

Guia Técnico

Abrangente para a

Proteção de Motores

Elétricos de Baixa

Tensão

Eng° Walterney Luis Pinto

Guia Técnico Abrangente para a Proteção de Motores Elétricos de Baixa Tensão

Sumário Executivo.....	3
Seção 1: Fundamentos das Falhas em Motores Elétricos de Baixa Tensão.....	3
1.1. Análise das Falhas Elétricas: Causas e Consequências.....	4
1.1.1. Sobrecarga (Overload).....	4
1.1.2. Curto-Circuito (Short Circuit).....	4
1.1.3. Falta de Fase e Desbalanceamento de Tensão (Phase Failure and Voltage Unbalance).....	5
1.1.4. Subtensão e Sobretensão (Undervoltage and Overvoltage).....	5
1.2. Análise das Falhas Mecânicas com Impacto Elétrico.....	6
1.2.1. Rotor Travado (Locked Rotor).....	6
1.2.2. Desgaste de Rolamentos e Desalinhamento (Bearing Wear and Misalignment)	6
1.3. Diagnóstico de Falhas Através da Análise de Enrolamentos.....	7
Seção 2: Dispositivos de Proteção: Análise Comparativa e Funcionalidades.....	8
2.1. Proteção contra Sobrecarga.....	8
2.1.1. Relés de Sobrecarga Térmicos (Bimetálicos).....	8
2.1.2. Relés de Sobrecarga Eletrônicos.....	9
2.2. Proteção contra Curto-Circuito.....	9
2.2.1. Fusíveis (Classes gG/gL e aM).....	10
2.2.2. Disparadores Magnéticos em Disjuntores.....	10
2.3. Soluções Integradas: O Disjuntor-Motor.....	10
2.4. Proteções Específicas para Qualidade de Energia.....	11
2.4.1. Relés de Falta de Fase.....	11
2.4.2. Monitores de Tensão (Subtensão e Sobretensão).....	11
Seção 3: Guia de Seleção e Dimensionamento da Proteção.....	12
3.1. Critérios Essenciais para a Seleção de Dispositivos.....	12
3.1.1. Análise da Carga e do Motor.....	12
3.1.2. O Ambiente de Aplicação e suas Influências.....	13
3.2. Dimensionamento da Proteção contra Sobrecarga.....	13
3.2.1. Cálculo da Corrente de Ajuste para Relés (I_r).....	13
3.2.2. Seleção da Classe de Disparo (Trip Class).....	14
3.3. Dimensionamento da Proteção contra Curto-Circuito.....	14
3.4. Referências Normativas.....	15
Seção 4: Coordenação e Seletividade para Máxima Confiabilidade do Sistema.....	15
4.1. O Conceito de Coordenação de Proteção (Norma IEC 60947-4-1).....	16

4.2. Análise Comparativa: Coordenação Tipo 1 vs. Tipo 2.....	16
4.2.1. Coordenação Tipo 1 (Padrão).....	16
4.2.2. Coordenação Tipo 2 (Alto Desempenho).....	17
4.3. Seletividade: Garantindo a Continuidade do Serviço.....	18
Seção 5: O Futuro da Proteção de Motores: Relés Inteligentes e Manutenção Preditiva 4.0...	18
5.1. Funcionalidades Avançadas dos Relés Inteligentes.....	19
5.1.1. Além da Proteção.....	19
5.1.2. Monitoramento Remoto, Diagnóstico e Comunicação.....	19
5.1.3. Gestão de Energia e Otimização da Eficiência.....	20
5.2. Integrando a Proteção à Manutenção Preditiva (PdM).....	20
5.2.1. O Relé Inteligente como Sensor de PdM.....	20
5.2.2. Redução de Downtime e Otimização de Custos (OPEX).....	21
Conclusão e Recomendações.....	21
Referências citadas.....	22

Sumário Executivo

A proteção de motores elétricos de baixa tensão transcende a simples prevenção de falhas catastróficas, constituindo-se como uma disciplina de engenharia essencial para garantir a longevidade dos ativos, a confiabilidade operacional e a segurança das instalações e do pessoal. A degradação do isolamento dos enrolamentos, causada primariamente pelo sobreaquecimento, é o ponto nevrálgico da maioria das falhas de motores.¹ Este sobreaquecimento pode ser desencadeado por uma variedade de condições anormais, incluindo sobrecargas mecânicas, curtos-circuitos e desequilíbrios na alimentação trifásica.

Para mitigar esses riscos, existe um espectro de soluções de proteção, que vai desde componentes fundamentais, como fusíveis e relés térmicos³, até dispositivos integrados e eficientes, como os disjuntores-motores⁵, e culmina em sistemas avançados baseados em relés inteligentes.⁷ A seleção e a implementação corretas desses dispositivos não são triviais; elas exigem uma compreensão aprofundada tanto do motor quanto da aplicação.

Um conceito central abordado neste relatório é a "Coordenação de Proteção", normatizada pela IEC 60947. A escolha estratégica entre uma coordenação Tipo 1 (focada no menor custo de aquisição) e uma coordenação Tipo 2 (focada na máxima continuidade de serviço) representa uma decisão de negócio fundamental, que equilibra o investimento inicial (CAPEX) com o custo operacional decorrente de paradas não planejadas (OPEX).⁸

Finalmente, este guia posiciona as estratégias modernas de proteção como um pilar da Indústria 4.0. Os dados operacionais coletados por relés inteligentes transformam o dispositivo de proteção de um simples guardião passivo em um sensor ativo, habilitando a transição de uma manutenção reativa para uma manutenção preditiva, otimizando custos e maximizando a disponibilidade dos ativos.⁷

Seção 1: Fundamentos das Falhas em Motores Elétricos de Baixa Tensão

Para proteger eficazmente um motor, é imperativo primeiro compreender os

mecanismos que levam à sua falha. A análise das causas-raiz, sejam elas de natureza elétrica ou mecânica, revela que a maioria dos caminhos destrutivos converge para um inimigo comum: o calor excessivo. Esta seção dissecar as falhas mais comuns, estabelecendo o contexto crítico para a seleção e o dimensionamento dos dispositivos de proteção.

