

Projeto de Graduação



06/Dezembro/2013

ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL

Tallita da Cunha de Souza



www.ele.puc-rio.br



ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL

Aluna: Tallita da Cunha de Souza

Orientador: Mauro Schwanke da Silva

Coorientador: Juan Lourenço Fandino Landeira

Agradecimentos

Expresso meus agradecimentos à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro por ter proporcionado a oportunidade de evolução pessoal e acadêmica.

Aos meus pais, Regina e Luiz Mauro, pelo exemplo de vida e pelos inúmeros sacrifícios realizados pela formação das filhas.

A todos os amigos irmãos da Paróquia Santa Clara de Assis, pela amizade e compreensão.

A todos que aceitaram minha ausência durante todos esses anos de dedicação à graduação, em especial à minha irmã, Juliana, que esteve todo o tempo longe fisicamente, mas perto do meu coração, me dando coragem de continuar.

A Lucas por toda a amizade, companheirismo e compreensão em todos os momentos.

Ao professor, orientador, chefe e amigo Juan Landeira, pela dedicação ao meu aprendizado, pelo incentivo, apoio, diretrizes e orientação durante este trabalho e em tantas outras situações.

Ao professor Mauro Schwanke pelo apoio, disponibilidade e por tantas vezes ter uma ou várias palavras de inspiração.

Ao professor Eduardo Pires de Souza, pelo profissionalismo e dedicação na transmissão de conhecimentos, e que além de competente professor, mostrou-se tão apaixonado pela Engenharia Elétrica que fez com que meus olhos brilhassem junto aos seus quando falava sobre ela.

À comunidade de profissionais da Promon, por terem sido muito importantes na minha formação profissional, por terem me abraçado carinhosamente, me acolhido e se disposto a me ensinar tudo que sabem. Em especial à Equipe da disciplina Elétrica.

Aos amigos me acompanharam por todos estes anos na PUC, Victor, Felipe, Jéssica, Francine, Paulo, Allyson, Leonardo, Fabiana, Cirus e Helena, pois sem eles nada disso seria possível.

Agradeço principalmente a Deus, senhor da minha história. Minha inspiração e força.

Resumo

O projeto apresentado tem como objetivo a elaboração de um estudo de coordenação e seletividade do sistema elétrico de uma unidade de uma refinaria de petróleo. Ele consiste em definir os ajustes dos dispositivos de proteção pré-definidos, com auxílio dos dados nominais e curvas de dano dos equipamentos elétricos a partir de gráficos "tempo *versus* corrente" fornecidas pelo software PTW (Power Tools for Windows).

Este trabalho foi desenvolvido em duas etapas. Inicialmente os conceitos básicos sobre dispositivos de proteção, equipamentos elétricos e as prováveis falhas que podem ocorrer em tais, são introduzidos. Já na segunda metade é realizado um estudo de caso que representa um sistema industrial real, com seus níveis de curto-circuito máximos utilizados como premissas. Ajustes para ramos típicos são calculados e por fim, são apresentados, através de gráficos, os resultados obtidos na realização do projeto, percebendo assim que o sistema ficou seletivo e o objetivo foi alcançado.

Palavras-chave: proteção de sistemas elétricos, coordenação e seletividade, estudos elétricos, curto-circuito.

Sumário

Agradecimentos	III
Resumo.....	IV
Lista de Figuras.....	VII
Lista de Tabelas	IX
1. Introdução	9
1.1. Motivação.....	10
1.2. Objetivos.....	11
1.3. Organização do trabalho.....	11
2. Dispositivos de Proteção.....	13
2.1. Transformador de corrente.....	13
2.2. Transformador de potencial.....	14
2.3. Fusível.....	15
2.4. Disjuntor.....	17
2.5. Relé.....	18
2.6. Relé Inteligente.....	19
2.7. IED – Intelligent Electronic Device	20
2.8. Classes de Coordenação da Proteção	22
2.8.1. Coordenação tipo 1.....	22
2.8.2. Coordenação tipo 2.....	22
2.8.3. Coordenação Total.....	22
3. Proteção de Equipamentos Elétricos.....	24
3.1. Motores de Indução.....	24
3.1.1. Falhas ligadas à carga tracionada.....	27
3.1.2. Falhas da alimentação.....	28
3.1.3. Falhas internas no motor.....	29

3.1.4.	Tabela de ajustes para as funções ANSI de proteção para motores de indução	30
3.2.	Proteção de Transformadores.....	31
3.2.1.	Falhas e proteções específicas.....	32
3.2.2.	Tabela de ajustes para as funções ANSI de proteção para transformadores.....	34
3.3.	Proteção de Cargas não motóricas e cabos elétricos	35
4.	Estudo de Caso.....	36
4.1.	Descrição da Planta.....	36
4.2.	Premissas.....	37
4.3.	Resultados	38
4.3.1.	Transformador TF-2100001A/B – 34,5/4,16kV	39
4.3.2.	Alimentação de barra em 34,5kV.....	42
4.3.3.	Saída da barra PN-2100001A e primário do TF – 2100001A/B.....	44
4.3.4.	Alimentação de barra em 4,16kV e secundário do TF-2100001A	47
4.3.5.	Alimentação de barra em 4,16kV e alimentação de motor e alimentação de conversor de frequência	49
4.3.6.	Alimentação de CDC em 480V e conversor de frequência	52
4.3.7.	Alimentação de CCM, alimentação de motor e conversor de frequência..	54
5.	Conclusões	57
5.1.	Trabalho futuros.....	57
	Referências Bibliográficas	58
	Anexo.....	9

Lista de Figuras

Figura 2. 1 : Transformador de Corrente - Tipo toroidal e de janela	14
Figura 2. 2: Transformador de Potencial.....	14
Figura 2. 3: Disjuntor Ultra-rápido - Bussman.....	15
Figura 2. 4: Curvas tempo x corrente - Fusível Ultra-rápido.....	16
Figura 2. 5: Curva tempo x corrente - Fusível Retardado.....	16
Figura 2. 6: Disjuntor Power Breaker e disjuntor de caixa moldada.....	17
Figura 2. 7: Evolução dos Relés ao longo dos anos	18
Figura 2. 8: Esquema TP/TC - Relé - Disjuntor	19
Figura 2. 9: Rede PROFIBUS DP com Relés inteligentes.....	20
Figura 2. 10: IED RET630 - ABB.....	21
Figura 3. 1: Estrutura do Capítulo 3.....	24
Figura 3. 2: Curva tempo x corrente típica de um motor	26
Figura 4. 1: Alimentação do sistema em 34,5kV	42
Figura 4. 2: Curva tempo x corrente para alimentação do sistema em 34,5kV	43
Figura 4. 3: Alimentação do PN-2100001A/B em 34,5 e saída para o TF-2100001A	44
Figura 4. 4: Curva tempo x corrente para a coordenação da proteção da alimentação em 34,5 e do TF-2100001A	46
Figura 4. 5: Alimentação do PN-2100002A em 4,16kV	47
Figura 4. 6: Proteção do Secundário do TF-2100001A e entrada do PN-2100002	48
Figura 4. 7: Alimentação do PN-2100002 e saída para motor e conversor.....	49

