivo anunciador
37	Proteção contra perda de carga
38	Proteção de mancal
40	Proteção contra perda de excitação
46	Desbalanço de corrente (corrente de sequência negativa)
47	Proteção de sequência de fase de tensão
48	Proteção contra partida longa
49	Proteção térmica para motor

50	Proteção instantânea de fase
50N	Proteção instantânea de neutro
51	Proteção temporizada de fase
51N	Proteção temporizada de neutro
59	Proteção contra sobretensão
59N	Proteção contra deslocamento de tensão de neutro
66	Monitoramento do número de partidas por hora
78	Monitoramento de ângulo de fase/perda de sincronismo
86	Bloqueio de segurança
87M	Proteção diferencial de máquina

Fonte: Adaptado - Mamede Filho (2011)

Alguns fatores são importantes a serem levados em considerações na proteção de motores (MARDEGAN, 2010):

- Corrente (I_P) e tempo (TP) de partida: é necessário analisar a corrente e o tempo de partida do motor. O valor da corrente de partida pode ser encontrada no *data sheet* do motor, ou nos dados nominais na placa. Quando esses dados não estão disponíveis, pode-se adotar a equação (4.1) para calcular a corrente de partida para os motores de média tensão:

$$I_P = 6 \times I_n \quad (4.1)$$

Onde:

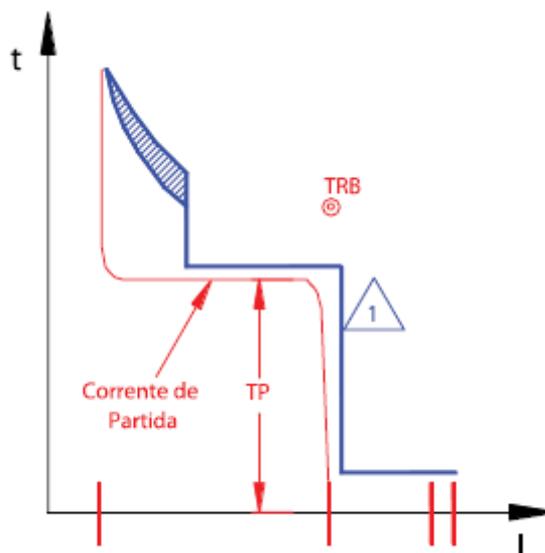
I_P = corrente de partida [A];

I_n = corrente nominal [A].

- Ponto do tempo de rotor bloqueado (TRB): é um dado obtido com o fabricante do motor, normalmente não consta na placa. O tempo de rotor bloqueado tem um valor de TRB a frio, quando o motor está parado, ou seja, em equilíbrio térmico com o ambiente, e um valor de TRB a quente, quando o motor está operando e está na temperatura ambiente de projeto. Os valores variam de acordo com cada máquina, mas são comuns entre 15 e 17 segundos.
- Curva típica de proteção: Na figura 4.12 é apresentado a curva tempo *versus* corrente - curva em azul - para proteção de motores de média tensão. Pode-se compreender que a curva do dispositivo de proteção passa abaixo do ponto de rotor bloqueado (a quente). Mas, na prática,

para assegurar a proteção do motor, a curva do dispositivo de proteção deve passar abaixo de toda curva de capacidade térmica do motor, protegendo completamente todo o equipamento. Estima-se que a curva do relé deve ultrapassar aproximadamente 10% após a curva de capacidade térmica nominal de proteção do motor.

Figura 4.12 - Curva típica tempo *versus* corrente para proteção de motores



Fonte: Proteção e Seletividade - O setor Elétrico (2010)

- Comportamento do motor de indução: durante a partida do motor, o mesmo pode ser interpretado como uma carga de impedância constante. Ou seja, quando a tensão cai, a potência e a corrente também caem. Em regime, a potência ativa do motor de indução pode ser interpretado como carga de potência constante. De acordo com que a tensão decresce para manter a potência ativa (potência no eixo) constante, o valor da corrente tende a aumentar. Quando a tensão decresce, o valor da potência reativa tende a decair também.

4.4.1 – Proteção de sobrecorrente

As funções de sobrecorrente possuem o objetivo de detectar níveis de corrente acima de limites pré-estabelecidos para o funcionamento apropriado dos equipamentos inseridos no sistema de potência e isolá-los antes que danos permanentes aconteçam. As correntes que são localizadas podem ser correntes de

fase, que são correntes que apresentam valores acima da corrente de carga, e são resultados de curtos-circuitos. Ou podem ser correntes de terra, são resultantes de curto-circuito entre as fases e a terra (MAEZONO, 2010).

As proteções contra sobrecorrentes são proteções básicas para qualquer tipo de motor elétrico. Os relés de sobrecorrente são geralmente utilizados nos projetos de alimentação dos motores, esses relés podem ser instantâneos (função ANSI 50) ou temporizados (função ANSI 51). O tipo de aterramento do sistema deve ser levado em consideração para análise da proteção contra curtos-circuitos fase e terra utilizando o relé de sobrecorrente de neutro (MAMEDE FILHO,2011).

O relé de atuação instantânea não apresenta um atraso intencional a operação do sistema de proteção quando o limite de corrente pré-estabelecido é alcançado, já os relés temporizados atuam de acordo com a curva tempo *versus* corrente, através dessas características os relés podem ser subclassificados da seguinte forma (MARDEGAN, 2010):

- Normal Inverso (NI);
- Muito Inverso (MI ou VI = *Very Inverse*);
- Extremamente Inverso (EI);
- Tempo Longo Inverso (TLI ou LTI = *Long Time Inverse*);
- Tempo Definido (TD ou DT = *Definite Time*).

Nos relés de tempo definido, a proteção atua quando a corrente de operação do sistema ultrapassa o valor máximo de curto-circuito estabelecido dentro de um tempo definido. Ao passo que nos relés de tempo inverso, a proteção atua em uma relação inversa entre corrente e tempo, ou seja, quanto maior a sobrecarga do sistema mais rapidamente a proteção deve atuar. Para esses relés, é possível definir um valor instantâneo de operação, define-se um valor de sobrecarga do sistema, e o relé atuará de forma instantânea e não mais temporizada.

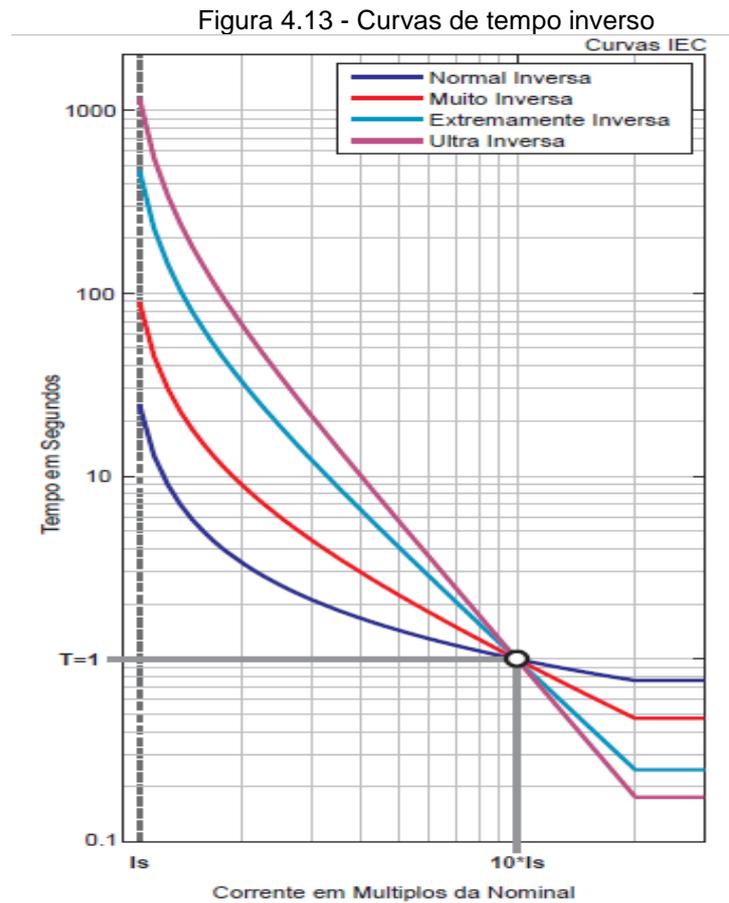
As características tempo *versus* corrente são normalmente representadas por equações, e essas equações variam de acordo com a norma IEEE C37.112-1996, apresentadas nas equações normal inversa (4.2), muito inversa (4.3) e extremamente inversa (4.4):

$$t = \frac{0,14}{I^{0,02} - 1} \cdot DT \quad (4.2)$$

$$t = \frac{13,5}{I - 1} \cdot DT \quad (4.3)$$

$$t = \frac{80}{I^2 - 1} \cdot DT \quad (4.4)$$

A figura 4.13 apresenta as características normal inversa, muito inversa, extremamente inversa e ultra inversa:



Fonte: Schneider Electric (2008)

4.4.1.1 – Proteção de sobrecorrente instantâneo (Função 50)

O ajuste da unidade instantânea de fase deve ser superior a corrente de rotor bloqueado, conforme demonstrado na equação (4.5):

$$I_{reif} > \frac{I_{pm}}{RTC} \quad (4.5)$$

Onde:

I_{reif} - Corrente vista pelo relé na sua unidade instantânea de fase;

I_{pm} - Corrente de partida do motor;

RTC - Relação de transformação do transformador de corrente da proteção.

A corrente de ajuste da unidade instantânea de fase deve ser inferior a corrente simétrica do curto-circuito trifásico, demonstrada na equação (4.6):

$$I_{reif} < \frac{I_{cs}}{RTC} \quad (4.6)$$

Onde:

I_{cs} - Corrente de curto-circuito simétrica, valor eficaz.

A corrente de ajuste da proteção de sobrecorrente deve estar acima do valor de corrente de partida do motor de indução. Com isto uma opção é o ajuste do valor de *pickup* da corrente desta função em 1,2 a 1,5 vezes a corrente do rotor bloqueado do motor, para evitar o desligamento devido a corrente de partida (BLACKBURN, 2006).

4.4.1.2 – Proteção de sobrecorrente instantâneo de neutro (Função 50N)

A corrente através do relé na unidade instantânea de neutro deve ser inferior à corrente de curto-circuito fase-terra, conforme equação (4.7):

$$I_{rein} < \frac{I_{fr}}{RTC} \quad (4.7)$$

Onde:

I_{fr} - Corrente de curto-circuito fase-terra;

I_{rein} - Corrente vista pelo relé na sua unidade instantânea de neutro.

4.4.1.3 – Proteção de sobrecorrente temporizada (Função 51)

Os motores de indução normalmente possuem uma corrente de partida muito alta, conhecidas como corrente de *inrush*, que apresentam valores da ordem de 5 a 7

vezes a corrente nominal, resultando em aquecimento dos motores. Com isto, esse valor da amplitude da corrente de partida pode ser análogo a uma falha. São adotados para proteção de motores os relés de sobrecorrente de tempo inverso longo, para promover a partida direta dos motores, sem riscos de uma interrupção indesejada (PHAITANKAR, 2003).

A função de sobrecorrente do relé deve ser analisada junto com a capacidade térmica do motor, pois com os altos valores de corrente de *inrush*, o limite térmico pode atingir valores altos rapidamente e não serem sentidos pelos RTDs em tempo de resposta adequados. As funções de sobrecorrente temporizadas são normalmente utilizadas de forma complementar à função de proteção térmica. Garantindo que o relé de proteção não atue durante a partida do motor, e opere quando a carga exceder a capacidade térmica do motor (PHAITANKAR, 2003).