1.1. Análise das Falhas Elétricas: Causas e Consequências

1.1.1. Sobrecarga (Overload)

A sobrecarga é uma condição na qual o motor é solicitado a fornecer um torque superior à sua capacidade nominal, resultando em uma corrente elétrica acima do valor normal de operação.² É a causa mais frequente de falhas em motores. As origens podem ser um aumento na carga mecânica acionada, desgaste em rolamentos, desalinhamento entre o motor e a carga, ou uma tensão de alimentação abaixo da nominal, que força o motor a demandar mais corrente para manter a mesma potência.

A consequência primária e mais danosa da sobrecarga é o sobreaquecimento progressivo dos enrolamentos. A vida útil de um motor está quase que exclusivamente atrelada à vida útil do seu sistema de isolamento, que é extremamente sensível à temperatura. Um aumento de apenas 8 a 10 °C acima do limite da classe térmica do isolamento pode reduzir sua vida útil pela metade.¹ Esse aquecimento excessivo degrada o verniz isolante, levando ao desgaste prematuro e, eventualmente, à queima completa do motor.²

1.1.2. Curto-Circuito (Short Circuit)

Um curto-circuito representa um caminho de baixa impedância entre fases distintas ou entre uma fase e a terra, gerando correntes de falta de magnitude extremamente elevada. A causa fundamental é a falha do isolamento dos enrolamentos, que pode

ser provocada por degradação térmica (resultante de sobrecargas prolongadas), contaminação por umidade ou poeira, ou danos mecânicos durante a instalação ou manutenção.¹¹

As consequências de um curto-circuito são duplamente destrutivas: térmicas e eletrodinâmicas. A corrente intensa gera um calor violento e quase instantâneo, capaz de fundir os condutores de cobre e carbonizar o material isolante. Simultaneamente, as forças magnéticas massivas geradas pela corrente podem deformar fisicamente os enrolamentos, danificar o núcleo do estator e até mesmo causar a expulsão de componentes.⁸ Trata-se de um evento de alto risco, com potencial para incêndios e explosões.¹²

1.1.3. Falta de Fase e Desbalanceamento de Tensão (Phase Failure and Voltage Unbalance)

A falta de fase é a perda total de uma das fases em um sistema de alimentação trifásico, enquanto o desbalanceamento de tensão ocorre quando as tensões entre as fases não são iguais.² Essas condições podem ser causadas pela queima de um fusível em uma das fases, uma conexão frouxa em um terminal, ou pela distribuição desigual de cargas monofásicas ao longo do sistema de distribuição da planta.²

Quando um motor trifásico opera com falta de fase, ele tenta continuar girando com apenas duas fases. Isso faz com que a corrente nos enrolamentos restantes aumente drasticamente (em até 73%), provocando um sobreaquecimento extremamente rápido e a queima do motor.¹¹ O desbalanceamento de tensão, mesmo que pequeno, também é prejudicial, pois gera correntes de sequência negativa que circulam no motor, causando aquecimento desigual, vibrações, redução da eficiência e, conseqüentemente, uma diminuição significativa da vida útil.²

1.1.4. Subtensão e Sobre tensão (Undervoltage and Overvoltage)

Estas condições ocorrem quando a tensão de alimentação está consistentemente abaixo ou acima da tensão nominal para a qual o motor foi projetado.¹⁴ As causas incluem redes de alimentação mal reguladas, cabos de alimentação longos e com

bitola insuficiente, ou a partida de grandes cargas no mesmo circuito.

A subtensão força o motor a drenar uma corrente maior para produzir o mesmo torque, resultando em sobreaquecimento, de forma similar a uma sobrecarga mecânica.¹ A sobretensão, por sua vez, aumenta o estresse dielétrico sobre o sistema de isolamento, podendo causar sua ruptura e levar a um curto-circuito.² Ambas as condições são insidiosas porque encurtam a vida do motor e são causadas por fatores externos à máquina, tornando a proteção externa indispensável.¹⁴

1.2. Análise das Falhas Mecânicas com Impacto Elétrico

É um erro comum dissociar a saúde mecânica da saúde elétrica de um motor. Muitas falhas mecânicas manifestam-se primeiramente como sintomas elétricos, e um sistema de proteção bem projetado pode servir como um sistema de alerta precoce.

1.2.1. Rotor Travado (Locked Rotor)

Esta é a condição mais severa de sobrecarga, ocorrendo quando o eixo do motor é impedido de girar, seja durante a partida ou em operação. As causas típicas são o travamento mecânico da carga acionada (como uma bomba obstruída) ou a falha de um rolamento.¹¹ Eletricamente, o motor drena continuamente sua corrente de partida, que pode ser de 6 a 8 vezes sua corrente nominal. O calor gerado é tão intenso que pode destruir o isolamento dos enrolamentos em questão de segundos se a alimentação não for interrompida por um dispositivo de proteção.¹¹

1.2.2. Desgaste de Rolamentos e Desalinhamento (Bearing Wear and Misalignment)

Problemas mecânicos como desalinhamento do eixo, "pé manco" (apoio irregular da base do motor) ou rolamentos desgastados aumentam o atrito e a vibração do conjunto.² Do ponto de vista elétrico, esse aumento da carga mecânica é

indistinguível de uma sobrecarga de processo. O motor é forçado a trabalhar mais, drenando mais corrente e operando em uma temperatura mais elevada, o que acelera o envelhecimento do isolamento e reduz sua vida útil.² Um disparo por sobrecarga pode, portanto, ser o primeiro indicativo de um problema mecânico em desenvolvimento.

1.3. Diagnóstico de Falhas Através da Análise de Enrolamentos

Uma vez que um motor falha, a análise visual do enrolamento queimado é uma ferramenta de diagnóstico poderosa para determinar a causa-raiz do problema. Identificar corretamente a causa é fundamental para evitar falhas recorrentes, pois a simples substituição do motor não resolve o problema subjacente na instalação.¹¹ A tabela a seguir serve como um guia prático para essa análise.