Figura 4. 8: Curva tempo x corrente da coordenação da proteção da alimentação do PN-2100002 e do motor	50
Figura 4. 9: Curva tempo x corrente da alimentação do PN-2100002 e do conversor	51
Figura 4. 10: Alimentação de CDC e saída para conversor de frequência	52
Figura 4. 11: Curva tempo x corrente para alimentação de CDC e para conversor de frequência	53
Figura 4. 12: Alimentação de CCM, motor e conversor.	54
Figura 4. 13: Curva tempo x corrente da alimentação de CCM, motor e conversor..	56

Lista de Tabelas

Tabela 3. 1: Tipos de falhas em motores	27
Tabela 3. 2: Ajustes de proteção para motores de indução	30
Tabela 3. 3: Ajustes de proteção para transformadores.....	34
Tabela 4. 1: Valores de curto-circuitos máximos e mínimos para curto trifásico.....	38

1. Introdução

Em um projeto de engenharia - independente da atividade fim da planta e do ramo de atuação do proprietário da mesma - o time de profissionais de engenharia elétrica tem a responsabilidade de desenvolver um sistema elétrico que, além de atender as especificações do cliente, seja o mais confiável, seguro e econômico possível.

Nesse contexto, o objetivo primário da disciplina é aprovisionar em energia as cargas elétricas, de acordo com suas especificidades, definidas pelas outras disciplinas de interface, tais quais processos, equipamentos rotativos, manuseio de sólidos, instrumentação, etc.

A experiência empírica de profissionais do setor e extensa bibliografia de entidades internacionais tais como o IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) e o Cigré (Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica) demonstram que sistemas elétricos estão constantemente sujeitos a perturbações e anomalias, sejam elas causadas por fatores externos ou internos, de forma proposital ou não. Desta forma, especial atenção é dispensada a esses fenômenos desde a fase inicial do projeto do sistema elétrico de qualquer empreendimento.

Embora, como mencionado anteriormente, durante todo o ciclo de vida de um projeto de engenharia elétrica assuntos como nível de curto-circuito nos barramentos, sobrecarga e classificação de painéis em relação ao arco elétrico venham à tona, na fase na qual são desenvolvidos os estudos elétricos eles se tornam ainda mais palpáveis e relevantes.

De fato, nesta fase do projeto de uma instalação elétrica de médio/grande porte, os efeitos das perturbações do sistema podem ser calculados e o dimensionamento dos equipamentos validado. Dentre os vários estudos elétricos, o estudo de coordenação e seletividade da proteção se mostra importante pelos seguintes motivos:

- Interdependência com os demais estudos elétricos. No desenvolvimento deste memorial de cálculo, o engenheiro responsável utiliza os resultados dos estudos de curto-circuito, fluxo de potência e energia incidente, por exemplo, para estabelecer suas premissas e alcançar seus objetivos.
- Status da informação utilizada. Normalmente o estudo de coordenação e seletividade é um dos últimos documentos da disciplina de elétrica a ser emitido. Isso se deve ao fato de as informações necessárias para seu desenvolvimento possuírem caráter "final", sendo suficientemente maduras para garantir que os ajustes dos dispositivos de proteção sejam calculados exatamente para os equipamentos empregados nos painéis e no campo.

Desta forma, após a emissão do estudo, já não são mais esperadas mudanças drásticas nem nos painéis, nem nas cargas atendidas por estes.

- Relevância para a energização da subestação. Muitos contratos colocam formalmente a necessidade da aprovação do estudo de coordenação e seletividade como pré-requisito para a energização da subestação após o comissionamento da mesma. De qualquer maneira, seja ela tácita ou não, a aprovação desse estudo em particular é uma condição necessária e não suficiente para que os equipamentos elétricos da subestação sejam postos em funcionamento.

Imerso nesse contexto, o principal objetivo do estudo de coordenação e seletividade é definir os ajustes dos dispositivos de proteção de forma a manter a segurança dos operadores, a preservação dos

equipamentos da instalação, mantendo a área afetada pela anomalia do sistema a menor possível, maximizando o tempo de continuidade do serviço.

Uma vez cumprido o objetivo do estudo em questão, o sistema elétrico, através de seus equipamentos será capaz de:

- Isolar a parte defeituosa, visando manter a maior continuidade de serviço possível;
- Fazer o isolamento no menor tempo possível e coordenar os dispositivos de proteção de forma que o(s) equipamento(s) de interrupção mais próximo(s) do ponto de defeito seja(m) o(s) primeiro(s) a operar(em), visando o mínimo de danos à instalação;
- Distinguir entre sobrecorrentes provenientes de falhas e aquelas inerentes aos equipamentos, tais como correntes de partida de motores e correntes de magnetização de transformadores, por exemplo.

Para fazer a coordenação dos equipamentos é comumente utilizado o método gráfico que consiste em plotar, de forma ordenada e segundo regras preestabelecidas, num plano tempo x corrente, as curvas dos dispositivos de proteção, dos equipamentos a serem protegidos e de níveis de curto-circuito do sistema.

Visto que, em situações normais, o estudo de coordenação e seletividade se situa no final do ciclo de vida de um projeto, os seguintes documentos de engenharia servem como documentos de referência para a execução deste memorial, tendo quase que de forma obrigatória precedência de emissão em relação a este:

- Memorial Descritivo da Instalação: define quais os tipos de equipamento devem ser utilizados e o conceito geral dos critérios de projeto para o sistema a ser desenvolvido, como por exemplo, as funções de proteção que serão utilizadas em cada circuito típico da planta a ser projetada.
- Lista de Cargas: mostra o arranjo geral das cargas nos painéis e suas características elétricas, bem como, quando aplicável, as diferentes condições operativas da planta sob análise.
- Folha de Dados de Equipamentos: definem todas as características dos equipamentos a serem considerados no estudo, como por exemplo, o tempo de partida e de rotor bloqueado para os motores.
- Diagramas Unifilares, Lógicos e Funcionais: apresentam os dispositivos de proteção e sua forma de atuação para cada tipo de carga em particular.
- Outros estudos elétricos como já mencionado anteriormente.

1.1. Motivação

Como pôde ser observado na seção anterior, o estudo de coordenação e seletividade envolve grande parte dos documentos de engenharia de um projeto, evidenciando dessa forma sua relevância e complexidade. Assim sendo, o desafio de compreender as interfaces entre as disciplinas e a origem das informações para a execução do estudo é, por si só, um motivador.

Tendo em vista que a maioria dos critérios de projeto não define claramente as premissas a serem adotadas no estudo, este trabalho de conclusão de curso tem como motivação ainda, compreender o assunto de proteção, coordenação e seletividade, além do método para o cálculo dos ajustes e os funcionamentos dispositivos envolvidos.