O ajuste da unidade temporizada de fase pode ser determinado pela equação (4.8):

$$I_{tf} = \frac{K_f \times I_{nm}}{RTC} \quad (4.8)$$

Onde:

K_f - Fator de corrente e fase, normalmente adotado entre os valores 1,1 a 1,25;

I_{nm} - Corrente nominal do motor [A];

RTC - Relação de transformação do transformador de corrente da proteção.

A corrente de ajuste da unidade temporizada de fase deve ser selecionada para atuar com a corrente de rotor bloqueado. A corrente de rotor bloqueado de um motor de indução normalmente é de 3 a 8 vezes a corrente nominal. O valor da corrente da unidade temporizada de fase, deve ser sensível à condição de rotor bloqueado do motor, conforme a equação (4.10):

$$I_{retf} \leq \frac{I_{pm}}{RTC} \quad (4.10)$$

Onde:

I_{retf} - Corrente vista pela unidade temporizada de fase [A];

I_{pm} - Corrente de partida do motor [A];

O tempo de ajuste do relé da unidade temporizada de fase deve ser superior ao tempo de partida do motor, de acordo com a condição (4.11):

$$T_{tf} > T_{pm} \quad (4.11)$$

Onde:

T_{pm} - Tempo de partida do motor [s];

T_{tf} - Tempo de atuação do relé de fase [s].

O tempo de ajuste da unidade temporizada de fase deve ser inferior ao tempo de rotor bloqueado, de acordo com a condição (4.12):

$$T_{tf} < T_{rb} \quad (4.12)$$

Onde:

T_{rb} - Tempo de rotor bloqueado [s].

Geralmente, os relés de sobrecorrente de fase são inseridos em duas fases e estas detectam qualquer falta entre fases (RUSH, 2011).

4.4.1.4 – Proteção de sobrecorrente temporizada de neutro (Função 51N)

A detecção de faltas à terra de alta impedâncias dentro do motor, necessita de elementos de sobrecorrentes muito sensíveis, já que a corrente de falta pode alcançar um valor menor que a corrente de carga total. Os valores utilizados para ajuste de relés fase-terra estão na ordem de 30% a 40% da corrente de plena carga ou da corrente fase-terra mínima no trecho do sistema a ser protegido (RUSH, 2011). Em contra partida esses valores não devem ser ajustados para valores muito altos para não ocorrer sensibilizações por algum desequilíbrio normal do sistema.

A corrente vista pelo relé na unidade instantânea de neutro deve ser selecionada para atuar com a corrente fase-terra, valor mínimo, conforme demonstrado na equação (4.13):

$$I_{tn} = \frac{K_n \times I_{nm}}{RTC} \quad (4.13)$$

Onde:

K_n - Fator de corrente de neutro, normalmente adota-se valores de 0,10 a 0,25;

I_{nm} - Corrente nominal do motor [A].

Os elementos de sobrecorrente de neutro não devem ser mais sensíveis do que o desequilíbrio normal do sistema, pois podem ocorrer falsos *trips* devido a esse desequilíbrio (HOROWITZ, 2014).

4.4.1.5 – Proteção de sobrecorrente *ground sensor* (Função 50GS)

Para sistemas de proteção contra curto-circuito à terra incluem a ligação de um TC de sequência zero conectado a um dispositivo de proteção com a função 50GS. A função 50GS tempo definido, permite que os desequilíbrios das correntes geralmente encontrados na saída dos TCs não alcancem o equipamento. O relé com a função 50GS permite um ajuste para níveis baixos, da ordem de 10 A, essa proteção oferece grande sensibilidade e boa precisão (BLACKBURN, 2006).

Em motores de grande porte, onde não é possível utilizar TCs junto com a função GS, pelo fato da seção dos cabos de alimentação não suportarem ser interligados na saída dos TCs, é utilizada a função 50N, ajustada com *pickup* acima do valor da segunda corrente de desequilíbrio prevista (BLACKBURN, 2006).

4.4.2 – Proteção térmica (Função 49)

Os motores elétricos são equipamentos sensíveis ao aumento de temperatura, normalmente os enrolamentos e isolamentos não são submetidos a temperaturas excessivas, que geralmente é resultado de sobrecarga ou de perda de fase. Uma boa proteção do motor deve monitorar continuamente a corrente que circula no motor para identificar a sobrecarga ou condições de falha e desligar o motor quando essas situações forem identificadas. Esta proteção utilizada corretamente, prolonga a vida útil do equipamento e evita danos aos isolamentos por sobreaquecimento (HEWITSON et al., 2004).

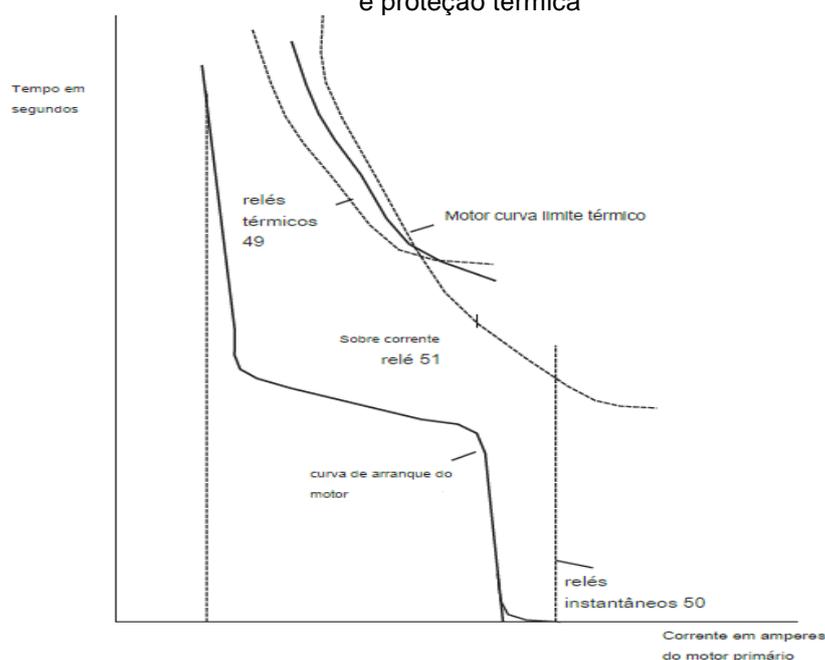
Partidas muito demoradas ou frequentes solicitam uma alta corrente de partida, em condições normais de operação, durante esse período não ocorre aquecimentos

indesejáveis. Mas, se as partidas forem frequentes ou lentas, devido ao processo ou da carga mecânica, o motor poderá sofrer aquecimentos. O mesmo ocorre com o rotor bloqueado, definido como sendo uma parada súbita do motor, em plena rotação. O motor absorve a corrente de partida e permanece bloqueado sem velocidade. Logo, não ocorre mais ventilação e o aquecimento se dá de forma muito rápida (MARDEGAN, 2010).

A proteção térmica de um motor tem o objetivo de evitar danos quando cargas mecânicas são exercidas acima das cargas nominais, quando o mesmo está em operação. Isto envolve um ajuste de corrente instantâneo fixado a um valor abaixo da corrente de partida. O tempo de disparo da proteção deve ser maior que o tempo de partida do motor, assegurando a sua partida e menor que o tempo de rotor bloqueado do motor. Assim a proteção irá proteger o motor contra elevações de temperatura acima dos limites permitidos pelo equipamento. O tempo de rotor bloqueado é fornecido pelo fabricante do motor (MARDEGAN, 2010).

O IEEE de acordo com a norma C37.112-1996 padroniza a curva característica térmica dos motores considerando as condições de rotor bloqueado, partida e regime. Essas curvas térmicas do motor são representações adequadas de danos térmicos para operação dos equipamentos. Os relés devem operar antes dos limites serem atingidos ou excedidos. Na figura 4.14 é possível observar as características da curva térmica de um motor:

Figura 4.14 - Curvas de características típicas do motor: sobrecarga, rotor bloqueado e proteção térmica



Fonte: BLACKBURN (2004)

A proteção de imagem térmica tem um melhor desempenho e segurança que os relés de sobrecorrente. A curva característica tempo x corrente de aquecimento do motor, precisa ser analisada para que o ajuste da curva do relé de característica inversa, esteja abaixo da curva de aquecimento do motor (MAMEDE FILHO, 2011).

A temperatura interna dos enrolamentos do motor, é medido através do relé térmico por um algoritmo de somatórios das perdas de efeito Joule e a dissipação térmica da máquina, resultando em um valor proporcional à temperatura (MAMEDE FILHO, 2011).

Os relés térmicos podem ser encontrados das seguintes formas:

- Detectores de temperatura: também conhecidos como sondas térmicas, são elementos de grande eficiência contra falhas nos enrolamentos dos motores. São normalmente instalados no interior das bobinas dos motores, comandam a atuação do disjuntor, devido a sensibilidade à elevação de temperatura do ponto de operação. Os detectores de temperatura podem ser instalados também nos mancais dos motores para acompanhamento da temperatura. As proteções por detectores térmicos realizam primeiro um alarme sonoro ou visual em uma determinada temperatura e depois o acionamento do disjuntor para desligamento (MAMEDE FILHO, 2011).
- Detectores térmicos bimetálicos: são detectores térmicos dependentes das temperaturas, constituídos com lâminas bimetálicas. Com o aumento da temperatura, acima dos valores pré-definidos na classe de isolamento do motor, as lâminas abrem um contato que desenergiza a bobina de comando do disjuntor. A atuação do detector térmico bimetálico atua um relé que anuncia uma sinalização sonoro ou luminosa (MAMEDE FILHO, 2011).
- Detectores térmicos à resistência da temperatura: conhecidos como RTD (*Resistance Temperature Dependent*), sua resistência elétrica possui dependência com a temperatura do ponto de instalação. O RTD é um excelente indicador de temperatura média dos enrolamentos, porém pode ser influenciado pela temperatura ambiente, ventilação e histórico de carga. São utilizados também na supervisão da elevação de temperatura dos mancais. (PHAITANKAR, 2003).

4.4.3 – Proteção de desbalanço de corrente ou corrente de sequência negativa (Função 46)

A ocorrência de tensão de alimentação desbalanceadas resulta na circulação de correntes desequilibradas que aumentam o aquecimento do estator e do rotor. A tensão de alimentação desbalanceada pode ocorrer por diversos fatores como presença de cargas vizinhas desequilibradas, fase única do motor, quando ocorre a queima de uma fase de um dos enrolamentos do motor, fonte de alimentação desequilibrada e entre outros fatores (ANDERSON, 1999).

Alguns fatores auxiliam na detecção de desequilíbrio, como a presença de corrente de sequência negativa, presença de tensão de sequência negativa e diferente de magnitude entre as correntes trifásicas (BLACKBURN, 2006).

A função de desbalanço de corrente relaciona as ampliações e operações da corrente de fase quando uma corrente de fase é consideravelmente divergente em uma das duas outras correntes. Esta é uma proteção muito eficiente para detectar fases abertas ou desequilíbrios nos circuitos de motores individuais (BLACKBURN, 2006).

Mesmo que aparente que o grau de desequilíbrio de tensão dentro do motor não o afete de imediato, deve-se levar em consideração que o mais importante é a componente de sequência negativa da corrente desequilibrada, resultante da tensão de desequilíbrio. Quando o motor está com fase única, faz com que o mesmo desenvolva torque insuficiente, levando à parada, e a uma corrente excessiva, resultando na queima do equipamento. Existe um limite térmico na quantidade da corrente de sequência negativa que pode circular pelo motor (HEWITSON et al., 2004).