Tabela 1.1: Características de Queima de Enrolamentos e Suas Causas Prováveis

Característica da Queima	Aparência Visual	Causa Provável	Fontes
:--- :--- :--- :---			
Sobreaquecimento Geral	Enrolamento uniformemente escurecido em todas as três fases. O verniz pode estar ressecado e quebradiço.	Sobrecarga prolongada, subtensão ou sobretensão na rede, rotor travado, ventilação deficiente (obstrução), ambiente com alta temperatura.	11
Falta de Fase (Conexão Estrela)	Duas das três fases estão completamente queimadas (carbonizadas), enquanto a terceira fase permanece intacta ou com poucos danos.	Queima de um fusível, rompimento de um cabo de alimentação, mau contato em uma das fases do contator ou disjuntor.	11
Falta de Fase (Conexão Triângulo)	Uma das três fases está severamente queimada, enquanto as outras duas apresentam sinais de sobreaquecimento, mas em menor grau.	Mesmas causas da falta de fase em conexão estrela. A distribuição de corrente na conexão triângulo resulta neste padrão de queima distinto.	11
Desbalanceamento de Tensão	As três fases estão queimadas, mas de forma desigual, com uma ou duas fases apresentando danos visivelmente mais severos que a(s) outra(s).	Desequilíbrio de tensão entre as fases da rede, mau contato em conexões ou falhas em bancos de capacitores.	11
Curto-Circuito entre Fases	Queima localizada e violenta no ponto de contato entre bobinas de fases diferentes.	Frequentemente há evidência de fusão do cobre.	Falha do material

isolante entre as fases, degradação do isolamento por envelhecimento térmico, contaminação interna do motor. | 11 |

| Pico de Tensão (Surto) | Queima pontual e profunda, geralmente na entrada da bobina ou em uma espira. Pode parecer uma "perfuração" no isolamento. | Descargas atmosféricas, surtos de manobra na rede (e.g., comutação de bancos de capacitores), parâmetros incorretos em inversores de frequência. | 11 |

Seção 2: Dispositivos de Proteção: Análise Comparativa e Funcionalidades

A seleção de um sistema de proteção envolve a escolha e a combinação de dispositivos que endereçam os riscos específicos identificados. A tecnologia evoluiu de componentes de função única para soluções integradas e inteligentes, oferecendo um leque de opções que equilibram custo, desempenho e complexidade. Esta seção analisa o princípio de funcionamento e as características dos principais dispositivos.

2.1. Proteção contra Sobrecarga

A proteção contra sobrecarga é projetada para atuar em sobrecorrentes de baixa magnitude, mas de longa duração, que causam o aquecimento gradual do motor.

2.1.1. Relés de Sobrecarga Térmicos (Bimetálicos)

O relé térmico bimetálico é a solução mais tradicional e difundida para a proteção contra sobrecarga. Seu princípio de funcionamento baseia-se em tiras bimetálicas, uma para cada fase, que são aquecidas indiretamente pela passagem da corrente do motor. Quando a corrente excede o valor ajustado por um tempo suficiente, o calor gerado causa a deformação das tiras. Essa deformação aciona um mecanismo mecânico que comuta seus contatos auxiliares, interrompendo o circuito de comando e desenergizando o contator que alimenta o motor.³

Estes dispositivos são robustos, econômicos e possuem uma característica intrínseca de sensibilidade à falta de fase: se uma fase for interrompida, a ausência de corrente em uma das tiras, enquanto as outras duas se aquecem excessivamente, acelera o mecanismo de disparo. A maioria dos modelos modernos possui compensação de temperatura ambiente, o que os torna mais confiáveis em painéis com variações de temperatura.³ Sua principal limitação reside na menor precisão em comparação com os relés eletrônicos e em um tempo de rearme que depende do resfriamento das lâminas.

2.1.2. Relés de Sobrecarga Eletrônicos

Os relés eletrônicos representam um avanço significativo em precisão e flexibilidade. Eles utilizam pequenos transformadores de corrente (TCs) internos para medir com exatidão a corrente em cada fase. Um microprocessador executa um algoritmo que simula o aquecimento do motor com base nessas medições, criando um "modelo térmico".³ Quando o aquecimento calculado atinge um limite crítico, o relé atua eletronicamente.

A grande vantagem dos relés eletrônicos é a sua alta precisão, repetibilidade e a capacidade de ajustar não apenas a corrente de disparo, mas também a "classe de disparo" (e.g., Classe 10, 20 ou 30). Isso permite adequar a proteção ao tempo de partida específico da carga, evitando disparos intempestivos em aplicações de alta inércia.⁹ Eles também oferecem proteção inerente e mais precisa contra falta de fase e desbalanceamento de corrente. Adicionalmente, consomem menos energia, possuem um tempo de rearme mais rápido e são imunes a variações de temperatura ambiente.³

2.2. Proteção contra Curto-Circuito

A proteção contra curto-circuito deve ser instantânea, capaz de interromper correntes de altíssima magnitude em milissegundos para evitar danos catastróficos.

2.2.1. Fusíveis (Classes gG/gL e aM)

Os fusíveis são os dispositivos de proteção mais simples, consistindo em um elo metálico projetado para se fundir e abrir o circuito quando a corrente ultrapassa seu valor nominal. São dispositivos de uso único e precisam ser substituídos após cada atuação.