Outro ponto a destacar é a oportunidade de utilizar uma das ferramentas mais eficazes e reconhecidas no mercado de engenharia, o PTW (*Power Tools for Windows*), software desenvolvido pela *SKM Systems*, que se propõe a oferecer a interface gráfica e a modelagem dos equipamentos necessária para a elaboração do estudo.

1.2. Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Apresentar uma breve introdução sobre os equipamentos utilizados na proteção de circuitos em um sistema elétrico industrial;
- Compreender os fenômenos físicos das anomalias associadas aos principais equipamentos de uma planta industrial, e com base na literatura e no conhecimento técnico da área de projetos, calcular os ajustes dos dispositivos de proteção para cubículos/gavetas típicas de CDC¹/ CCM² através de um estudo de caso;
- Ainda neste estudo de caso, criar diagramas típicos de proteção e seletividade, através do software PTW, para diversos tipos de cargas instaladas tais quais transformadores, conversores de frequência, motores de indução, etc.

1.3. Organização do trabalho

No capítulo 1 foi apresentada a introdução do TCC, bem como as motivações para a escolha do tema e seus objetivos. Nele estão registradas a relevância e a forma de como o estudo de coordenação e seletividade se insere no ciclo de vida de um projeto de um sistema elétrico industrial, além dos documentos de referência para sua execução.

O capítulo 2 é dedicado a apresentar os dispositivos de proteção normalmente utilizados em sistemas elétricos industriais, tais como relés, transformadores de instrumentos, dispositivos de manobra e proteção passiva. O objetivo deste capítulo é oferecer ao leitor, de forma breve, um resumo do funcionamento desses equipamentos que servem de base para a compreensão dos capítulos subsequentes.

¹ CDC – Centro de Distribuição de Cargas. São painéis de média ou baixa tensão compartimentados em cubículos. Atendem, geralmente, cargas com mais de 150 kW.

² CCM – Centro de Controle de Motores. São painéis de baixa tensão destinados a alimentar cargas menores que aquelas atendidas pelo CDC. Sua compartimentação é dada em gavetas e os painéis apresentam, geralmente, barramento único interno.

Por sua vez, no capítulo 3 são explorados os tipos de falhas por equipamento (transformadores, motores de indução) e os tipos de cargas não motóricas em geral, bem como a forma de detecção da anomalia, além das alternativas empregadas de forma a mitigar seus efeitos. Por fim, são definidas as premissas a serem utilizadas no método de cálculo com a intenção de ajustar os dispositivos de proteção.

Já no capítulo 4 é realizado um estudo de caso através de um sistema industrial no qual as premissas e as definições dos capítulos anteriores são aplicadas alcançando, finalmente, o objetivo do TCC e do estudo de coordenação e seletividade. Neste capítulo, ainda são apresentadas as curvas tempo x corrente para cada caso específico de acordo com os circuitos típicos do tópico anterior.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões do TCC, indicando ainda trabalhos futuros que podem ser realizados em temas correlatos.

2. Dispositivos de Proteção

Com o objetivo de garantir a integridade dos equipamentos que compõem uma planta industrial, vários dispositivos de proteção são utilizados para resguardar que problemas como sobrecorrentes, sobretensões e perturbações em geral possam causar danos ao sistema e a seus operadores principalmente. A adequada utilização, o posicionamento e os ajustes de cada um destes dispositivos são importantes para garantir a eficácia da proteção.

Neste sentido, este capítulo tem como objetivo dar foco aos dispositivos de proteção que são comumente encontrados em sistemas elétricos industriais, tais como fusíveis, disjuntores, transformadores de instrumentos e relés.

É importante observar que dispositivos como fusíveis e disjuntores são conectados diretamente à rede que está sendo protegida, ao contrário dos relés digitais e IEDs, que necessitam de transformadores que transformem as grandezas – tensão e corrente – dos circuitos protegidos em grandezas que possam ser lidas com segurança e com a melhor precisão possível.

Cada um destes dispositivos apresenta características, tanto construtivas como operativas, que os diferenciam. Por conta disso, uma breve descrição sobre o princípio de funcionamento de cada um deles é apresentada nas seções seguintes. Ao final do capítulo, também é feito um breve comentário sobre os tipos de coordenação da proteção existentes segundo as normas técnicas. Esses tipos de classificação são importantes uma vez que definem o grau de precisão, confiabilidade e continuidade da proteção e operação.

2.1. Transformador de corrente

Transformadores de corrente – TCs – são dispositivos que permitem aos instrumentos de medição e proteção o funcionamento adequado sem a necessidade de correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito ao qual estão ligados. Na sua forma mais simples, eles reproduzem no seu circuito secundário a corrente que circula em um enrolamento primário com sua posição vetorial substancialmente mantida, em uma proporção definida, conhecida e adequada.

As correntes nominais secundárias geralmente são padronizadas em 5A. Em alguns casos, quando os aparelhos – em geral relés – são instalados a certa distância dos TCs, pode-se utilizar a corrente secundária de 1A com o propósito de diminuir a queda de tensão nos circuitos.

Em outras palavras, o transformador de corrente tem como objetivo evitar conexões diretas entre os relés e o circuito de alta tensão e também adaptar grandezas existentes no circuito com grandezas compatíveis com a dos relés nele acoplados [1]. As relações de transformação são definidas pela NBR 6856 da ABNT, assim como o método de cálculo para dimensionar o equipamento. Normalmente, é de responsabilidade do fabricante dos painéis apresentar o memorial de cálculo a propósito do dimensionamento desses dispositivos. Por esta razão, no estudo de caso deste TCC, a relação e classe de exatidão dos TCs serão consideradas como estabelecidas pelos fabricantes dos painéis, sendo, portanto, parte das premissas a serem posteriormente detalhadas.

A figura 2.1 a seguir apresenta dois tipos de transformadores de corrente. Nos dois casos, o condutor, por onde flui a corrente a ser transformada, passa através do dispositivo. Esta corrente induz outra corrente em seus enrolamentos secundários.



Figura 2. 1 : Transformador de Corrente - Tipo toroidal e de janela

2.2. Transformador de potencial

Transformadores de Potencial são, de modo geral, transformadores convencionais com alta regulação. Eles são dispositivos que permitem aos instrumentos de medição e proteção o funcionamento adequado sem a necessidade de tensão de isolamento correspondente à rede à qual estão conectados.

Em sua forma mais simples, os transformadores de potencial possuem um enrolamento primário, de muitas espiras, e um enrolamento secundário, através do qual se obtém a tensão requerida. Assim, os instrumentos de proteção e medição são dimensionados em tamanhos reduzidos com bobinas e demais componentes de baixa isolamento. As relações do transformador são determinadas pelo sistema de tensão ao qual ele está conectado e ao modo como isso se dá – fase-fase ou fase-neutro.

Da mesma forma que os transformadores de corrente, o dimensionamento dos transformadores de potencial são também de responsabilidade do fabricante, e serão tratados para fins do estudo de caso como premissas.

A Figura 2.2 ilustra o dispositivo.