A sensibilidade mínima desse relé é cerca de 1 A em uma fase com corrente zero, ou 1,5 pu em uma fase e 1 pu na outra. O ajuste da proteção assume que o valor máximo permitido para ajuste da proteção de sequência negativa está entre 5 a 30% do valor da carga total. O valor máximo de desequilíbrio ocorre quando o motor perde uma fase (BLACKBURN, 2006; PHAITANKAR, 2003).

4.4.4 – Proteção contra partida longa (Função 48)

A partida do motor gera sobrecorrentes elevadas que unicamente são suportadas por serem eventos de curta duração. A ocorrência de partidas muito

frequentes ou muito longas devido ao processo e da carga, pode ocasionar aquecimentos ao equipamento. Em um episódio de parada do motor durante o seu funcionamento, ou falha durante a partida, devido a uma carga excessiva, ocorrerá no motor uma corrente igual a sua corrente de rotor bloqueado, o que deve ser evitado, a corrente de partida do motor deve ser abaixo do tempo de rotor bloqueado (ALSTON, 2011).

O travamento do rotor pode acontecer durante a partida do motor, pela condição de rotor bloqueado, devido a parada brusca da rotação resultado de uma causa ligada a problemas mecânicos. O motor nesse caso, absorve a corrente de partida e permanece bloqueado em velocidade zero, resultando em aquecimentos rapidamente (Lopéz, 2012).

Algumas razões que podem levar o motor falhar durante seu funcionamento ou partida são:

- Perda de uma fase de alimentação;
- Problemas mecânicos;
- Baixa tensão de alimentação;
- Binário de carga excessiva.

Durante episódios de partida longa, a proteção deve ser ajustada para atuar sempre que a relação entre a corrente de partida e a corrente nominal atingir um valor superior a duas vezes. O tempo ajustado no relé deve ser inferior a 0,20 segundos ao tempo de rotor bloqueado e superior ao tempo de partida do motor (MAMEDE FILHO, 2011).

4.4.4.1 – Proteção contra rotor bloqueado após a partida (Função 51LR)

A operação de um motor pode ser dividida em três etapas, primeiro é a partida do motor, caracterizado por elevadas correntes e quedas de tensão. Segundo é a operação normal do motor, com ressalva de circunstâncias que podem levar a operações críticas, como um aumento brusco de carga. E terceiro a desaceleração e parada do motor, que não causam distúrbios, mas em situações críticas podem afetar a máquina acionada (MAMEDE FILHO, 2011).

A proteção de rotor bloqueado é essencial para evitar superaquecimento excessivo, caso aconteça a parada do motor durante seu funcionamento ou caso não seja possível acionar grandes cargas mecânicas. Geralmente, um motor de indução

típico pode transportar a corrente de rotor bloqueado com segurança por cerca de 15 segundos (ANDERSON, 1999).

É possível reconhecer uma ocorrência de parada do motor, quando o motor exceder o limite de corrente após uma partida bem sucedida, durante essa partida a corrente do motor cai abaixo do limite de corrente do tempo de partida seguro do equipamento. E logo após um aumento na corrente do motor acima do limite de tempo seguro, é indicativo de condição de bloqueio. O relé dispara o *trip*, caso essa condição permaneça além do ajuste do tempo de bloqueio. O relé de sobrecorrente instantâneo deve ser ajustado para um tempo igual ou superior o valor de rotor bloqueado (ALSTON, 2011).

4.4.5 – Proteção de sequência de fase de tensão (Função 47)

As correntes de sequência negativa são geradas a partir de condições de tensão desequilibrada, como carga desequilibrada, perda de uma única fase, defeitos monofásicos. O valor real da corrente de sequência negativa depende do grau de desequilíbrio na tensão de alimentação e a razão entre o negativo para a sequência de impedância positiva da máquina (ALSTON, 2011).

A ocorrência de uma tensão de sequência negativa de 5%, devido a cargas desequilibradas no sistema, por exemplo, pode produzir um valor de corrente de sequência negativa na máquina de 30%, o que resultaria a um aquecimento excessivo. O nível de desequilíbrio de sequência negativa depende do tipo de falha. A perda de uma fase única durante a partida, acarreta em uma corrente de sequência negativa de até 50 vezes a corrente nominal de partida (ALSTON, 2011).

A proteção de corrente de sequência negativa deve ser ajustado com um valor de tempo adequado para eliminar a fonte da corrente de sequência negativa, sem gerar riscos de sobreaquecimento ao motor. Um elemento de atraso de tempo definido pode ser utilizado para acionar um alarme, em conjunto com um elemento inverso para acionar o motor, nas ocorrências de níveis elevados de corrente de sequência negativa, como na condição de perda de fase durante a partida do motor (BLACKBURN, 2006).

4.4.6 – Proteção contra subtensão (Função 27)

A ocorrência de baixa tensão nos terminais do motor, alteram os seguintes fatores operacionais do motor (MAMEDE FILHO, 2011):

- A corrente de plena carga aumenta aproximadamente na proporção inversa da tensão aplicada;
- A corrente de partida diminui na proporção direta da tensão aplicada;
- A corrente rotórica aumenta na proporção direta da tensão aplicada no estator;
- O fator de potência aumenta;
- O conjugado de partida diminui com o quadrado da tensão aplicada;
- A velocidade do rotor diminui, ocasionando no aumento de temperatura nos enrolamentos do motor;
- As perdas estatóricas e rotóricas, aumentam elevando a temperatura dos enrolamentos.

O desarme por subtensão deve ser ajustado para 80-90% da tensão nominal do motor, a menos que seja indicado de outra forma nas folhas de dados do motor conforme orientação do fabricante (GE MULTILIN,2013).

Motores que estejam conectados a uma mesma fonte ou barramento podem sofrer subtensões temporárias, quando um dos motores acoplado a este barramento é ligado. Para suprir esta queda temporária de tensão é necessário ajustar o *setpoint* (valor de referência) do ajuste de proteção com um atraso de tempo (ALSTOM,2011).

4.4.7 – Proteção contra sobretensão (Função 59)

A ocorrência de tensão nos terminais do motor superiores à tensão nominal, alteram os seguintes fatores operacionais do motor (MAMEDE FILHO, 2011):

- A corrente de plena carga diminui aproximadamente na proporção inversa da tensão aplicada;
- A corrente de partida aumenta na proporção direta da tensão aplicada;
- A corrente de plena carga diminui na proporção inversa da tensão aplicada;
- A corrente rotórica diminui na proporção direta da tensão aplicada no estator;

- O fator de potência diminui;
- O conjugado de partida varia com o quadrado da tensão aplicada;
- A velocidade do rotor aumenta com a elevação da tensão, aumentando a temperatura dos enrolamentos do motor;
- As perdas estatóricas e rotóricas, diminuem com a elevação da tensão, reduzindo a temperatura os enrolamentos do motor.

Geralmente, os motores podem operar com valores de tensão de até 110% o valor da tensão nominal. Relés de tempo inverso, evitam e eliminam tensões superiores ao valor suportados pelos motores (MAMEDE FILHO, 2011).

4.4.8 – Proteção contra subfrequência / sobrefrequência (Função 81)

Quando os motores induzidos são reenergizados antes de parar para girar, podem ocorrer altos torques transitórios, resultando em danos. Isso pode ocorrer quando uma transferência rápida de motores é realizada de um barramento que perdeu a tensão para outro barramento auxiliar ativo. Essas transferências são ações necessárias para manter os serviços auxiliares em processos industriais críticos (BLACKBURN, 2006).

Falhas que ocorrem por consequências de raios, ventos ou contatos de árvores, são falhas consideradas transitórias, mas que podem afetar a transmissão de energia, com isto as concessionárias após esses eventos restauram o sistema com religamentos em altas velocidades, cerca de 0,20 a 0,60 segundos, e assim, reenergiza os motores, com possíveis danos. Para motores de indução, a reenergização não deve ocorrer até que a tensão do motor caia para 33% ou um valor abaixo do normal (BLACKBURN, 2006).

A proteção de subfrequência ou sobrefrequência pode ser ajustada para proteger o equipamento durante esses eventos, a configuração ideal seria 97 a 98% das condições nominais, com tempo para anular os efeitos momentâneos de queda de tensão, mas antes que ocorra a reenergização.

Em casos de falha de alimentação, e o motor estiver em operação, o relé de subfrequência irá operar para que o motor desacelere rapidamente. O valor de ajuste da frequência precisa considerar as características do sistema de energia, a frequência de funcionamento de segurança mínima do motor sob condições de carga, deve ser estipulada junto com a frequência mínima do sistema (ALSTON, 2011).

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Considerações iniciais

O objetivo deste estudo é apresentar os benefícios na operação de motores elétricos de média tensão, protegidos por um relé multifunção microprocessado e apresentar benefícios de modernização do sistema de proteção e seus respectivos equipamentos e também uma comparação entre as proteções aplicadas através de relés eletromecânicos, estáticos e os relés microprocessados.

As principais características de funcionamento de um motor elétrico de indução trifásico e seus respectivos equipamentos, e dispositivos de proteção apresentado neste trabalho, são uma síntese de uma análise da proteção de um motor trifásico de média tensão. O estudo de caso realizado contempla as principais funções de proteção aplicadas aos motores elétricos, e assim demonstrando como a utilização de relés microprocessados em comparação aos relés eletromecânicos e aos relés estáticos, beneficiou o sistema produtivo, devido ao acompanhamento contínuo dos equipamentos, através dos relatórios e/ou alarmes gerados.

O estudo de caso foi realizado na empresa White Martins Gases Industriais Ltda, localizada no município de Juiz de Fora, estado de Minas Gerais. Nos processos produtivos de indústrias químicas possuem máquinas, motores e compressores de potências elevadas para produção de líquidos criogênicos como: oxigênio, nitrogênio, argônio, entre outros. Essas substâncias, que em condições normais de temperatura e pressão, encontram-se em estado gasoso e que para serem liquefeitas precisam ser submetidas a temperaturas inferiores a -150°C , como por exemplo, o oxigênio que possui temperatura de ebulição de $-182,85^{\circ}\text{C}$.