- **Classe gG/gL (Uso Geral):** Estes fusíveis são projetados para proteger cabos e circuitos em geral. Eles atuam tanto em condições de sobrecarga quanto de curto-circuito. No entanto, para circuitos de motores, eles são problemáticos: para suportar a alta corrente de partida do motor sem queimar, eles precisariam ser superdimensionados, o que anularia a proteção contra sobrecargas de baixa magnitude.⁴
- **Classe aM (Acompanhamento de Motor):** Desenvolvidos especificamente para esta aplicação, os fusíveis aM possuem uma característica de atuação retardada para correntes mais baixas, permitindo a passagem da corrente de partida. Contudo, eles atuam de forma ultrarrápida para as correntes elevadas típicas de um curto-circuito. É crucial entender que **fusíveis de classe aM fornecem proteção exclusivamente contra curto-circuito** e devem, obrigatoriamente, ser utilizados em conjunto com um relé de sobrecarga para uma proteção completa.¹⁹

2.2.2. Disparadores Magnéticos em Disjuntores

Presentes em disjuntores-motores e disjuntores de caixa moldada, o disparador magnético consiste em uma bobina que, ao ser percorrida pela corrente de falta, gera um campo magnético intenso. Esse campo atrai uma armadura que aciona mecanicamente o mecanismo de abertura do disjuntor de forma quase instantânea.⁵ Diferente dos fusíveis, o disjuntor pode ser rearmado manualmente após a eliminação da falha, permitindo um rápido restabelecimento do serviço.⁵

2.3. Soluções Integradas: O Disjuntor-Motor

O disjuntor-motor é um dispositivo compacto que representa a integração das

funções de proteção. Ele combina, em um único invólucro, a proteção contra sobrecarga (através de um disparador térmico, similar ao relé bimetálico) e a proteção contra curto-circuito (através de um disparador magnético).⁵

As principais vantagens dessa solução são a significativa economia de espaço no painel elétrico, a simplificação da fiação e a redução do tempo de montagem. Além disso, a coordenação entre as proteções térmica e magnética é inerente ao projeto do dispositivo, eliminando a necessidade de selecioná-las separadamente. Modelos modernos, como a linha MPW da WEG, já incluem sensibilidade à falta de fase como uma característica padrão, oferecendo uma proteção ainda mais completa em um único componente.⁶ Sua principal limitação é que, para aplicações que exigem comando remoto ou automação, ele ainda precisa ser associado a um contator.⁹

2.4. Proteções Específicas para Qualidade de Energia

Anomalias na rede elétrica, como falta de fase ou variações de tensão, são causas comuns de queima de motores. Dispositivos específicos podem ser adicionados para monitorar e proteger contra essas condições.

2.4.1. Relés de Falta de Fase

Este relé monitora continuamente a presença, a sequência e, em modelos mais avançados, a simetria entre as três fases da alimentação. Na detecção de qualquer anomalia, como a perda de uma fase, ele comuta seus contatos para desligar o circuito de comando do motor, prevenindo a operação em condições danosas.¹³ Sua utilização é essencial em sistemas onde os demais dispositivos não possuem uma proteção de falta de fase integrada e confiável.

2.4.2. Monitores de Tensão (Subtensão e Sobretensão)

Esses dispositivos eletrônicos medem continuamente a tensão da rede de

alimentação. Se a tensão sair de uma faixa de operação segura, pré-ajustada pelo usuário, o relé atua para proteger o motor.¹⁴ Ele detecta a condição de subtensão ou sobretensão e ativa um circuito de disparo, desligando o motor antes que o isolamento ou os enrolamentos sejam danificados pela corrente excessiva (em caso de subtensão) ou pelo estresse dielétrico (em caso de sobretensão).¹⁵

Seção 3: Guia de Seleção e Dimensionamento da Proteção

O dimensionamento correto da proteção é um processo de engenharia que equilibra a necessidade de proteger o motor contra condições anormais com a necessidade de permitir sua operação normal, especialmente durante a partida. Este guia apresenta uma metodologia passo a passo, baseada em dados do motor, da carga e em requisitos normativos.

3.1. Critérios Essenciais para a Seleção de Dispositivos

3.1.1. Análise da Carga e do Motor

O ponto de partida é a coleta de dados da placa de identificação do motor, que contém informações vitais:

- **Corrente Nominal (I_n):** A corrente que o motor consome sob carga nominal.
- **Fator de Serviço (FS):** Um multiplicador que indica a sobrecarga que o motor pode suportar continuamente sob condições nominais. Um FS de 1.15 significa que o motor pode operar a 15% acima de sua potência nominal.²²
- **Tensão Nominal e Frequência.**
- **Relação I_p/I_n :** A relação entre a corrente de partida (com rotor bloqueado) e a corrente nominal.

Além dos dados do motor, é crucial entender as características da carga que ele aciona. Cargas com alta inércia, como grandes ventiladores e britadores, possuem

tempos de partida longos e exigem proteções com maior tolerância a sobrecorrentes temporárias para evitar disparos indevidos durante a aceleração.²³

3.1.2. O Ambiente de Aplicação e suas Influências

Fatores ambientais podem afetar o desempenho dos dispositivos de proteção. A temperatura ambiente elevada ou a instalação em altitudes superiores a 2.000 metros reduzem a capacidade de dissipação de calor dos componentes. Nesses casos, pode ser necessário aplicar fatores de correção (derating) à corrente nominal dos dispositivos, conforme especificado pelos fabricantes, para garantir sua operação correta.⁴ Ambientes com alta concentração de poeira ou umidade exigem dispositivos com grau de proteção (IP) adequado para evitar falhas prematuras.

3.2. Dimensionamento da Proteção contra Sobrecarga

3.2.1. Cálculo da Corrente de Ajuste para Relés (I_r)

A corrente de ajuste (I_r) do relé de sobrecarga ou do disparador térmico do disjuntor-motor deve ser configurada para proteger o motor sem restringir sua operação normal.