Figura 2. 2: Transformador de Potencial

2.3. Fusível

O fusível é um dispositivo de proteção contra sobrecorrente que é caracterizado por um filamento ou placa metálica com um ponto de fusão baixo, tornando-o sensível às elevações na corrente, uma vez que, por efeito Joule, o filamento se funde e interrompe a circulação de corrente elétrica.

Um aspecto importante dos fusíveis são suas curvas de atuação, com características de tempo inversamente proporcionais à corrente elétrica, contendo uma faixa de imprecisão. Isto é, o fusível tem uma corrente máxima e mínima de fusão para cada tempo de atuação. Estas correntes são determinadas com a aplicação de uma variação de até 15% para mais ou para menos ao valor médio da corrente de atuação. A curva de mínimo (-15% da corrente média) é utilizada para se obter a máxima proteção do equipamento. Já a curva de máximo (+15% da corrente média) é utilizada na coordenação da proteção dos dispositivos à montante do fusível. O conhecimento dessa característica do equipamento é necessário para que, uma vez modelado o dispositivo no programa de simulação, os limites também sejam considerados.

Para citar alguns exemplos, existem dois tipos de fusíveis: os normais – rápidos ou retardados – e os ultra-rápidos, sendo o primeiro utilizado na proteção da maioria dos circuitos. A grande diferença entre os dois está no tempo de atuação. Enquanto os normais têm suas curvas tempo x corrente com característica temporizada, como podemos observar na Figura 2.4, os fusíveis ultra-rápidos comportam-se como um dispositivo de atuação instantânea – Figura 2.5.



Figura 2. 3: Disjuntor Ultra-rápido - Bussman

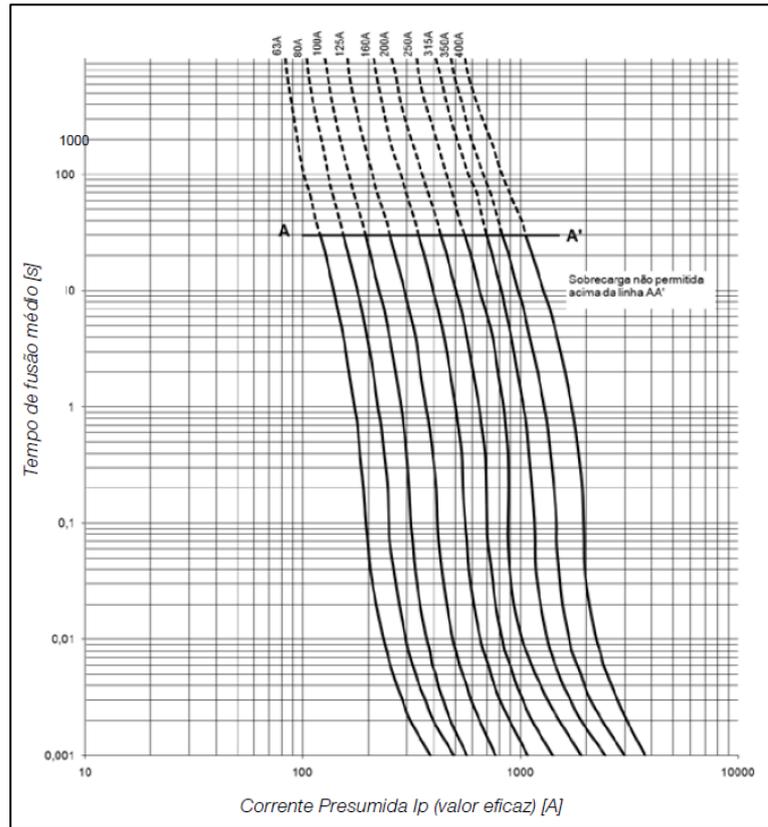


Figura 2. 4: Curvas tempo x corrente - Fusível Ultra-rápido

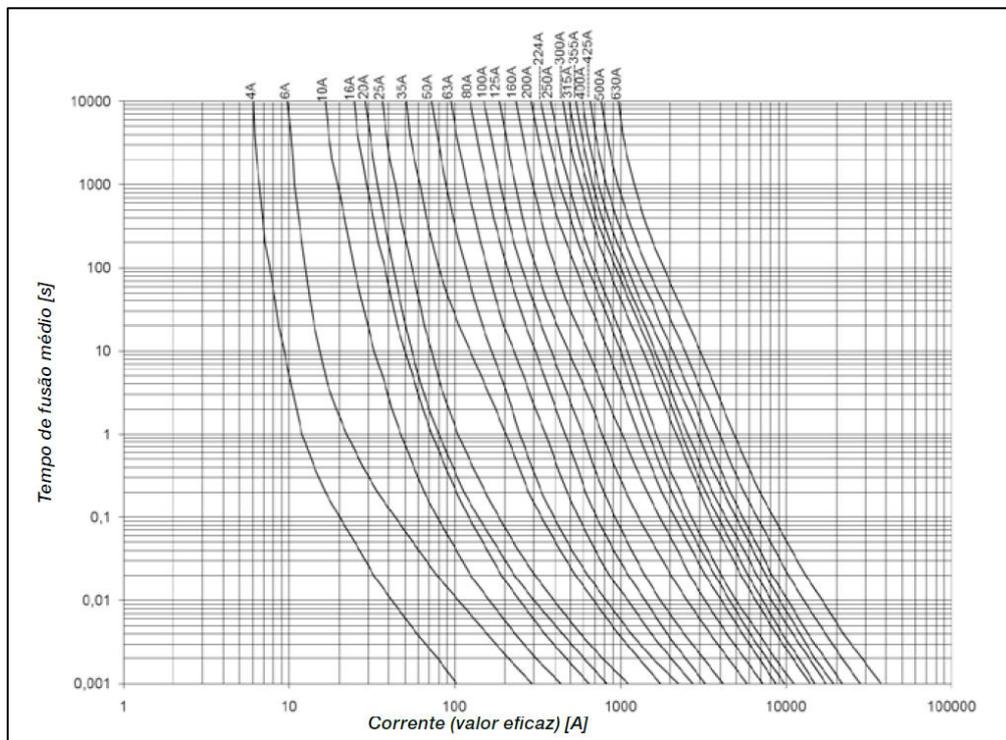


Figura 2. 5: Curva tempo x corrente - Fusível Retardado

2.4. Disjuntor

O disjuntor é um dispositivo eletromecânico, que funciona como um interruptor automático, destinado a proteger uma determinada instalação elétrica contra possíveis danos causados por curto-circuitos e sobrecargas elétricas. A sua função básica é a de interromper a passagem de uma corrente quando esta atinge valores anormais antes que os seus efeitos térmicos e mecânicos possam causar danos à instalação elétrica protegida.

Uma das principais características dos disjuntores é a capacidade que eles possuem de serem rearmados manualmente depois de interromperem a corrente em virtude da ocorrência de uma falha. Diferem, assim, dos fusíveis, que desempenham o mesmo papel no que diz respeito ao curto-circuito, mas que ficam inutilizados quando realizam a interrupção. Além de dispositivos de proteção, os disjuntores servem também de dispositivos de manobra, funcionando como interruptores normais que permitem isolar partes do sistema elétrico no qual estão instalados.