5.1.1 Apresentação do motor de indução trifásico

Para este estudo de caso foi analisado um motor de indução do fabricante WEG, modelo HGF com as seguintes características nominais especificadas na tabela 5.1:

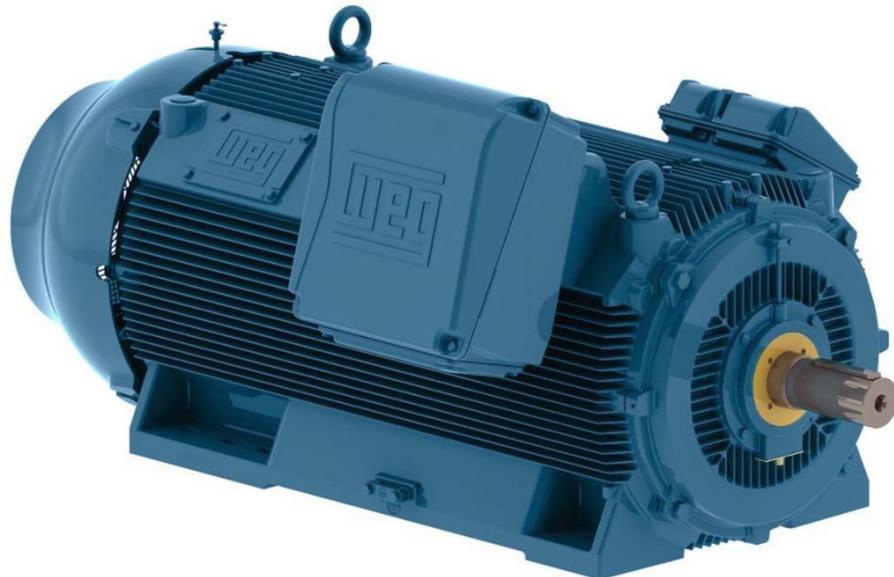
Tabela 5.1 - Especificações nominais do motor de indução trifásico

Especificações Nominais do Motor HGF	
Potência Nominal	600 [HP] ou 440 [kW]
Carcaça	355C/D/E
Número de Pólos	4
Velocidade Nominal	1788 [rpm]
Tensão Nominal	6.600 [V]
Corrente Nominal	46 [A]
Fator de Serviço	1.15
Fator de Potência	0,86
Frequência	60 [Hz]
Corrente de Partida	6,8
Rendimento	95,5 [%]
Classe de Isolamento	F

Fonte: Autor (2018)

Na figura 5.1 é ilustrado o motor de indução trifásico utilizado no processo produtivo:

Figura 5.1 - Motor de indução trifásico de 600HP



Fonte: WEG (2018)

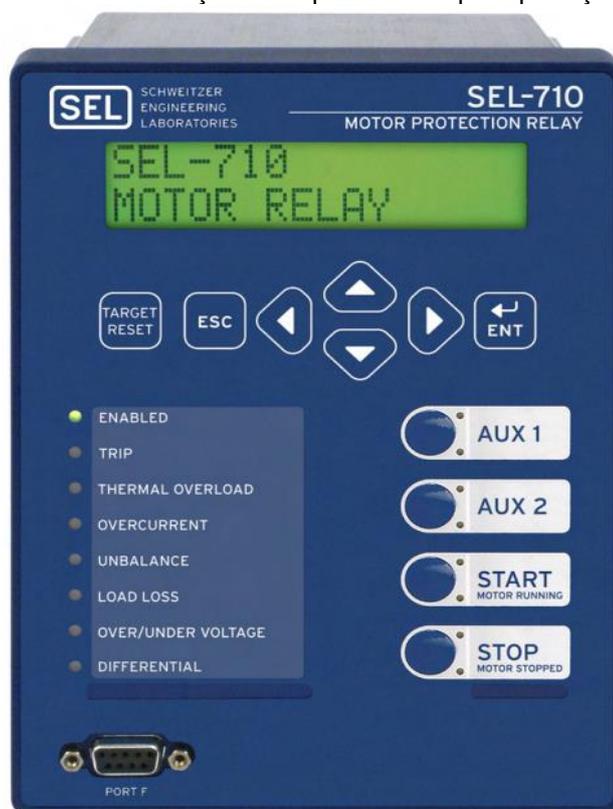
A carga acoplada ao eixo do motor, é um compressor de ar modelo ZR-450 tipo parafuso fabricado pela Atlas Copco.

5.1.2 Relé de proteção SEL-710

Os relés microprocessados introduziram ao sistema de proteção maior sensibilidade em resposta às anormalidades nas condições de operação. As melhorias na seletividade permitiram isolar completamente o equipamento defeituoso e desligar a menor proporção possível do sistema.

O relé utilizado para o estudo de caso é demonstrado na figura 5.2, um relé multifunção microprocessado modelo SEL-710 fabricado pela *Schweitzer Engineering Laboratories*:

Figura 5.2 - Relé multifunção microprocessado para proteção de motor



Fonte: SEL (2018)

As principais funções parametrizadas no relé SEL-710 para proteção do motor WEG, instalado na planta da White Martins, estão especificadas na tabela 5.2.

Os valores ajustados no relé proteção e as funções habilitadas estão descritas no Anexo C.

Tabela 5.2 - Funções de proteção aplicadas ao motor WEG-600 HP

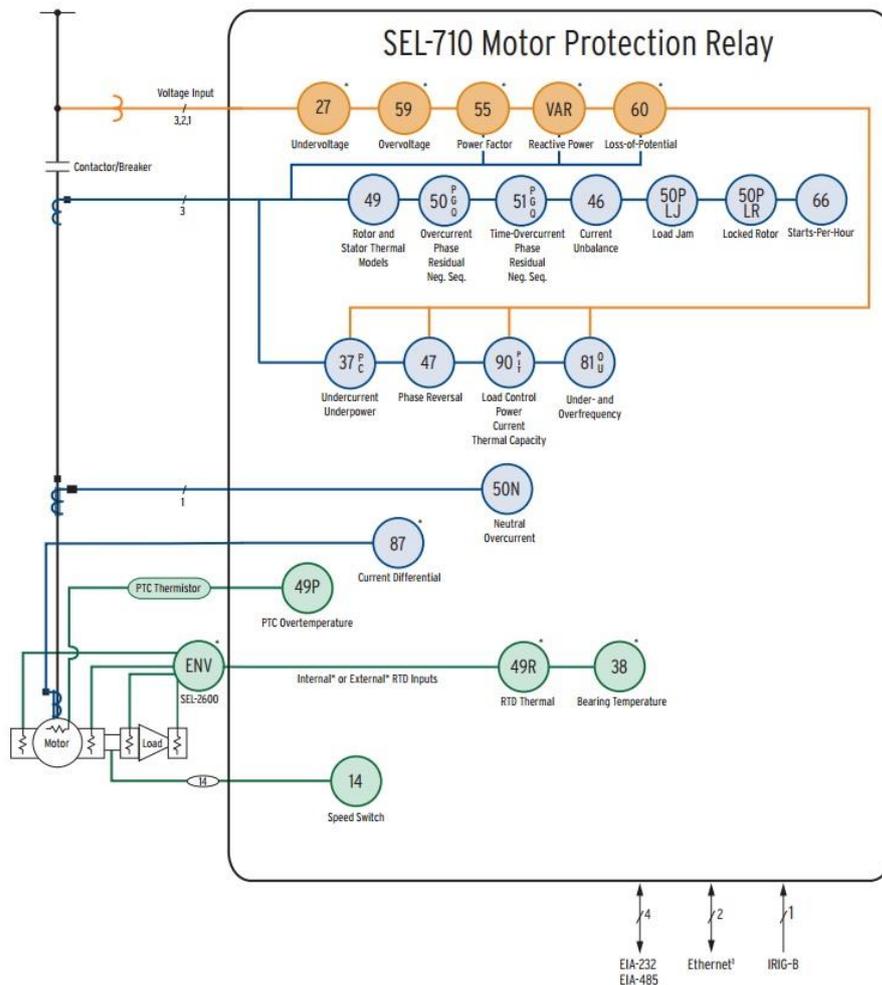
Função	Descrição das funções de proteção aplicáveis ao motor de indução referente ao estudo
27	Relé de subtensão
46	Relé de reversão ou desbalanceamento de corrente

47	Relé de reversão ou desbalanceamento de tensão
48	Relé de sequência incompleta / partida longa
49	Relé de proteção térmica
50	Relé de sobrecorrente instantânea
50N	Relé de sobrecorrente instantânea de neutro
51	Relé de sobrecorrente temporizada
51N	Relé de sobrecorrente temporizada de neutro
59	Relé de sobretensão
59N	Relé de sobretensão residual ou sobretensão de neutro
66	Relé de supervisão do número de partidas
81	Relé de subfrequência / sobrefrequência

Fonte: Arquivo Pessoal

O diagrama e as conexões entre o relé e os TCs e TPs, conectados à rede de alimentação, bem como as funções ANSI presentes no equipamento, é ilustrado na figura 5.3:

Figura 5.3 - Diagrama funcional do relé SEL-710



Fonte: SEL Instruction Manual SEL-710 Motor Protection Relay (2017)

5.2 Comparação entre relés eletromecânicos e microprocessados

Os relés eletromecânicos têm sido gradativamente substituídos por relés microprocessados. As melhorias nas funcionalidades destes relés trouxeram mudanças não somente em novas tecnologias, mas também na redução da capacidade de armazenamento de dados dos *hardwares*.

Nos projetos iniciais de relés com várias funções em um único equipamento de *hardware*, surgiram argumentos contrários, de fabricantes e agentes do sistema elétrico, referentes aos riscos na confiabilidade e disponibilidade do sistema elétrico. Uma falha em um relé numérico pode causar uma perda maior de funções, quando comparadas com aplicações em que diferentes funções são implementadas em equipamentos separados.

Com a experiência adquirida no uso de relés estáticos e digitais, a maior parte das falhas apresentadas nos circuitos eletrônicos e em *hardwares* hoje são conhecidas, e precauções são tomadas ainda na fase do projeto do relé. Problemas de *software* são minimizados pelo uso rigoroso de técnicas de projeto, com testes em protótipos e pela capacidade de atualização do *software* na memória.

Os relés microprocessados podem implementar diversas funcionalidades que antes necessitavam de vários relés discretos de *hardwares* e invólucros separados. As funções de proteção são definidas como elementos de relé. Um único relé, isto é, um único *hardware* em um invólucro, pode implementar diversas funções usando diversos elementos de relé. Cada elemento de relé composto por uma ou mais rotinas de *software*.

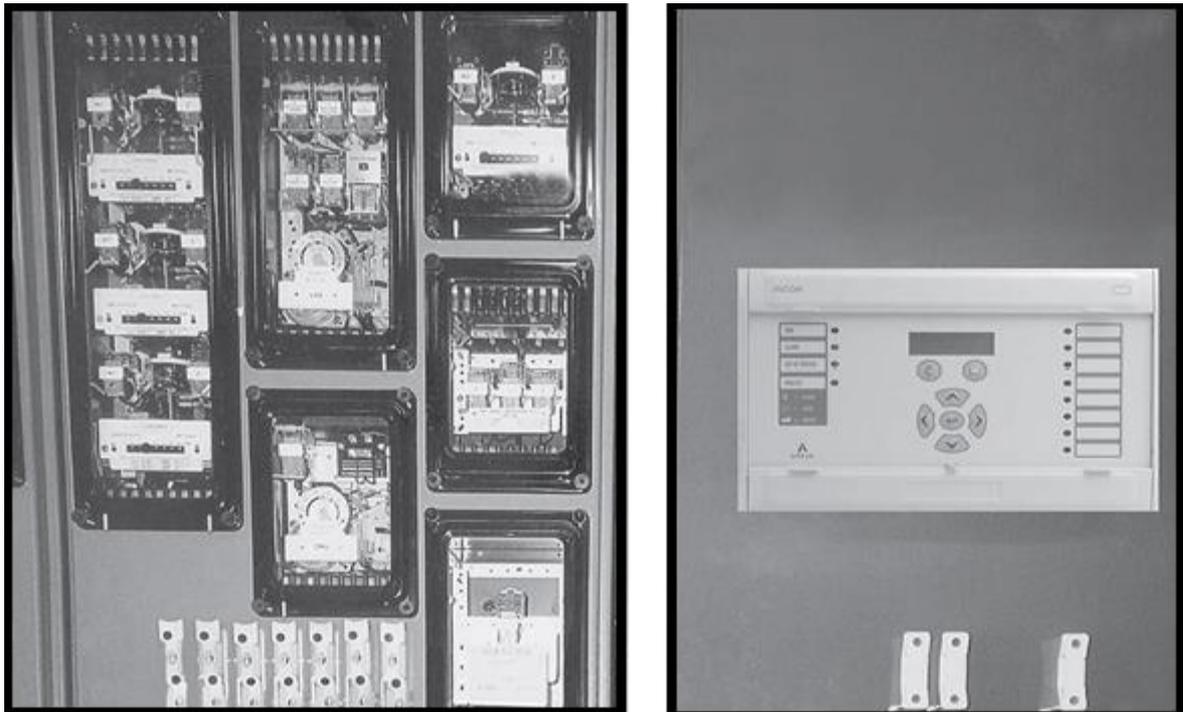
Pode se afirmar que houveram melhorias significativas nos índices de manutenção, com aumento da confiabilidade e disponibilidade, isso devido à aplicação de novas técnicas não oferecidas antes pelos relés eletromecânico e estático.