- **Regra Geral:** A corrente de ajuste (I_r) deve ser igual à corrente nominal do motor (I_n).
- **Utilização do Fator de Serviço (FS):** A norma ABNT NBR 5410 permite que, para motores com Fator de Serviço maior que 1, a proteção seja ajustada para um valor de até $I_r = I_n \times FS$.²² Essa prática é fundamental, pois permite que o usuário utilize toda a capacidade de sobrecarga para a qual o motor foi projetado e pela qual pagou, sem que a proteção atue prematuramente. Um exemplo prático demonstra a aplicação de um fator de majoração de 1.25 sobre a corrente de serviço para definir o ajuste da proteção.²⁴

3.2.2. Seleção da Classe de Disparo (Trip Class)

A classe de disparo é um parâmetro crucial, especialmente para relés eletrônicos e disjuntores-motores, que define a tolerância do dispositivo à corrente de partida. Ela representa o tempo máximo, em segundos, que o dispositivo levará para atuar quando submetido a uma corrente de 7,2 vezes a sua corrente de ajuste (I_r), uma condição que simula um rotor travado.⁹

A seleção deve ser baseada no tempo de partida da carga acoplada ao motor ²³:

- **Classe 10 (padrão):** Adequada para a maioria das aplicações com partidas normais, de até 10 segundos.
- **Classe 20:** Para cargas pesadas com tempos de partida mais longos, entre 10 e 20 segundos (e.g., misturadores, compressores de pistão).
- **Classe 30:** Para cargas de altíssima inércia com tempos de partida de até 30 segundos (e.g., grandes ventiladores centrífugos, moinhos de bolas).

A escolha incorreta da classe de disparo tem consequências diretas: uma classe muito baixa (e.g., 10) para uma carga pesada resultará em disparos incômodos durante cada partida. Por outro lado, uma classe muito alta (e.g., 30) para uma carga leve pode não proteger o motor a tempo em uma real condição de rotor travado.

3.3. Dimensionamento da Proteção contra Curto-Circuito

O dispositivo de proteção contra curto-circuito deve atender a dois critérios conflitantes: ser "cego" à alta corrente de partida do motor, mas ser extremamente "sensível" a uma corrente de curto-circuito, que é ainda maior.

- **Disjuntor-Motor:** O disparador magnético destes dispositivos já vem ajustado de fábrica para um valor fixo ou possui uma faixa de ajuste que o posiciona bem acima da corrente de partida típica (e.g., 13 vezes a corrente máxima do ajuste térmico, como nos modelos MPW da WEG ⁶). O critério principal de seleção, portanto, é garantir que sua capacidade máxima de interrupção de curto-circuito (em kA) seja igual ou superior à corrente de curto-circuito presumida (I_{cc}) no ponto da instalação.

- **Fusível aM:** A seleção de fusíveis aM é mais complexa e deve ser feita, preferencialmente, utilizando as tabelas de coordenação fornecidas pelos fabricantes. Essas tabelas garantem que o fusível escolhido suportará a partida do motor quando coordenado com um contator e relé de sobrecarga específicos, mas atuará antes de qualquer dano em caso de curto-circuito.

3.4. Referências Normativas

O projeto de proteção de motores é guiado por um conjunto de normas técnicas que estabelecem os requisitos mínimos de segurança e desempenho.

- **ABNT NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão:** Esta é a norma fundamental para qualquer instalação elétrica no Brasil. Ela estipula que os motores devem ser protegidos contra sobrecargas e curtos-circuitos, define as regras para o ajuste da proteção de sobrecarga (incluindo o uso do fator de serviço) e estabelece limites para a queda de tensão nos condutores durante a partida do motor.²²
- **ABNT NBR 17094 – Máquinas Elétricas Girantes:** Esta norma especifica os requisitos de construção e desempenho para os próprios motores de indução. Os parâmetros definidos nesta norma, como corrente nominal e fator de serviço, são os dados de entrada para o correto dimensionamento da proteção.²⁶
- **IEC 60947 – Conjuntos de Manobra e Controle de Baixa Tensão:** Esta é a série de normas internacionais que rege os dispositivos de proteção e manobra. A parte 4-1, em particular, é crucial, pois define os testes, as classes de disparo e os tipos de coordenação para partidas de motores, servindo como base para os catálogos e tabelas dos fabricantes.⁸

Seção 4: Coordenação e Seletividade para Máxima Confiabilidade do Sistema

A proteção de um motor não se resume a um único dispositivo, mas a um sistema de componentes que devem operar em harmonia. A coordenação entre esses componentes é o que garante que uma falha será interrompida de forma segura e com o mínimo impacto possível na operação. Esta seção explora os conceitos

avançados de coordenação e seletividade.

4.1. O Conceito de Coordenação de Proteção (Norma IEC 60947-4-1)

A coordenação de proteção é a associação, testada e certificada em laboratório, entre um dispositivo de proteção contra curto-circuito (disjuntor ou fusível), um dispositivo de manobra (contator) e um dispositivo de proteção contra sobrecarga (relé). O objetivo é garantir que essa combinação opere de forma segura e previsível sob todas as condições de sobrecorrente.⁹

A importância deste conceito reside no fato de que a interação entre os componentes durante um curto-circuito é extremamente complexa e impossível de ser calculada com precisão em um projeto. As imensas forças eletrodinâmicas podem causar a repulsão dos contatos do contator, gerando um arco elétrico, enquanto o disjuntor atua para interromper a falta.⁸ Apenas testes empíricos podem validar se o conjunto sobrevive sem riscos. Por essa razão, os fabricantes fornecem tabelas de coordenação testadas, e a prática de engenharia correta e segura é seguir estritamente essas combinações certificadas, em vez de "inventar" associações de componentes não validadas.⁸

4.2. Análise Comparativa: Coordenação Tipo 1 vs. Tipo 2

A norma IEC 60947-4-1 define dois níveis principais de coordenação, cuja escolha representa uma decisão estratégica entre o custo inicial do investimento e o custo da continuidade operacional.

4.2.1. Coordenação Tipo 1 (Padrão)

- **Requisito:** No caso de um curto-circuito, o conjunto de partida não deve apresentar perigo para o operador ou para a instalação (e.g., sem projeção de partes ou incêndio). O dispositivo de proteção contra curto-circuito (disjuntor) deve permanecer operacional.

- **Consequência:** O contator e/ou o relé de sobrecarga podem sofrer danos permanentes (como a soldagem dos contatos) e precisar de substituição. Isso implica um tempo de parada (downtime) para que a equipe de manutenção possa realizar o reparo.⁸
- **Aplicação:** É a solução mais econômica e comum, adequada para cargas não críticas, onde uma parada para manutenção é aceitável e o foco principal é minimizar o custo de aquisição (CAPEX).