Em relação aos dispositivos de baixa tensão, a classificação mais comumente encontrada divide estes disjuntores em duas grandes classes: os disjuntores abertos (*Power Breakers* ou LVPCB – Low Voltage Power Circuit Breakers) e os disjuntores de caixa moldada (MCCB – *Molded Case Circuit Breakers*).

Os disjuntores de caixa moldada, como o próprio nome indica, são compostos por uma caixa isolante semelhante a uma unidade integral, que aloja internamente todos os componentes do disjuntor. Sua desvantagem é que qualquer problema interno a manutenção é muito difícil, necessitando por vezes a completa substituição do equipamento. Já os *Power Breakers*, como são abertos, permitem de forma mais natural o acesso às suas partes internas, sendo possível a manutenção individual de seus componentes caso haja a necessidade.



Figura 2. 6: Disjuntor Power Breaker e disjuntor de caixa moldada

Com relação à média tensão, outras opções de meios de interrupção do arco aparecem. Enquanto na baixa tensão os disjuntores à vácuo são a solução adotada na grande maioria dos casos, para tensões de interrupção maiores do que 15 kV soluções com gás SF₆³ ganham também relevância. De forma

³ Hexafluoreto de Enxofre

geral, disjuntores de média tensão são bem menos compactos do que os citados anteriormente e possuem correntes nominais e de interrupção também maiores.

É natural concluir, portanto, que estes dispositivos são também mais caros, já que oferecem mais contatos auxiliares e bobinas de abertura e fechamento individualizadas. No caso da baixa tensão, no entanto, esta não é uma funcionalidade geral.

2.5. Relé

Antigamente, os principais requisitos de um relé eram, principalmente, confiabilidade, seletividade, suportabilidade térmica, suportabilidade dinâmica, sensibilidade, velocidade, baixo consumo e baixo custo. Atualmente, com a utilização de relés eletrônicos, somado aos requisitos anteriores é desejável que os relés eles possuam ainda:

- Breaker failure – capacidade de, através da rede de comunicação, interromper um circuito quando um disjuntor à jusante (com maior prioridade seletiva) não consegue eliminar a falta;
- Autocheck – capacidade de informar para a rede que o relé está defeituoso;
- Seletividade lógica – capacidade de bloqueio, via rede, do disjuntor à montante quando uma falha for detectada;
- Oscilografia – Análise gráfica da tensão, frequência e corrente;
- Quantidade de entradas e saídas digitais (E/S digitais) adequadas;
- Quantidade de entradas analógicas de tensão e corrente adequadas;
- Possibilidade de se conectar em rede, através de diferentes protocolos de comunicação;
- Possibilidade de realizar funções de automação, comando, controle, medição, supervisão, etc.

A Figura 2.7 apresenta a evolução da tecnologia de relés ao decorrer dos anos. É possível constatar que, com o conseqüente avanço na área computacional verificado nas últimas décadas, o tamanho e o consumo de energia dos computadores (e microprocessadores) diminuíram enquanto a velocidade de processamento aumentou. Esta transformação foi decisiva para a implantação de relés digitais na proteção de sistemas de potência, diminuindo bastante o dimensionamento dos transformadores de instrumentos.

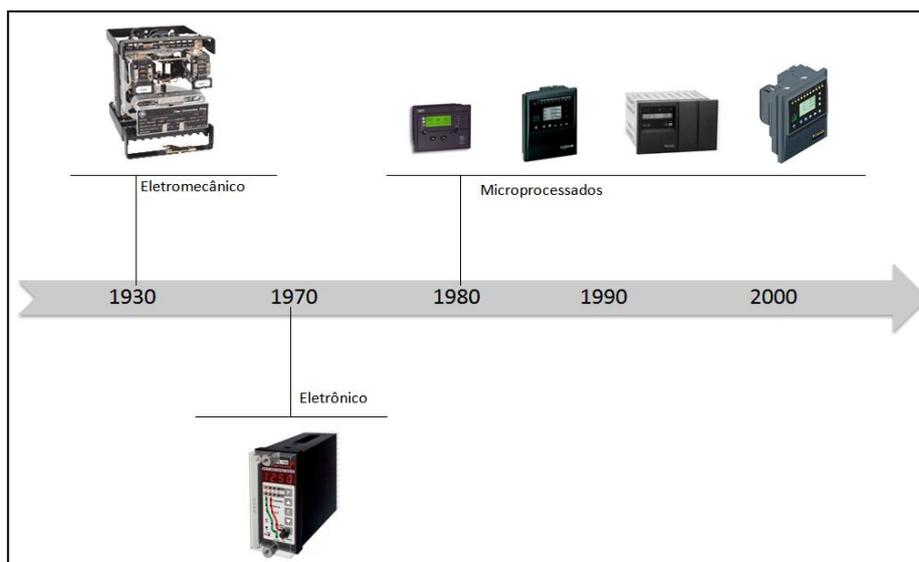


Figura 2. 7: Evolução dos Relés ao longo dos anos

Em simples palavras, os relés são dispositivos destinados a detectar quando uma grandeza de atuação atinge um determinado valor. Eles podem ser classificados quanto à grandeza de atuação (corrente, tensão, frequência), forma de conectar ao circuito (primário/secundário), forma construtiva (eletromecânicos, mecânicos, estáticos), temporização (temporizados e instantâneos), quanto à função (sobrecorrente, direcional, diferencial), característica de atuação (normal inverso, muito inverso, etc).

Basicamente, os relés têm a função de analisar os sinais de tensão e corrente da rede elétrica ou equipamento a ser protegido. Estes sinais são entregues por transformadores de instrumentos de forma adequada, para que este tome uma decisão rápida e segura de abrir ou não um dispositivo de interrupção (disjuntor, por exemplo) associado. Nota-se na Figura 2.8, de forma clara, a responsabilidade de cada dispositivo na proteção de circuitos de um sistema elétrico.