Por esse motivo, muitos sistemas de proteção e controle estão sendo modernizados passando por “retrofit”. Este termo é muito utilizado pela engenharia, consiste em projetos de modernização e readequação de instalações inserindo novas tecnologias.

Os relés eletromecânicos possuem arquitetura de *hardware* robusta com peças mecânicas e circuitos magnéticos que exigem maior espaço físico. Em algumas

aplicações nos sistemas de proteção, relés eletromecânicos com diferentes funções são associados com a finalidade de ampliar faixa de proteção do equipamento. Os relés microprocessados são compactos e oferecem aplicações de diversas funções de proteção, supervisão, medição e controle. Na figura 5.4 apresenta uma comparação entre dois painéis de relés, sendo o da esquerda contendo relés eletromecânicos e o da direita utilizando relé microprocessado.

Figura 5.4 - Necessidade de espaço para tecnologias diferentes e mesma funcionalidade



Fonte: RUSH (2011)

Na tabela 5.3 são apresentados um comparativo de forma resumida das principais características e diferenças entre os relés eletromecânicos e os microprocessados muito utilizados nos dias atuais.

Tabela 5.3 - Comparativo entre relés eletromecânicos x relés microprocessados

Comparação entre relés eletromecânicos x relés microprocessados		
	Relés Eletromecânicos	Relés Microprocessados
Instalação	Necessidade de maior espaço físico.	Necessitam de pouco espaço físico, são compactos.
Operação	Velocidade de operação lenta.	Sensíveis e rápidos na detecção de falhas.

Funções de Proteção	Uma ou duas funções de proteção.	Diversas funções e maior faixa de ajuste, em um único equipamento.
Comunicação Remota	Não integrado.	Comunicação remota através de protocolos de comunicação, RS-232, RS-485, Ethernet, MODBUS, PROFIBUS etc.
Emissão de Relatórios	Não possuía esta função.	Oscilografia e análise de eventos; Flexibilidade funcional e adaptativa.
Manutenção	Requer ensaios e aferições frequentes.	Auto-supervisão por meio de software dedicado.

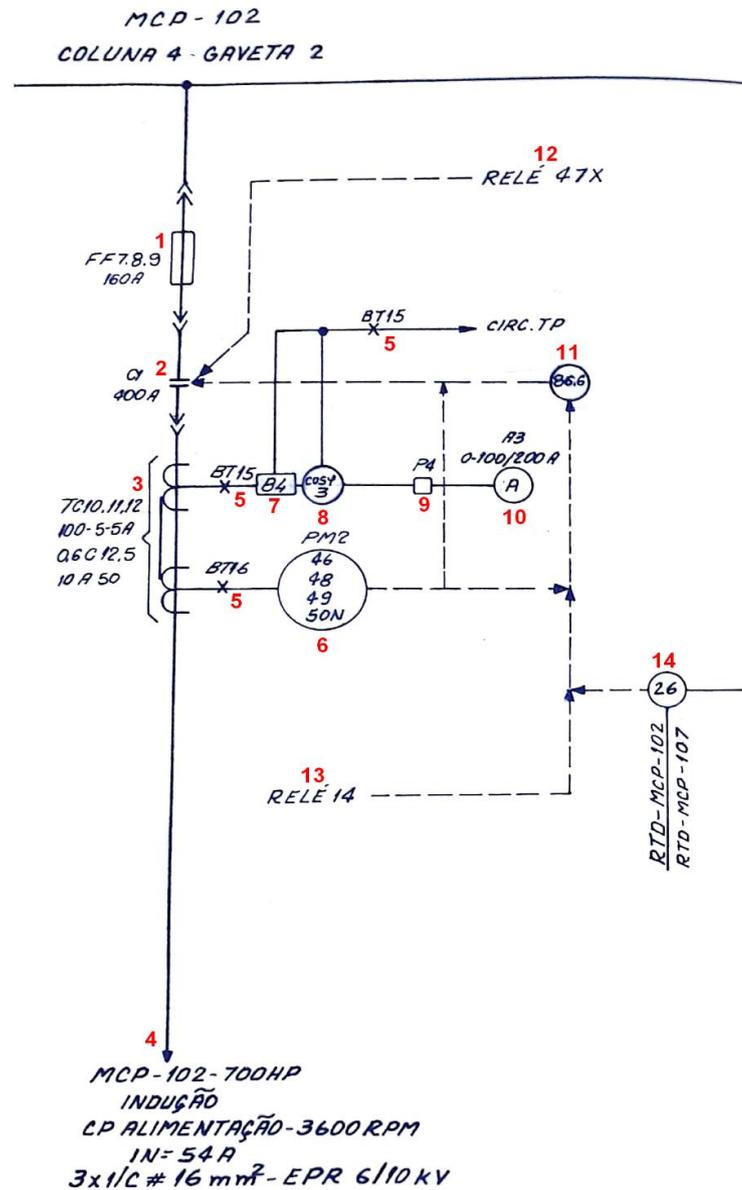
Fonte: Autor (2018)

5.2.1 Processo de modernização do sistema de proteção

No ano de 2010, um projeto de modernização foi executado na White Martins – Usina de Juiz de Fora com o objetivo de substituir relés eletromecânicos e estáticos por relés microprocessados multifunção. O escopo do projeto incluía a substituição de cubículos e barramentos de tensão 6,9 kV. Um novo método de acionamento dos motores de média tensão também foi aplicado substituindo contadores à vácuo combinados com fusíveis de média tensão limitadores de correntes denominados do tipo HH, por disjuntores à vácuo e relés multifunções acionando diretamente o motor.

A figura 5.5 apresenta um diagrama unifilar anterior ao projeto de modernização dos equipamentos.

Figura 5.5 - Diagrama unifilar antigo



Fonte: Arquivo pessoal

Legenda:

- 1 – Fusível HH limitador de corrente;
- 2 – Contator à vácuo de média tensão;
- 3 – Transformador de corrente tipo barra;
- 4 – Motor de indução trifásico de média tensão, gaiola 700HP;
- 5 – Bloco de teste (Chave de aferição);
- 6 – Relé de proteção estático;
- 7 – Transdutor de potência ativa;
- 8 – Fásímetro analógico;
- 9 – Chave comutadora para amperímetro;
- 10 – Amperímetro analógico;
- 11 – Relé auxiliar de bloqueio;
- 12 – Relé de subtensão e sequência de fase reversa trifásico;

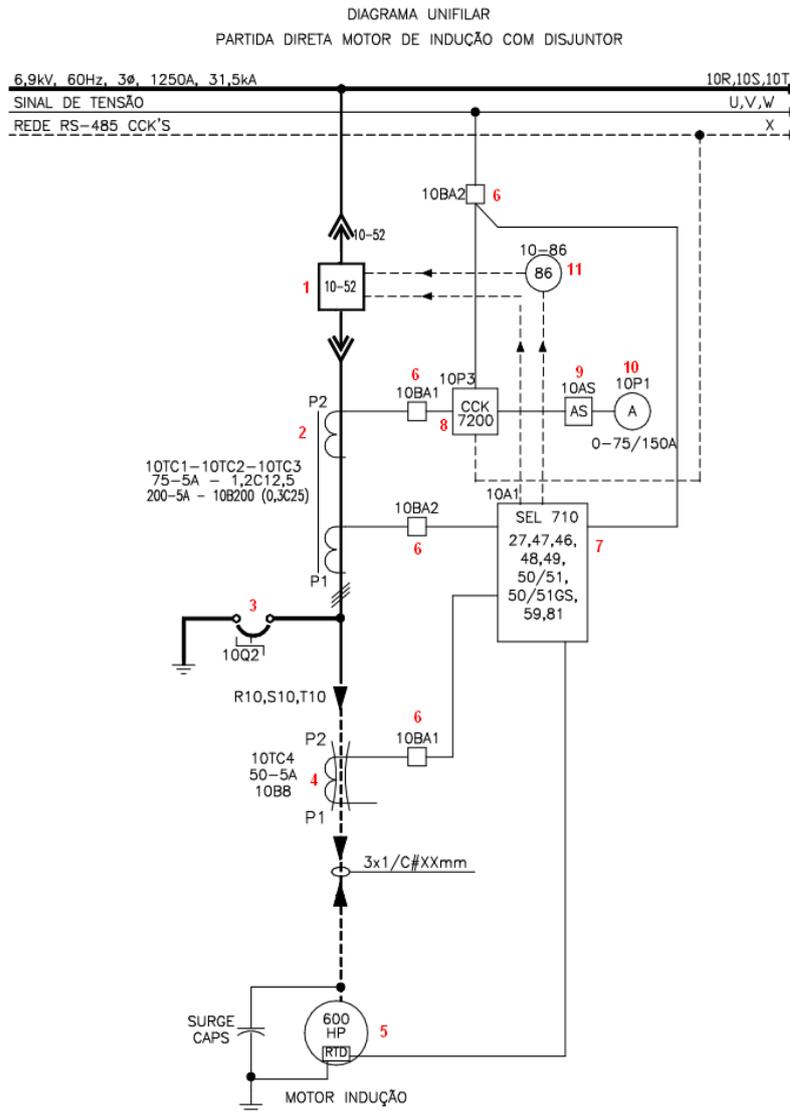
- 13 – Relé auxiliar controlador de demanda;
- 14 – Controlador de temperatura de enrolamento/mancal.

Os relés estáticos possuíam circuitos instáveis, devido à alta sensibilidade dos seus componentes eletrônicos e à ambientes hostis, ou seja, temperaturas elevadas e surtos transitórios ocorridos no SEP eram suficientes para afetar a estabilidade funcional dos relés, causando desligamentos indevidos e acarretando em perdas de produção.

Com a modernização dos equipamentos e novas tecnologias implementadas, tornou-se possível desenvolver painéis mais compactos e seguros. Dispositivos de proteção foram adicionados como alívio de pressão em caso de arco interno nos cubículos e chaves de aterramento para a proteção em intervenção elétrica no equipamento.

Os relés multifunção microprocessado possibilitou aplicação de diversas funções de supervisão, que ajudam a diagnosticar anomalias no motor proporcionando maior proteção e menor custo de manutenção. A figura 5.6 apresenta o diagrama unifilar após a modernização de cubículos, equipamentos, relés e barramentos 6,9 kV.

Figura 5.6 - Diagrama unifilar atual



Fonte: Arquivo pessoal

Legenda:

- 1 – Disjuntor à vácuo de média tensão (Extraível);
- 2 – Transformador de corrente tipo barra;
- 3 – Chave de aterramento;
- 4 – Transformador de corrente tipo janela (Toroidal);
- 5 – Motor de indução trifásico de média tensão, gaiola 600HP;
- 6 – Chave de aferição/calibração;
- 7 – Relé de proteção multifunção microprocessado;
- 8 – Medidor digital;
- 9 – Chave comutadora;
- 10 – Amperímetro analógico;
- 11 – Relé auxiliar de bloqueio.