4.2.2. Coordenação Tipo 2 (Alto Desempenho)

- **Requisito:** Além de garantir a segurança, a coordenação Tipo 2 exige que o contator e o relé de sobrecarga permaneçam em perfeitas condições de serviço após a ocorrência do curto-circuito. É permitida uma leve soldagem dos contatos do contator, desde que possam ser separados facilmente (e.g., com uma chave de fenda) sem a necessidade de trocar peças.
- **Consequência:** A partida do motor pode ser rearmada e colocada em operação quase que imediatamente após a eliminação da causa da falha, minimizando drasticamente o downtime.⁸
- **Aplicação:** Essencial para processos críticos e contínuos, como em hospitais, data centers, indústrias petroquímicas e linhas de produção automatizadas, onde o custo de uma hora parada (OPEX) é ordens de magnitude maior do que o custo adicional dos componentes de proteção de alto desempenho.

A Tabela 4.1 abaixo oferece um guia para auxiliar na decisão entre os tipos de coordenação, transformando uma escolha técnica em uma análise de negócio.

Tabela 4.1: Guia de Decisão para Tipo de Coordenação

Fator de Análise	Cenário para Coordenação Tipo 1	Cenário para Coordenação Tipo 2
Criticidade do Processo	Baixa a média. A parada do motor não interrompe um processo essencial ou um gargalo da produção.	Alta a crítica. A parada do motor causa a interrupção de toda a linha de produção ou de um serviço vital.
Custo Estimado da Hora Parada	Baixo. As perdas financeiras por tempo de inatividade são gerenciáveis ou negligenciáveis.	Elevado. Cada minuto de parada representa perdas significativas em produção, multas contratuais ou risco à segurança.
Disponibilidade da Manutenção	Equipe de manutenção prontamente disponível e com baixo custo. O tempo para substituir um contator é aceitável.	Equipe de manutenção cara, com tempo de resposta longo, ou indisponível 24/7. A necessidade de intervenção deve ser

minimizada. |

| Custo de Reposição | O custo de um novo contator/relé é um fator relevante no orçamento de manutenção. | O custo dos componentes de reposição é irrelevante quando comparado à perda de produção causada pela parada. |

| Foco Estratégico | Minimizar o investimento inicial (CAPEX). | Minimizar o custo operacional total (OPEX) e maximizar a disponibilidade (uptime) do ativo. |

4.3. Seletividade: Garantindo a Continuidade do Serviço

Enquanto a coordenação lida com a segurança de uma única partida de motor, a seletividade aborda a interação entre os vários níveis de proteção em uma instalação. Seletividade é a capacidade de um sistema de isolar uma falha atuando apenas o dispositivo de proteção imediatamente a montante (mais próximo) do defeito, sem causar a interrupção de outros circuitos sadios.⁹ Por exemplo, um curto-circuito em um motor deve desarmar apenas o disjuntor daquele motor, e não o disjuntor geral do painel que alimenta vários outros motores.

Existem diferentes métodos para alcançar a seletividade, como a seletividade amperimétrica, cronométrica (baseada em tempo), energética (baseada na energia I^2t) e lógica, que utiliza comunicação entre relés inteligentes para uma coordenação otimizada.⁹

Em oposição à seletividade, existe a técnica de **cascadeamento** (ou proteção de retaguarda). Nela, um disjuntor a montante, de maior capacidade, "ajuda" um disjuntor a jusante, de menor capacidade, a interromper uma corrente de curto-circuito que exceda a capacidade deste último. A vantagem é econômica, pois permite o uso de disjuntores mais baratos nos circuitos finais. A desvantagem, no entanto, é a perda total de seletividade: em caso de curto-circuito, ambos os disjuntores atuarão, desligando uma seção inteira da instalação.⁹ A escolha entre priorizar a seletividade (máxima continuidade) ou o cascadeamento (menor custo) é uma decisão fundamental na arquitetura do sistema elétrico.

Seção 5: O Futuro da Proteção de Motores: Relés Inteligentes e Manutenção Preditiva 4.0

A proteção de motores está passando por uma transformação profunda, impulsionada pela digitalização e pela Indústria 4.0. Os dispositivos de proteção estão evoluindo de componentes passivos e isolados para nós inteligentes e comunicantes em uma rede de gestão de ativos. Esta seção explora a vanguarda dessa tecnologia.

5.1. Funcionalidades Avançadas dos Relés Inteligentes

Os relés inteligentes, como o SRW01 da WEG ou o SIMOCODE da Siemens, são muito mais do que simples protetores. Eles são gerenciadores de motores de baixa tensão.²⁹

5.1.1. Além da Proteção

Esses dispositivos integram, em um único hardware programável, um conjunto abrangente de funções de proteção que antes exigiriam múltiplos componentes: proteção contra sobrecarga (com classes de disparo ajustáveis), falta e desbalanceamento de fase, subtensão, sobretensão, e até mesmo proteção contra falha à terra.⁷

5.1.2. Monitoramento Remoto, Diagnóstico e Comunicação

A verdadeira revolução dos relés inteligentes está em sua capacidade de coletar e comunicar dados. Eles monitoram continuamente dezenas de variáveis operacionais em tempo real, como a corrente em cada fase, tensão, fator de potência, consumo de energia e a temperatura do motor (via sensores Pt100).⁷ Através de protocolos de rede industrial (como Profibus, Modbus ou Profinet), esses dados são disponibilizados para sistemas de supervisão (SCADA) ou para a nuvem. Isso permite que engenheiros e operadores monitorem a "saúde" de centenas de motores a partir de uma sala de controle central, realizem diagnósticos remotos e ajustem parâmetros de proteção sem a necessidade de ir a campo, aumentando drasticamente a eficiência

operacional e a segurança.⁷

5.1.3. Gestão de Energia e Otimização da Eficiência

Ao monitorar o consumo de energia e o fator de potência, os relés inteligentes tornam-se ferramentas valiosas para a gestão energética. Eles podem ajudar a identificar motores subdimensionados ou superdimensionados, detectar operações ineficientes e fornecer os dados necessários para justificar projetos de otimização energética, alinhando a operação industrial com metas de sustentabilidade e redução de custos.⁷