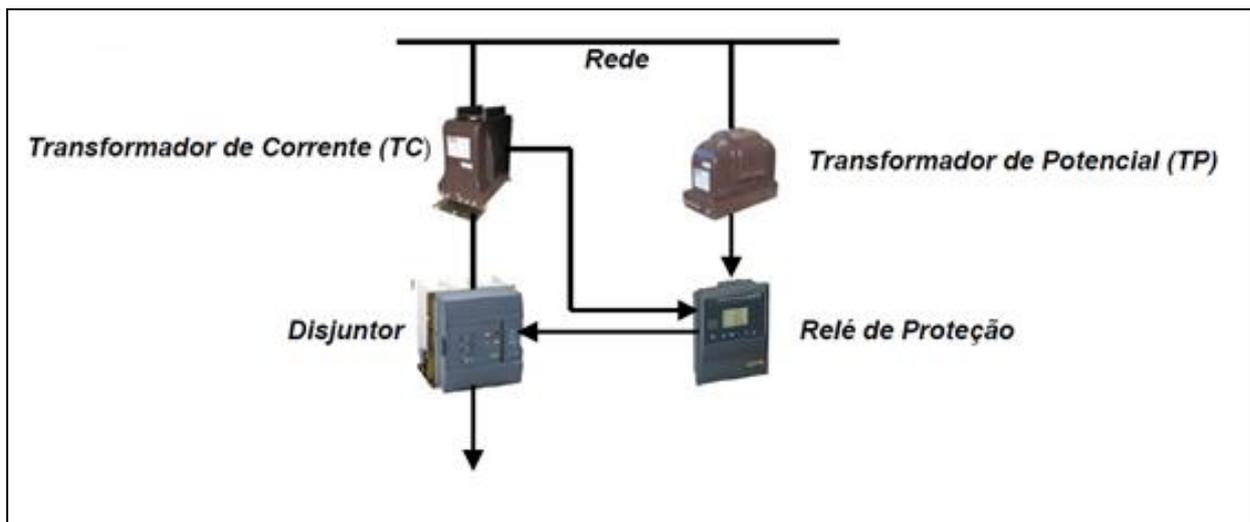


Figura 2. 8: Esquema TP/TC - Relé - Disjuntor

2.6. Relé Inteligente

De forma simples, o relé inteligente é um sistema de gerenciamento, flexível e modular, para motores de baixa tensão e velocidade constante. Ele otimiza a conexão entre o sistema de controle e a combinação de partida, aumenta a disponibilidade da planta e, ao mesmo tempo, proporciona significantes reduções de custos no que diz respeito ao planejamento, ao comissionamento e à operação do processo. Sua aplicação se encontra em painéis de baixa tensão (tipo CCM).

A grande vantagem do relé inteligente é a possibilidade que ele oferece de comandar, através das necessidades do processo da planta, a partida e a parada de motores. Essa propriedade é adquirida pelo fato de os relés inteligentes estarem conectados em rede e em comunicação com o sistema supervisório da planta.

Através dessa rede é possível, além do comando do motor, ter acesso à medições simples e outros dados relevantes para o controle e automação da planta industrial. O PROFIBUS DP é o protocolo mais comum. A Figura 2.9 mostra uma rede PROFIBUS DP de relés inteligentes onde todos estão interligados e ligados ao centro de controle – o detalhe mostra a conexão entre a rede e os componentes.

Via de regra, os relés inteligentes apresentam apenas ligação de um TC, desempenhando desta forma, funções de proteção que não necessitam da tensão para serem implementadas.

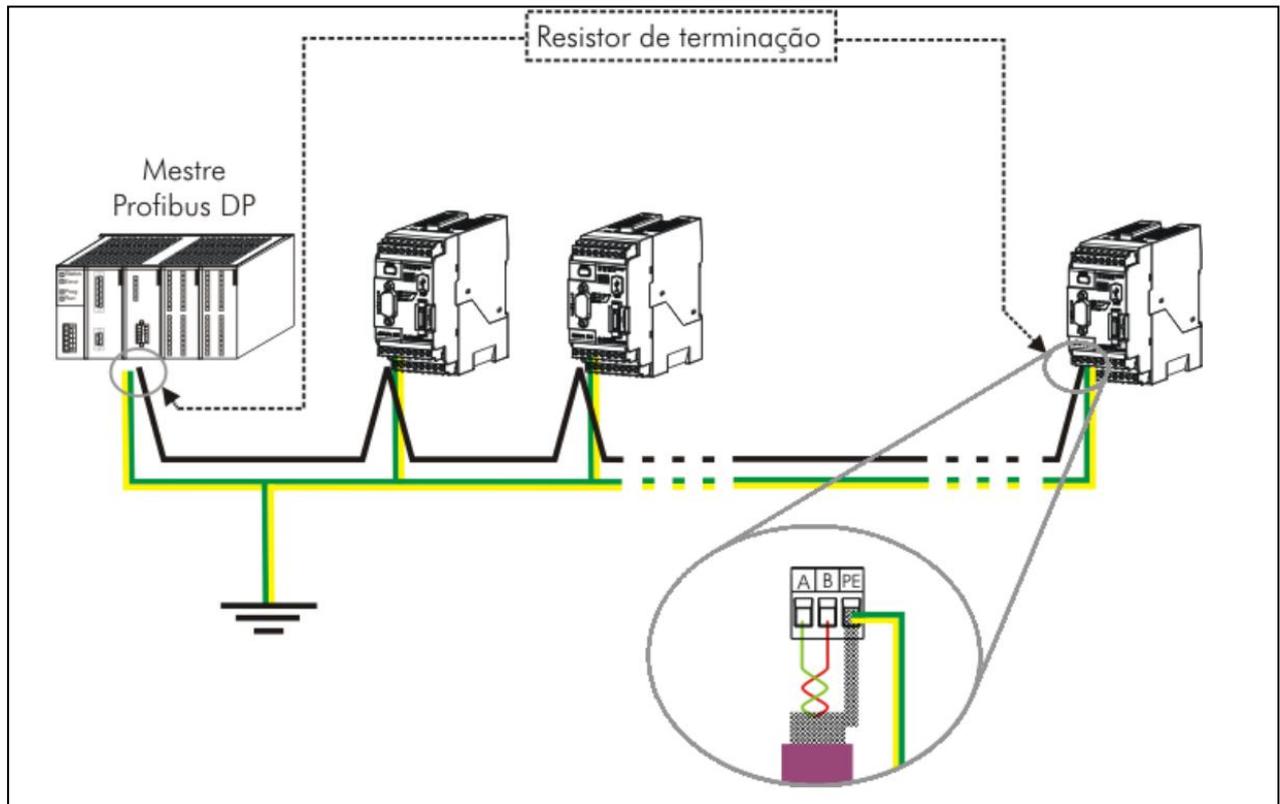


Figura 2. 9: Rede PROFIBUS DP com Relés inteligentes

2.7. IED – Intelligent Electronic Device

Outro tipo de relé empregado em sistemas elétricos industriais é o IED. Este é um termo usado na indústria de sistemas de potência para descrever um microprocessador que controla equipamentos do sistema, como disjuntores, transformadores e banco de capacitores. Eles recebem informações através de sensores e emitem comandos de controle como, por exemplo, um sinal de trip⁴ para o disjuntor caso o dispositivo seja sensibilizado devido à ocorrência de alguma anomalia em determinada grandeza do sistema (tensão, corrente, frequência).

IEDs típicos englobam uma série de funções, tais como medição, comando/controle, monitoramento, religamento, comunicação e proteção. Além disso, eles permitem elevada quantidade de entrada analógica (sinais de tensão e corrente) e elevada quantidade de entradas/saídas (I/O) digitais. Normalmente estes dispositivos são voltados para a automação.