O método utilizado na configuração anterior a substituição de relés, apresentava quantidades superiores de *hardwares* e equipamentos o que acarretava o aumento da probabilidade de ocorrência de falhas.

O principal objetivo do projeto de modernização dos equipamentos foi proporcionar maior segurança nas operações do sistema elétrico e manter monitoramento contínuo do motor implementando funções de supervisão e medição com auxílio de novas funções proporcionadas pelos relés microprocessados

5.2.2 Estatísticas de falhas e eventos

Os fabricantes de relés de proteção microprocessados disponibilizam *softwares* de programação e análises de falhas. O *software* de aplicação nos relés do presente estudo é o *AcSELeator QuickSet*, onde é possível realizar programações lógicas e extrair dados operacionais e relatórios de eventos registrados pelo relé. Para análises de eventos e falhas são disponibilizados os *softwares*, *Analytic Assistant* ou *SynchoWAVE Event*, que permite aos técnicos e engenheiro analisar de forma detalhada as ocorrências nos sistemas de proteção.

Na figura 5.7 apresenta alguns eventos operacionais registrados pelo relé no período de operação do motor, compreendidos entre as datas 28/12/15 à 14/11/18.

Figura 5.7 - Estatísticas de alarmes e *TRIPS* (Aberturas)

Trip/Alarm Data		
	ALARMS	TRIPS
Overload	3	3
Locked Rotor	0	0
Undercurrent	0	0
Jam	0	2
Current Imbal	6	13
Overcurrent	0	1
Ground Fault	0	1
Speed Switch	0	0
Undervoltage	56	31
Overvoltage	1	1
Underpower	0	0
Power Factor	0	0
Reactive Power	0	0
RTD	10	5
Phase Reversal		3
Underfrequency		2
Overfrequency		2
Start Timer		0
Remote Trip		0
Other Trips		0
Total	76	64

Fonte: Arquivo pessoal

Legenda:

Overload: Proteção de sobrecarga;

Locked Rotor: Proteção de rotor bloqueado;

Undercurrent: Proteção Subcorrente;

Jam: Proteção contra perda de carga;

Current Imbal: Proteção de desbalanceamento de corrente;

Overcurrent: Proteção de sobrecorrente;

Ground Fault: Proteção de falta à terra;

Speed Switch: Interruptor de velocidade;

Undervoltage: Proteção de subtensão;

Overvoltage: Proteção de sobretensão;

Underpower: Proteção de subpotência;

Powerfactor: Proteção de fator de potência;

Reactive Power: Proteção de potência reativa;

RTD: Proteção térmica, PT-100;

Phase Reversal: Proteção de reversão de fase;

Underfrequency: Proteção de subfrequência;

Overfrequency: Proteção de sobrefrequência;

Start Timer: Tempo entre partidas;

Remote Trip: Envio de sinal remoto para abertura do disjuntor;

Other Trips: Aberturas externas de instrumentos da máquina acoplada ao motor.

Conforme figura 5.7 é possível quantificar alarmes e aberturas, as atuações podem ser extraídas para geração de análise de falhas e causa raiz. Nota-se que a ocorrência com maior destaque nas estáticas é a função de subtensão ANSI 27, isso devido a surtos transitórios e perturbações provenientes de descargas atmosféricas no sistema elétrico de potência.

5.2.3 Análise de evento

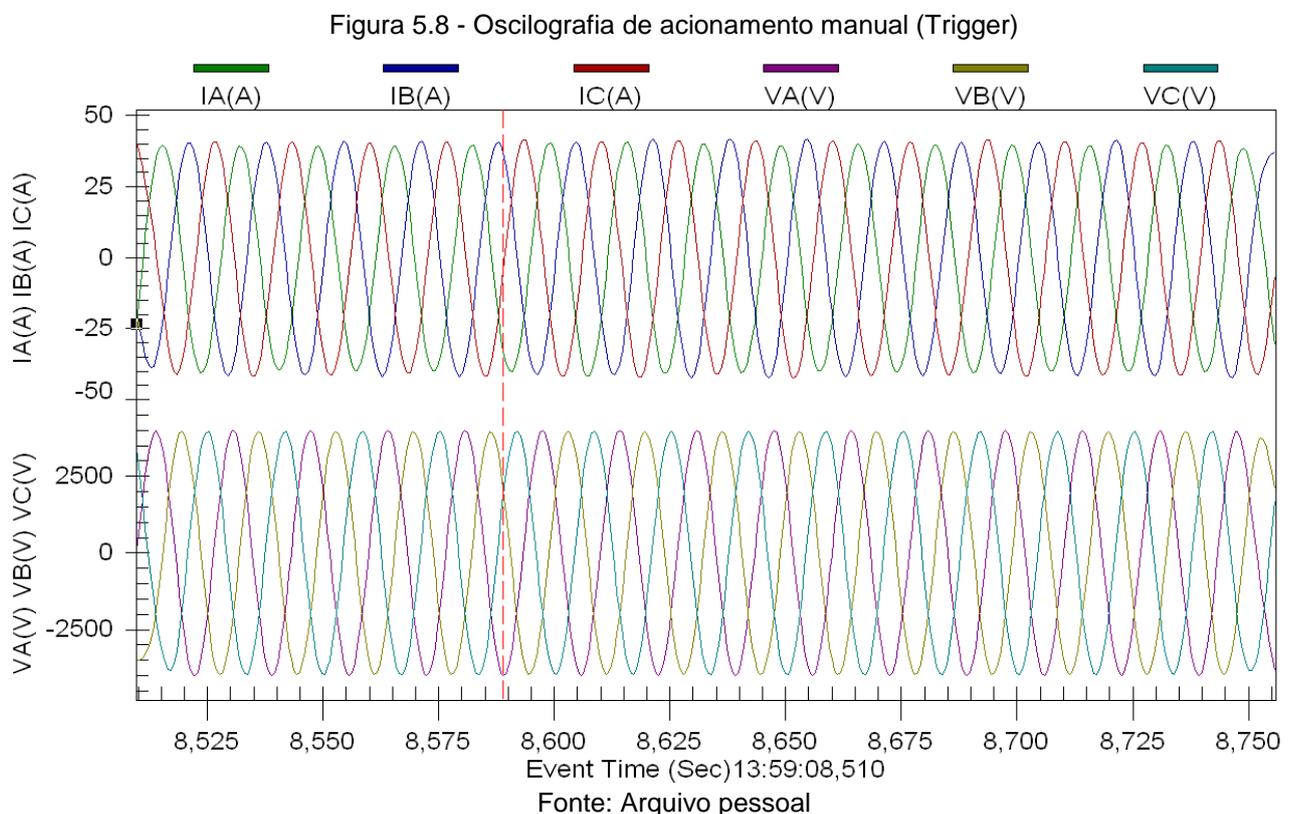
Os relés microprocessados registram vários eventos operacionais, tais como, as atuações ocorridas no sistema. Estes registros podem ser acessados pelo operador por dispositivos externos, através de uma porta de comunicação serial,

normalmente RS-232 ou RS-485 na parte frontal do equipamento, ou podem ser coletados remotamente.

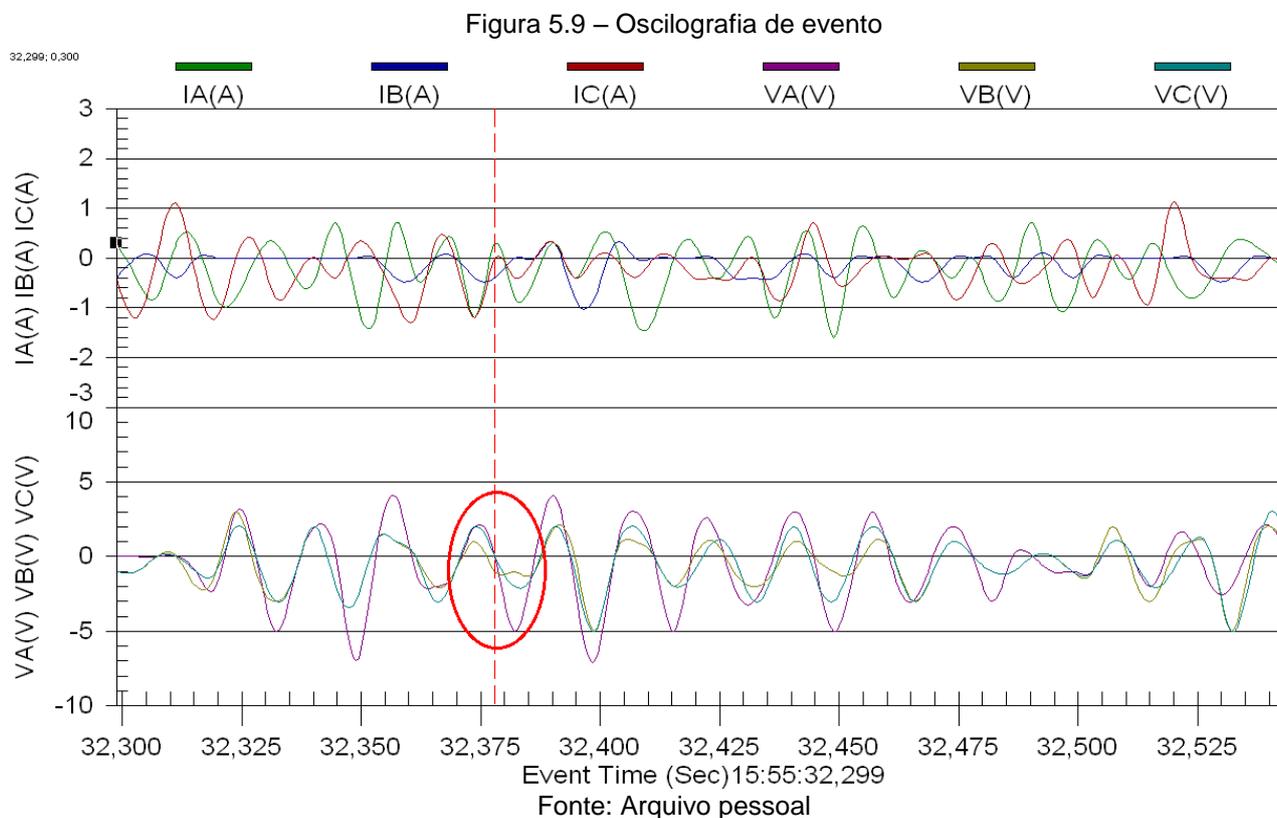
Os dados dos eventos podem ser utilizados para analisar as causas de perturbações no sistema elétrico e também avaliar a performance do relé. Os registros de eventos são fundamentais para a manutenção, visto que é possível identificar as funções de atuação durante as falhas e coletar informações para subsidiar melhorias nos esquemas de proteção.

As amostras de sinais, grandezas RMS de tensão e corrente que o relé mede durante a perturbação, são analisadas através de oscilografia ou análise fasorial ou componentes simétricas. É possível visualizar durante análise o momento quando o relé fecha o contato de disparo para o circuito de comando do disjuntor que protege o circuito de alimentação do motor.

O disparo de uma oscilografia, ou *trigger*, podem ser realizadas de diversas maneiras, tais como, disparo por limiar de tensão ou corrente, variação, desequilíbrio entre fases, sequencial, manual e medição contínua do sistema. A figura 5.8 apresenta um *trigger* manual com dezesseis amostras por ciclo em condições normais de operação do sistema.



Na figura 5.9 é possível verificar através da oscilografia com quatro amostras de sinais por ciclo, uma ocorrência de subtensão ocorrida no dia 30/03/2017 às 15:55:32 no motor do presente estudo.