5.2. Integrando a Proteção à Manutenção Preditiva (PdM)

A maior contribuição dos relés inteligentes é a sua capacidade de habilitar a manutenção preditiva (PdM) em larga escala. A PdM é uma filosofia de manutenção que utiliza a análise de dados para prever falhas antes que elas ocorram, permitindo que as intervenções sejam planejadas e proativas, em vez de reativas e emergenciais.¹⁰

5.2.1. O Relé Inteligente como Sensor de PdM

Tradicionalmente, a PdM para motores dependia de técnicas como a análise de vibração ou termografia, que exigem especialistas e equipamentos portáteis para medições periódicas.¹⁰ O relé inteligente democratiza a PdM ao atuar como um sensor de baixo custo que monitora a saúde do motor de forma contínua e automatizada, 24 horas por dia, 7 dias por semana.

Os dados coletados pelo relé — como tendências de aumento na corrente, variações de temperatura, ou aumento no número de partidas — são insumos valiosos para algoritmos de machine learning e plataformas de análise.⁷ Por exemplo, um aumento lento e constante na corrente de operação de um motor que aciona uma bomba pode

indicar o desgaste progressivo de um rolamento ou o início de um processo de cavitação, muito antes que a vibração se torne crítica ou que a falha ocorra.²

5.2.2. Redução de Downtime e Otimização de Custos (OPEX)

A capacidade de prever falhas transforma a gestão da manutenção. Paradas não planejadas, que podem custar em média até 9.000 dólares por minuto em algumas indústrias, são substituídas por intervenções planejadas, mais curtas e mais baratas.¹⁰ A manutenção preditiva, habilitada pelos dados dos relés inteligentes, permite que as equipes de manutenção atuem de forma cirúrgica, no momento certo, maximizando a vida útil dos componentes e a disponibilidade geral da planta. O relé de proteção, portanto, deixa de ser apenas um centro de custo de segurança e torna-se um centro de lucro, gerando retorno sobre o investimento através da otimização do OPEX.

Conclusão e Recomendações

A proteção de motores elétricos de baixa tensão evoluiu de uma disciplina focada em evitar a queima de equipamentos para se tornar uma função estratégica na gestão de ativos industriais. A análise detalhada demonstra que a escolha correta da proteção não apenas garante a segurança e a integridade do motor, mas também impacta diretamente a confiabilidade, a eficiência e a lucratividade de toda a operação. A compreensão das causas de falha, dos princípios de funcionamento dos dispositivos e dos conceitos de coordenação é a base para qualquer projeto robusto. A ascensão dos relés inteligentes representa a fronteira dessa evolução, transformando a proteção em uma fonte de dados valiosos para a otimização de processos e a manutenção preditiva.

Com base nesta análise abrangente, as seguintes recomendações são propostas:

1. **Adote uma Abordagem Holística:** A proteção não deve ser dimensionada olhando apenas para a placa do motor. É fundamental analisar as características da carga (principalmente a inércia e o tempo de partida), as condições do ambiente de instalação e, acima de tudo, a criticidade do processo que o motor aciona. Uma proteção bem-sucedida é aquela que protege o motor sem

prejudicar a aplicação.

2. **Priorize a Coordenação Certificada:** A segurança e a confiabilidade de uma partida de motor dependem da interação testada e comprovada entre seus componentes. Utilize sempre as tabelas de coordenação fornecidas pelos fabricantes. A decisão entre a coordenação Tipo 1 e Tipo 2 deve ser um exercício de análise de risco e de negócio, ponderando o custo inicial (CAPEX) contra o custo potencial de uma parada não planejada (OPEX).
3. **Invista em Inteligência para Ativos Críticos:** Para motores que operam em gargalos de produção ou em aplicações de alta responsabilidade, o investimento em relés inteligentes oferece um retorno claro e rápido. Os benefícios obtidos com a redução do downtime, o diagnóstico remoto e a habilitação da manutenção preditiva superam em muito o custo adicional do dispositivo. O relé inteligente deve ser visto não como uma despesa, mas como um investimento em dados, confiabilidade e inteligência operacional.
4. **Capacite a Equipe de Manutenção:** Promova uma cultura que vá além da simples troca de componentes defeituosos. Treine as equipes técnicas para utilizar ferramentas de diagnóstico, como a análise de padrões de queima de enrolamentos, e para interpretar os dados e alarmes gerados pelos sistemas de proteção inteligentes. Capacitá-los a realizar análises de causa-raiz é o passo mais eficaz para eliminar falhas recorrentes e construir uma operação industrial verdadeiramente resiliente e eficiente.

Referências citadas

1. GUIA DE ESPECIFICAÇÃO MOTORES ELÉTRICOS - WEG, acessado em junho 14, 2025,
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>
2. O que pode causar falha no motor elétrico: conheça 10 falhas mais comuns - Tractian, acessado em junho 14, 2025,
<https://tractian.com/blog/falhas-em-motores-eletricos-conheca-as-10-causas-mais-comuns-e-como-evita-las>
3. Relés de sobrecarga térmica: tudo o que você precisa saber ..., acessado em junho 14, 2025,
<https://www.oohmage.com/pt/thermal-overload-relays-all-you-need-to-know/>
4. Fusíveis aR e gL/gG Tipo NH Contato Faca e Flush End - WEG, acessado em junho 14, 2025,
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0a/h63/WEG-fusiveis-ar-e-gl-gg-50009817-catalogo-portugues-br-dc.pdf>
5. Disjuntor motor: principais aplicações - ABB Loja Online | Mais Perto ..., acessado em junho 14, 2025,
<https://loja.br.abb.com/blog/post/disjuntor-motor-principais-aplicacoes>