Comparado aos relés inteligentes, estes dispositivos são muito mais caros e possuem funções de proteção e comunicação bem mais avançadas e flexíveis. O protocolo de comunicação mais utilizado nestes dispositivos é o definido pela IEC 61850. Sua aplicação se encontra em painéis de baixa e média tensão em que a potência da carga justifique um investimento maior no dispositivo de proteção e/ou haja a necessidade do protocolo citado. É claro que diferentes tipos de IEDs estão disponíveis no mercado, variando sobretudo a quantidade e tipo de funções agregadas ao dispositivo. Sua aplicação não se restringe à subestações industriais, já que são também encontrados em subestações de alta tensão.

⁴ Sinal de trip – sinal de desligamento da carga na ocorrência de uma falha.

A seguir podemos ver a imagem do IED RET 630 da ABB⁵ que será utilizado no estudo de caso deste trabalho.



Figura 2. 10: IED RET630 - ABB

Nos projetos de engenharia, a aplicação de IEDs ou relés inteligentes nos diferentes tipos de carga está definida no critério de projeto ou no memorial descritivo da instalação. Via de regra, em CDCs são aplicados IEDs. Já em CCMs, usa-se relés inteligentes, com exceção dos casos onde a entrada se dá através de disjuntor, para o qual um IED é dedicado.

⁵ ABB – Asea Brown Boveri

2.8. Classes de Coordenação da Proteção

Existem no mercado diferentes produtos para escolha do engenheiro do projeto. Assim, uma das especificações a se considerar para a compra de conjuntos de manobras (CDCs e CCMs) é o tipo de coordenação esperada para os componentes integrantes dos painéis, cubículos e gavetas.

A norma IEC 947-4-1 define que ensaios com diferentes níveis de corrente devem ser aplicados aos sistemas de proteção. Estes têm o objetivo de submeter a aparelhagem a condições extremas e, de acordo com o estado dos componentes após estes testes, definir três tipos de coordenação.

Desta forma, o fabricante apresenta no momento das propostas os certificados desses ensaios e se compromete a fornecer uma configuração de componentes que esteja prevista no documento que atesta a certificação do painel quanto à coordenação.

A seguir, os tipos de coordenação são citados e melhor detalhados. [2]

2.8.1. Coordenação tipo 1

Na coordenação tipo 1, é aceita uma deterioração do contator⁶ e do relé desde que não haja nenhum tipo de risco para o operador e que não sejam danificados todos os demais componentes.

Esta é a solução mais utilizada, pois o custo da aparelhagem é reduzido. No entanto, antes de dar nova partida, a verificação do motor pode ser necessária. Além disso, na coordenação tipo 1, a continuidade de serviço não é mandatória e as cargas atendidas através desta especificação ficam sujeitas a esta desvantagem.

2.8.2. Coordenação tipo 2

Neste tipo de coordenação, o risco de colagem dos contatos do contator é admitido se estes puderem ser facilmente separados. Após ensaios de coordenação tipo 2, as funções dos componentes de proteção e de comando são operacionais.

Esta é a solução que permite a continuidade de serviço. Nela, o tempo de parada da máquina é reduzido e a operação se torna mais simples. Para garantir uma boa coordenação tipo 2, a norma impõe 3 ensaios de corrente de defeito para verificar o bom comportamento da aparelhagem em condição de sobrecarga e curto-circuito.

2.8.3. Coordenação Total

É a solução para a qual não são aceitos nenhum dano ou desregulagem. Assim, há retorno imediato ao serviço e nenhuma precaução especial é necessária.

A definição da utilização do tipo de coordenação para os cubículos e gavetas de CDCs e CCMs, respectivamente, está nos critérios de projeto ou no memorial descritivo das instalações. Entre os critérios utilizados para esta escolha, estão a importância das cargas protegidas, seus custos e a necessidade de continuidade de serviço - definida pela operação da planta juntamente com a disciplina de Processos - disciplina chefe para o caso de unidades industriais no setor de óleo e gás.

⁶ Contator – é um dispositivo eletromecânico que permite, a partir de um circuito de comando, efetuar o controle de cargas de um circuito. É um tipo de chave liga/desliga cujos contatos mudam de estado quando este é energizado. Isto é, os contatos que estavam abertos quando o contator estava desenergizado fecham e, os que estavam fechados, abrem. Assim, o operador aciona o contator, que por sua vez aciona o equipamento de potência a ele associado.

No capítulo 2, foi possível desenvolver certa compreensão sobre alguns dos dispositivos que compõem a proteção de circuitos elétricos além de melhor entender a função de cada um no sistema elétrico industrial e sobre quais aspectos o engenheiro eletricitista do projeto deve fazer suas escolhas e especificações.

Esta análise teórica é fundamental para a continuidade deste trabalho, uma vez que, com o conhecimento adquirido, será possível agora apresentar como se pode ajustar as funções de proteção destes equipamentos para formar a proteção elétrica de cada equipamento frente aos diferentes tipos de distúrbio.

3. Proteção de Equipamentos Elétricos

Para o estudo de coordenação e seletividade no contexto de um projeto de engenharia, são necessários os dados da operação, de defeito e das condições específicas dos equipamentos (corrente de partida de motores, por exemplo) a serem protegidos no sistema elétrico. Estes são os dados de entrada para o dimensionamento e ajustes dos dispositivos de proteção.

Tendo isto em vista, este terceiro capítulo possui uma estrutura encadeada para apresentar os métodos de proteção dos equipamentos. Tal estrutura pode ser melhor entendida pela Figura 3.1. Para os equipamentos aqui tratados – motores de indução, transformadores, cargas não motóricas em geral e cabos elétricos – são apresentados os tipos de falhas aos quais eles estão sujeitos, as funções de proteção disponíveis para mitigar os efeitos dos fenômenos em questão e as possibilidades de ajustes destas funções.



Figura 3. 1: Estrutura do Capítulo 3

3.1. Motores de Indução

O motor de indução ou assíncrono de corrente alternada tem sido o motor preferido da indústria desde o princípio do uso da energia elétrica em corrente alternada. Ele alcançou e manteve sua posição em virtude de sua robustez, simplicidade e baixo custo. Estima-se que mais de 95% da potência instalada em acionamentos seja constituída por motores assíncronos [3].

O motor é a relação entre o equipamento elétrico e o mecânico. Ele está situado em ambiente conectado à carga tracionada, da qual não mais pode ser dissociado. Por outro lado, o motor pode ser submetido a esforços mecânicos internos, pois possui peças móveis.

Um único motor indisponível pode comprometer todo um processo. Os motores modernos possuem características muito otimizadas, que os tornam pouco aptos a operações fora de suas características normais; portanto, trata-se de receptores elétricos relativamente frágeis, cuja proteção deve ser cuidadosa. Estudos indicam que, em média, 33% das falhas em motores são elétricas, 31% são mecânicas e 35% são devidas ao ambiente, manutenção e outras razões. Assim, a adequada seleção e ajuste da proteção do motor são fundamentais para a boa performance do sistema. [4]

Além das inúmeras razões óbvias para que uma adequada proteção do motor seja feita, também há o fato de que, diferente de cargas estáticas, os motores podem ser fontes de tensão e assim contribuir com o curto-circuito.