Inicialmente deve-se analisar a oscilografia de modo a poder identificar o tipo de falta ocorrida no sistema. Esta falta pode ser de origem fase terra, bifásica terra, bifásica ou trifásica. Observando as senóides verifica-se em que fase ocorreu uma mudança significativa do comportamento do sinal.

Na oscilografia apresentada na figura 5.8, onde há registros de sinais de tensão e correntes trifásicas, identifica-se que o tipo de falta é do tipo bifásica, pois no instante 32,375 segundos houve uma distorção da forma de onda provocando subtensão nas fases VB (V) e VC (V) e um aumento na amplitude da corrente na fase IC (A).

Durante este evento um relé eletromecânico não iria se sensibilizar com esta função de subtensão, e o mesmo não geraria nenhum sinal de que esse evento estava ocorrendo, e assim o motor elétrico poderia ficar vulnerável a esta ocorrência, e resultando em riscos ao equipamento e ao processo produtivo.

Este evento pode ilustrar como o relé microprocessado auxilia nas análises de ocorrências. Quando comparado a um relé eletromecânico ou estáticos, nota-se os ganhos em funcionalidade, velocidade e segurança.

6 CONCLUSÃO

As proteções de motores trifásicos de média tensão, desempenham um papel fundamental nos sistemas de proteção. Proporcionam a integridade e o bom funcionamento do motor, protegendo-o de falhas inerentes de máquinas acopladas ao seu eixo ou ocorrências no SEP. O dimensionamento correto das proteções, garantem estabilidade nos processos produtivos e em toda a instalação elétrica e seus respectivos equipamentos.

Os motores de média tensão, geralmente possuem elevado custo operacional se comparados aos motores convencionais de baixa tensão requerem um maior cuidado em sua instalação e necessitam de monitoramento contínuo de seu funcionamento. Alguns fatores devem ser considerados, tais como, partidas consecutivas e temperatura elevada do enrolamento e mancais.

Este trabalho abordou o funcionamento dos relés microprocessados, inicialmente foi exposto uma breve revisão sobre os relés de proteção, contemplando a tecnologia e as funções de proteção para aplicação em motores de média tensão. A análise da performance dos relés é essencial na implementação de um sistema de proteção, pois a atuação correta e precisa destes equipamentos resultam em confiabilidade. No caso de motores industriais, por se tratarem de equipamentos de grande importância para o processo produtivo, necessitam de medidas protetivas sensíveis, rápidas e seletivas.

Considerando os resultados apresentados nos relatórios e as análises de falhas do relé multifunção microprocessado modelo SEL-710. Nota-se que, durante o período observado deste o *star-up* do equipamento em 28/12/15, com a implantação do relé microprocessado, as ocorrências de falhas de origens que antes não eram sensibilizadas pelos relés eletromecânicos e estáticos, agora são sensibilizadas pelos relés microprocessados, criando assim um alerta de ocorrência e aperfeiçoamento dos ajustes de proteção, diminuindo as chances de risco ao motor e ao processo produtivo.

Os relés microprocessados proporcionam algumas vantagens sobre os relés eletromecânicos e estáticos, onde os maiores destaques são: custo reduzido durante a fase de instalação, menor espaço físico nos painéis onde são instalados, diversas funcionalidades em um único dispositivo, menor custo de manutenção, flexibilidade na aplicação e possibilidade de múltiplos ajustes no relé.

Com os novos recursos proporcionados pelos relés multifunção microprocessados nos sistemas de proteção, as manutenções são reduzidas em grande escala e um novo método de manutenção preventiva foi adotado como o de calibração dos relés a cada dois anos. Isso se torna possível em função da auto supervisão, que consiste em um *software* dedicado e que faz a varredura continua do funcionamento, prolongando dessa forma o ciclo de manutenção.

Desta forma, é possível observar que relés microprocessados em relação a outros métodos e equipamentos, são os dispositivos mais adequados diante dos benefícios apresentados. Levando em consideração que o relé de proteção é o principal dispositivo no sistema proteção, não somente para aplicação em motores, mas também para diversas áreas do sistema elétrico de potência.

6.1 Trabalhos futuros

Como continuação deste trabalho, propõe-se dimensionar todas as etapas apresentadas nos capítulos anteriores, incluindo motor, transformadores de corrente, transformadores de potência, disjuntor e tipo de relé a ser utilizado. Um outro estudo no escopo do trabalho é a elaboração dos cálculos de corrente de curto-circuito e posteriormente desenvolver os estudos de seletividade e coordenação.

Esse trabalho abordou as proteções de motores de indução trifásico de forma generalizada. Quaisquer um destes assuntos abordados pode ser tratado de forma específica.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 17094-1. **Máquinas Elétricas Girantes. Parte 1: Motores de indução trifásicos – Requisito.** 2018.

ABNT NBR 6856-1992. **Transformadores de Corrente.** 1992.

ABNT NBR IEC 61850. **Redes e Sistema de Comunicação para Automação de Sistemas de Potência.** 2004

ALSTOM GRID. **Network Protection & Automation Guide.** 1 ed. 508f. Disponível em: <<http://rpa.energy.mn/wp-content/uploads/2016/07/network-protection-and-automation-guide-book.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2018.

ANDERSON, P.M. **Power System Protection.** 1 ed. 1313f. New York, The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc New York: 1999. Disponível em: <<https://archive.org/details/POWERSYSTEMPROTECTIONP.M.Anderson/page/n1>>. Acesso em: 20 maio 2018.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8.** Revisão 10. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 20 maio 2018.

BLACKBURN, J. L. **Protective Relaying: Principles and Applications.** 3 ed. 638f. New York, Taylor e Francis Group, LLC: 2006. Disponível em: <https://manautomata.files.wordpress.com/2016/02/protective_relaying_principles_and_applications_blackburn.pdf>. Acesso em: 16 maio 2018.

BULGARELLI, R. **Proteção Térmica de Motores de Indução Trifásicos Industriais.** 2006. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automações Elétricas, São Paulo/SP. 2006.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas;** Tradução: Anatólio Lashuck. 5 ed. 698f. Porto Alegre: AMGH, 2013. Disponível em: <<http://www.elt2014.com.br/materiais/22016/EEL04737/Caderno/Fundamentos%20de%20Maquinas%20Elétricas%20Chapman.pdf>>. Acesso em: 16 maio 2018.

COURY, D. V., OLESKOVICZ, M., GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes.** 1 ed. 378f. São Carlos; Universidade de São Paulo – USP: 2011.

DIAS, L.F. **Proteção de Motores de Grande Porte.** 2013. 96f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá/SP. 2013.

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, C., UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley.** Stephen D. Umans; tradução: Anatólio Laschuk. 7 ed. 724f. Porto Alegre: AMGH, 2014. Disponível em:

<<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAhVglAF/maquinas-eletricas-fitzgeral-7ed-stephen-d-umans>>. Acesso em: 23 de setembro de 2018

GE MULTILIN. **Motor Protection Principles**. 1 ed. 35f. Disponível em: <<https://www.l3.com/private/ieee/Motor%20Protection%20Principles.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2018.

HEWITSON, L.G; BROWN, M; BALAKRISHNAN R. **Power System Protection**. 1 ed. 289f. New York: Elsevier, 2004. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/books/practical-power-system-protection/hewitson/978-0-7506-6397-7>>. Acesso em: 05 maio 2018.

HOROWITZ, S.H., PHADKE, A.G. **Power System Relaying**. 4 ed. 399f. John Wiley and Sons Ltd, 2014. Disponível em: <<https://www.wiley.com/en-us/Power+System+Relaying%2C+4th+Edition-p-9781118662007>>. Acesso em: 20 maio 2018.

IEC 61689-2-2011. **Low-Voltage Switchgear and Controlgear Assemblies – Part 2: Power Switchgear and Controlgear Assemblies**. 2011.

IEEE 620-1996. **IEEE Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines**. 1996

IEEE C37.112-1996. **IEEE Standart Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays**. 1996

LÓPEZ, C. A. L. **Formas de Implementação das Funções de Proteção de Motores de Indução de Média Tensão**. 2012. 11F. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá/SP. 2012. Disponível em: <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/18461/PFC_04072012_Claudio_Lopez.pdf>. Acesso em: 20 maio 2018.

MAEZONO, P. K. **Proteção de Transformadores de Potência e Reatores**. 1 ed. Virtus: Consultoria e Serviços Ltda/ABB. São Paulo, 2010.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2 ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2011.

MARDEGAN, C. **Proteção e Seletividade: Proteção de Motores**. 1 ed. Cap. VIII. 8f. O Setor Elétrico, 2010. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/category/fasciculos/anteriores/protacao-e-seletividade>>. Acesso em: 31 outubro 2018.

MEHTA, V. K.; MEHTA, R. **Principles of Power Systems**. 4 ed. S. Chand, New Delhi. 2009.

NEMA std. MG-1. **Motors and Generators, National Electrical Manufactures Association**. 2002.

ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 20 maio 2018.

ONS. **Procedimentos de Rede – Módulo 11**. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Acesso em: 20 maio 2018.

PHAITANKAR, Y.G., Bhide, S.R. **Fundamentals of Power System Protection**. 1ed. 301f. Asoke K. Ghosh, Prentici Hall os India Private Limited, New Delhi, 2003. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/100002899757630/fundamentals-of-power-system-protection-by-ygpaitankar-and-srbhide>>. Acesso em: 07 novembro 2018.

RAO, S. S. **Switchgear Protection and Power Systems**. 4 ed. Khanna Publishers, Nath Market, Nal Sarak, New Delhi. 2010.

RUSH, P. **Proteção e Automação de Redes**. 1 ed. 543f. São Paulo: Editora Edgard Blucher: Schneider, 2011. Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4367058/course/section/2091823/Livro%20Prote%C3%A7%C3%A3o%20e%20Automa%C3%A7%C3%A3o%20de%20Redes%20Schneider%20Electric.pdf>>. Acesso em: 08 outubro 2018.

SEL. **SEL-710 Motor Protection Relay**. 28f. 2015. Disponível em: <<https://www.selinc.com/SEL-710>>. Acesso em: 22 abril 2018.

SIEMENS. **Motores trifásicos de média tensão**. Disponível em: <https://w3.siemens.com.br/drives/br/pt/motores/motoresmt/Pages/Default.aspx#H_Compact>. Acesso em: 16 maio 2018.

SILVA, M. G. M. **Avaliação do Desempenho de Relés de Proteção Digitais**. 2012. 103f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro/RJ. 2012.

TRZYNADLOWSKI, A., IRWIN, D. J. **Control of induction motors, Electrical and Electronic Engineering**. 1 ed. 241f. Academic Press, 2000. Disponível em: <[http://een.iust.ac.ir/profs/Arabkhabouri/Electrical%20Drives/Books/Andrzej%20M.%20TrzynadlowskiControl%20of%20Induction%20Motors%20\(Electrical%20and%20Electronic%20Engineering\)%20\(Engineering\)%20\(2000\).pdf](http://een.iust.ac.ir/profs/Arabkhabouri/Electrical%20Drives/Books/Andrzej%20M.%20TrzynadlowskiControl%20of%20Induction%20Motors%20(Electrical%20and%20Electronic%20Engineering)%20(Engineering)%20(2000).pdf)>. Acesso em: 16 maio 2018.

WEG. **DT-6 Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção**. 3 ed. 166 f. 2015. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-6-motores-eletricos-assincrono-de-alta-tensao-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 22 abril 2018.