6. MPW – Disjuntores-motores | WEG, acessado em junho 14, 2025,
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h1b/h43/WEG-disjuntores-motores-linha-mpw-50009822-catalogo-portugues-br-dc.pdf>
7. Benefits of Using Smart Motor Protection Relays in Industrial ... - Acrel, acessado em junho 14, 2025,
<https://www.acrelenergy.com/smart-motor-protection-relays-in-industrial-applications.html>
8. Coordenação de Partidas de Motores - Quizgecko, acessado em junho 14, 2025,
<https://quizgecko.com/learn/coordenacao-de-partidas-de-motores-eiflu4>
9. Manobra e Proteção de Motores e Circuitos Elétricos | WEG, acessado em junho 14, 2025,
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6d/h3a/WEG-manobra-e-protecao-de-motores-e-circuitos-eletricos-50107619-pt.pdf>
10. %página%%%página - ALL-TEST Pro, acessado em junho 14, 2025,
<https://alltestpro.com/pt-br/manutencao-preditiva-de-motores-electricos-o-que-e-e-porque-e-usado/>
11. Tabela de características da queima e possíveis causas - PCA, acessado em junho 14, 2025,
<https://www.pcapreditiva.com.br/pdf/danos-em-enrolamentos-trifasico.pdf>
12. Conheça os 5 Riscos de Manter Motores Elétricos Antigos - Leonardo Energy Brasil, acessado em junho 14, 2025,
<https://leonardo-energy.org.br/noticias/conheca-os-5-riscos-de-manter-motores-eletricos-antigos/>
13. Relé falta de fase – O que é e como funciona! - Mundo da Elétrica, acessado em junho 14, 2025,
<https://www.mundodaeletrica.com.br/rele-falta-de-fase-o-que-e-como-funcional/>
14. O que é dispositivo de proteção de motor - Eletricista Adriano, acessado em junho 14, 2025,
<https://eletricistaadriano.com.br/glossario/o-que-e-dispositivo-de-protecao-de-motor/>
15. Como funciona a proteção contra subtensão? Um Guia Abrangente, acessado em junho 14, 2025,
<https://www.tosunlux.eu/pt/blog/how-does-under-voltage-protection-work/>
16. Danos em Enrolamentos - WEG, acessado em junho 14, 2025,
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0b/hbf/WEG-danos-em-enrolamentos-motores-trifasicos-50009255-brochure-portuguese-web.pdf>
17. Desvendando o Mistério por Trás do Relé Térmico: O Guardião da ..., acessado em junho 14, 2025,
<https://starkelectric.com.br/2023/09/26/desvendando-o-misterio-por-tras-do-rele-termico-o-guardiao-da-seguranca-eletrica/>
18. O que é relé de sobrecorrente? Princípio de funcionamento e uso, acessado em junho 14, 2025,
<https://www.geya.net/pt/what-is-over-current-relay-working-principle-and-use/>
19. fusíveis | IEC | DIN | NF | BS | engrenagens do fusível ... - MERSEN, acessado em

- junho 14, 2025,
<https://www.mersen.com.br/pt-br/produtos/protecao-eletrica-e-controle/fusiveis-e-bases-de-baixa-tensao-norma-iec>
20. O que é fusível e quais suas categorias? | ElectroMoitense, acessado em junho 14, 2025,
<https://electromoitense.pt/wp-content/uploads/2018/06/O-que-%C3%A9-fus%C3%ADvel-e-quais-suas-categorias.pdf>
 21. Entenda o Funcionamento do Disjuntor Motor e Como Escolher o ..., acessado em junho 14, 2025,
<https://tron-ce.com.br/entenda-o-funcionamento-do-disjuntor-motor-e-como-escolher-o-melhor-para-sua-aplicacao/>
 22. NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão - UFPR, acessado em junho 14, 2025,
<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM249/Material%20de%20aula/NBR5410%20-%20Instala%E7%F5es%20El%E9tricas%20de%20Baixa%20Tens%E3o.pdf>
 23. O que é classe de disparo da proteção de sobre carga dos ..., acessado em junho 14, 2025, <https://www.se.com/br/pt/faqs/FA403051/>
 24. APRENDA A DIMENSIONAR O RELÉ TÉRMICO DO MOTOR - YouTube, acessado em junho 14, 2025, <https://www.youtube.com/shorts/8VlvZpmRuTw>
 25. ABNT NBR 5410, acessado em junho 14, 2025,
<https://docente.ifrn.edu.br/jeangaldino/disciplinas/2015.1/instalacoes-eletricas/nbr-5410>
 26. ABNT NBR - 17094-1, acessado em junho 14, 2025,
<https://www2.uesb.br/biblioteca/wp-content/uploads/2022/03/NBR-17094-M%C3%81QUINAS-EL%C3%89TRICAS-GIRANTES-PARTE-1-MOTORES-DE-INDU%C3%87%C3%83O-TRIF%C3%81SICOS-REQUESITOS.pdf>
 27. ABNT NBR 17094-1 - CURSO E COMENTADA NBR17094-1 - Target Normas, acessado em junho 14, 2025,
<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/12725/abnt-nbr17094-1-curso-e-comentada-o-curso-protecao-de-motores-de-baixa-tensao-ministrado-pelo-professor-dr-jose-ernani-da-silva-e-apresentado-de-forma-inovadora-e-inclui-20-modulos-com-comentarios-escritos-dezenas-de-minutos-de-videos-online-e-a-norma>
 28. Capítulo III Dispositivos de proteção – Parte 1 - O Setor Elétrico, acessado em junho 14, 2025,
https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/05/Ed50_marco_protacao_seletividade_capIII.pdf
 29. Relés Inteligentes | WEG - Produtos, acessado em junho 14, 2025,
https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Control-e-Industrial/Controls/Partida-e-Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Motores/Rel%C3%A9s-Inteligentes/c/BR_WDC_SMARTRELAYS
 30. SIMOCODE PRO - O relé inteligente Siemens - Siemens BR, acessado em junho 14, 2025,
<https://www.siemens.com/br/pt/empresa/stories/energia/control-e-protecao-eletrica/simocode-pro-o-rele-inteligente-siemens.html>