ANEXO A – FUNÇÕES DE PROTEÇÃO E MANOBRAS DOS RELÉS (ANSI/IEC 61850)

Número	Denominação
1	Elemento Principal
2	Relé de partida ou fechamento temporizado
3	Relé de verificação ou interbloqueio
4	Contator principal
5	Dispositivo de interrupção
6	Disjuntor de partida
7	Relé de taxa de variação
8	Dispositivo de desligamento da energia de controle
9	Dispositivo de reversão
10	Chave comutadora de sequência das unidades
11	Dispositivo multifunção
12	Dispositivo de sobrevelocidade
13	Dispositivo de rotação síncrona
14	Dispositivo de subvelocidade
15	Dispositivo de ajuste ou comparação de velocidade e/ou frequência
16	Dispositivo de comunicação de dados
17	Chave de derivação ou descarga
18	Dispositivo de aceleração ou desaceleração
19	Contator de transição partida-marcha
20	Válvula operada eletricamente
21	Relé de distância
22	Disjuntor equalizador
23	Dispositivo de controle de temperatura
24	Relé de sobre excitação ou Volts por Hertz
25	Relé de verificação de Sincronismo ou Sincronização
26	Dispositivo térmico do equipamento
27	Relé de subtensão
28	Detector de chama
29	Contator de isolamento
30	Relé anunciador
31	Dispositivo de excitação
32	Relé direcional de potência
33	Chave de posicionamento
34	Dispositivo master de sequência
35	Dispositivo para operação das escovas ou curto-circuitar anéis coletores
36	Dispositivo de polaridade ou polarização
37	Relé de subcorrente ou subpotência
38	Dispositivo de proteção de mancal

39	Monitor de condições mecânicas
40	Relé de perda de excitação ou relé de perda de campo
41	Disjuntor ou chave de campo
42	Disjuntor / chave de operação normal
43	Dispositivo de transferência ou seleção manual
44	Relé de sequência de partida
45	Monitor de condições atmosféricas
46	Relé de reversão ou desbalanceamento de corrente
47	Relé de reversão ou desbalanceamento de tensão
48	Relé de sequência incompleta / partida longa
49	Relé térmico
50	Relé de sobrecorrente instantâneo
51	Relé de sobrecorrente temporizado
52	Disjuntor de corrente alternada
53	Relé para excitatriz ou gerador CC
54	Dispositivo de acoplamento
55	Relé de fator de potência
56	Relé de aplicação de campo
57	Dispositivo de aterramento ou curto-circuito
58	Relé de falha de retificação
59	Relé de sobretensão
60	Relé de balanço de corrente ou tensão
61	Sensor de densidade
62	Relé temporizador
63	Relé de pressão de gás (Buchholz)
64	Relé detetor de terra
65	Regulador
66	Relé de supervisão do número de partidas
67	Relé direcional de sobrecorrente
68	Relé de bloqueio por oscilação de potência
69	Dispositivo de controle permissivo
70	Reostato
71	Dispositivo de detecção de nível
72	Disjuntor de corrente contínua
73	Contator de resistência de carga
74	Relé de alarme
75	Mecanismo de mudança de posição
76	Relé de sobrecorrente CC
77	Dispositivo de telemedição
78	Relé de medição de ângulo de fase / proteção contra falta de sincronismo
79	Relé de religamento
80	Chave de fluxo
81	Relé de subfrequência / sobrefrequência
82	Relé de religamento de carga de CC

83	Relé de seleção / transferência automática
84	Mecanismo de operação
85	Relé receptor de sinal de telecomunicação (teleproteção)
86	Relé auxiliar de bloqueio
87	Relé de proteção diferencial
88	Motor auxiliar ou motor gerador
89	Chave seccionadora
90	Dispositivo de regulação (regulador de tensão)
91	Relé direcional de tensão
92	Relé direcional de tensão e potência
93	Contator de variação de campo
94	Relé de desligamento
95	Usado para aplicações específicas
96	Relé auxiliar de bloqueio de barra
97 à 99	Usado para aplicações específicas
150	Indicador de falta à terra
AFD	Detector de arco voltaico
CLK	Clock
DDR	Sistema dinâmico de armazenamento de perturbações
DFR	Sistema de armazenamento de faltas digital
ENV	Dados do ambiente
HIZ	Detector de faltas com alta impedância
HMI	Interface Homem-Máquina
HST	Histórico
LGC	Esquema lógico
MET	Medição de Subestação
PDC	Concentrador de dados de fasores
PMU	Unidade de medição de fasores
PQM	Esquema de monitoramento de potência
RIO	Dispositivo Remoto de Inputs/Outputs
RTU	Unidade de terminal remoto / Concentrador de Dados
SER	Sistema de armazenamento de eventos
TCM	Esquema de monitoramento de <i>Trip</i>
SOTF	Fechamento sob falta

ANEXO B – Complementação da Tabela (ANSI/IEC 61850)

Número	Denominação
50N	Sobrecorrente instantâneo de neutro
51N	Sobrecorrente temporizado de neutro (tempo definido ou curvas inversas)
50G	Sobrecorrente instantâneo de terra (comumente chamado 50GS)
51G	Sobrecorrente temporizado de terra (comumente chamado 51GS e com tempo definido ou curvas inversas)
50BF	Relé de proteção contra falha de disjuntor (também chamado de 50/62 BF)
51Q	Relé de sobrecorrente temporizado de sequência negativa com tempo definido ou curvas inversas
51V	Relé de sobrecorrente com restrição de tensão
51C	Relé de sobrecorrente com controle de torque
50PAF	Sobrecorrente de fase instantânea de alta velocidade para detecção de arco voltaico
50NAF	Sobrecorrente de neutro instantânea de alta velocidade para detecção de arco voltaico
59Q	Relé de sobretensão de sequência negativa
59N	Relé de sobretensão residual ou sobretensão de neutro (também chamado de 64G), calculado ou TP em delta aberto
64	Relé de proteção de terra pode ser por corrente ou por tensão. Os diagramas unifilares devem indicar se este elemento é alimentado por TC ou por TP, para que se possa definir corretamente. Se for alimentado por TC, também pode ser utilizado como uma unidade 51 ou 61. Se for alimentado por TP, pode-se utilizar uma unidade 59N ou 64G. A função 64 também pode ser encontrada como proteção de carcaça, massa-cuba ou tanque, sendo aplicada em transformadores de força até 5 MVA.
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
78	Salto vetorial (Vector Shift)
87T	Diferencial de transformador (pode ter 2 ou 3 enrolamentos)
87N	Diferencial de neutro
REF	Falta restrita à terra
87Q	Diferencial de sequência negativa (aplicado para detecção de faltas entre espiras em transformadores)
87G	Diferencial de geradores
87GT	Proteção diferencial do grupo gerador-transformador
87SP	Proteção diferencial de fase dividida de geradores
87V	Diferencial de tensão de fase
87VN	Diferencial de tensão de neutro
87B	Diferencial de barras. Pode ser de alta, média ou baixa impedância
87M	Diferencial de motores.

ANEXO C – VALORES AJUSTADOS NO RELÉ DE PROTEÇÃO

Tag: MOTOR 600 HP		Modelo: SEL-710	
Circuito: MC-1		Fabricante: SEL	
Função	Relação TC's / TP's	Faixa de ajuste	Valor ajustado
27	6900-120 V	27P1P = OFF, (0.60-1.00) x Vnom	0.80 (Trip)
		27P1D = (0.0-120.0) s	3.0
		27P2P = OFF, (0.60-1.00) x Vnom	0.85 (Alarme)
		27P2D = (0.0-120.0) s	3.0
46	200-5 A	46UBT = OFF, (5-80) %	20 (Trip)
		46UBTD = (0-240) s	3
		46UBA = OFF, (5-80) %	10 (Alarme)
		46UBAD = (0-240) s	3
47	--	E47T = Yes, No	Yes
48	--	START_T = OFF, (1-240) s	11
49RMS	200-5 A	FLA = 0.2-5000.0	46.9
		SETMETH = RATING,CURVE	CURVE
		49RSTP = (10-99) %	85
		SF = 1.01-1.50	1.01
		CURVE1 = 1-46	9
		TCAPU = OFF, (50-99) %	95
		TCSTART = OFF, (1-99) %	75
		TCLRNE = Y, N	N
COOLTIME = (1-6000) min	2043		
49T	--	RTD1...6LOC	WDG (Winding)
		RTD1...6TY	PT100
		TRTMP1...6 = OFF, (1-250) °C	155 (Trip)
		ALTMP1...6 = OFF, (1-250) °C	130 (Alarme)
		RTD7...8LOC	BRG (Bearing)
		RTD7...8TY	PT100
		TRTMP7...8 = OFF, (1-250) °C	120 (Trip)
		ALTMP7...8 = OFF, (1-250) °C	110 (Alarme)
50	200-5 A	50P1P = OFF, (0.10-20.00) x FLA	12.00
		50P1D = (0.00-5.00) s	0.00
50N	50-5 A	50N1P = OFF, (0.01-650.00) Amps Prim.	15.00

		50N1D = (0.00-5.00) s	0.00
50Q	200-5 A	50Q1P = OFF, (0.10-20.00) x FLA	0.15
		50Q1D = (0.00-120.00) s	3.00
51LR	200-5 A	LJT1P = OFF, (1.00-6.00) x FLA	1.50
		LJTDLY = (0.0-120.0) s	2.0
59	6900-120 V	59P1P = OFF, (1.00-1.20) x Vnom	1.15 (Trip)
		59P1D = (0.0-120.0) s	3.0
		59P2P = OFF, (1.00-1.20) x Vnom	1.10 (Alarme)
		59P2D = (0.0-120.0) s	3.0
66	--	MAXSTART = OFF, 1-15	3
		TBSDLY = OFF, (1-150) min	20
81O	6900-120 V	81D3TP = OFF, (20.0-70.0) Hz	63.0 (Alarme)
		81D3TD = (0.0-240.0) s	3.0
		81D4TP = OFF, (20.0-70.0) Hz	66.0 (Trip)
		81D4TD = (0.0-240.0) s	3.0
81U	6900-120 V	81D1TP = OFF, (20.0-70.0) Hz	57.0 (Alarme)
		81D1TD = (0.0-240.0) s	3.0
		81D2TP = OFF, (20.0-70.0) Hz	54.0 (Trip)
		81D2TD = (0.0-240.0) s	3.0

ANEXO D – AUTORIZAÇÃO INSTITUCIONAL

AUTORIZAÇÃO INSTITUCIONAL

Eu, Luiz Gonzaga Peixoto, responsável pela White Martins Gases Industriais LTDA, localizada no município de Juiz de Fora, estado de Minas Gerais, autorizo a realização do estudo de caso, **APLICAÇÃO DE RELÉS MICROPROCESSADOS NA PROTEÇÃO DE MOTORES DE MÉDIA TENSÃO**, a ser conduzido pelos pesquisadores Andressa Werneck e Valmir Rodrigues Lameu.

Declaro que fui informado, pelos responsáveis do estudo, sobre as características e objetivos da pesquisa, bem como a utilização de dados referente ao presente estudo que serão realizados na instituição a qual represento.

Esta instituição está ciente de suas responsabilidades como instituição co-participante do presente projeto de pesquisa e de seu compromisso no resguardo da segurança e bem estar dos sujeitos de pesquisa nela recrutados, dispondo de infraestrutura necessária para a garantia de tal segurança e bem estar.

WHITE MARTINS GILDA

Luiz Gonzaga Peixoto
GERENTE PRODUÇÃO LIG. USINA JUIZ DE FORA

Assinatura

Juiz de Fora, 23 de NOVEMBRO de 2018