Alguns pontos são importantes de serem observados na proteção dos motores de indução. Estes pontos são:

a) Corrente (I_p) e tempo (T_p) de partida

Um motor de indução industrial típico, nas aplicações usuais de alimentação direta pela rede, apresenta uma elevada corrente de partida, considerando o método de partida direta. Esta corrente de estator, corresponde, por sua vez, a uma também comparavelmente elevada corrente no rotor. No momento de partida, a resistência do rotor com escorregamento unitário apresenta um valor maior do que a resistência do rotor quando o motor está em rotação nominal, com escorregamento nulo. Desta forma, durante a partida direta, ocorre uma corrente de 6 a 8 vezes a corrente nominal do motor. Esta corrente elevada deve durar poucos segundos, justamente o tempo de aceleração da carga. Após esse período, o valor do escorregamento é reduzido e a corrente nominal é restabelecida.

b) Ponto de Rotor Bloqueado (TRB)

Uma condição de rotor bloqueado ocorre quando o motor parte e o momento de inércia da carga acionada é elevado o suficiente para gerar um torque no eixo tanto maior do que aquele de partida. Tal ponto é associado à corrente de partida do motor, isto é, o ponto de rotor bloqueado ocorre quando a corrente de partida é mantida constante por mais tempo que o tempo de aceleração da carga.

É importante destacar que a determinação do ponto de rotor bloqueado se dá através dos limites térmicos da máquina. Isto é, para uma determinada corrente, o projeto do motor de indução prevê uma suportabilidade térmica máxima para que o equipamento não apresente danos.

Tanto o ponto de rotor bloqueado quanto a corrente e tempo de aceleração da carga são informações constantes nas folhas de dados dos equipamentos pertinentes.

c) Curva típica de funcionamento do motor de indução

Apresenta-se na Figura 3.2 a curva tempo x corrente típica para um motor de indução. As duas características mencionadas anteriormente são mostradas. Podemos ver o comportamento da corrente do motor nas três fases comentadas: partida, aceleração e estabilização na corrente nominal. Vemos também o ponto de rotor bloqueado. A finalidade da proteção do motor é permitir que este possa partir e operar dentro dos limites especificados pelo fabricante, desligando-o caso a energia de aquecimento exceda aquela especificada por conta de sobrecargas, partidas sucessivas ou situações de rotor bloqueado.

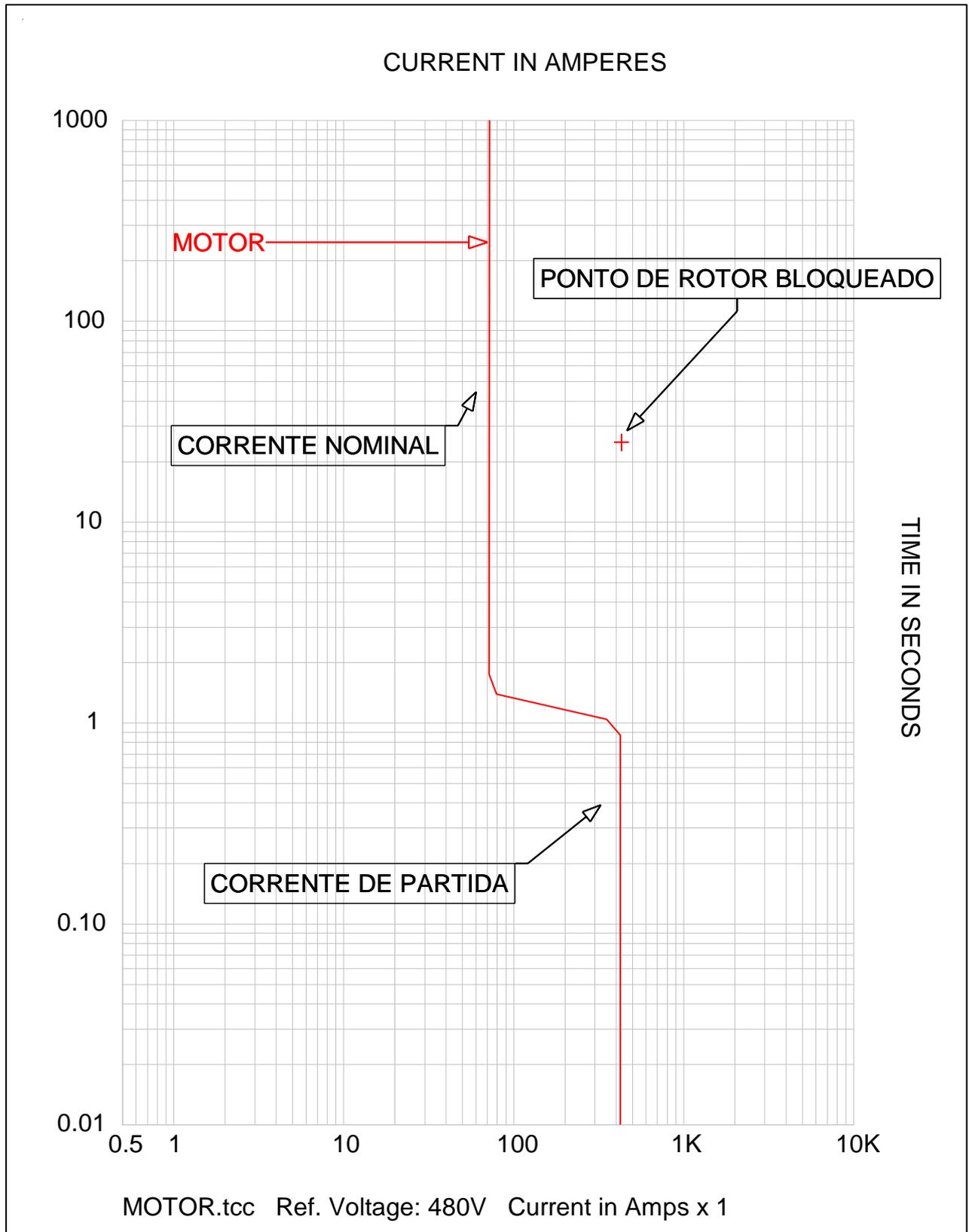


Figura 3. 2: Curva tempo x corrente típica de um motor

Frequentemente os motores são solicitados por situações que podem levá-los além de suas características nominais de serviço. Estas solicitações incluem o aumento de corrente devido a sobrecarga do motor, o que leva a prematuras falhas do isolamento. Sempre que o motor operar além de seus parâmetros do projeto, existe o risco de falha. As causas mais frequentes de falhas em motores industriais trifásicos são por conta de avarias em mancais, sobrecargas, desbalanço de tensão, operação monifásica - sobre ou subtensão -, ventilação deficiente ou obstruída, entre outras.

A tabela 3.1 mostra as estatísticas de taxas de falhas de motores.

Tabela 3. 1: Tipos de falhas em motores

Tipo de falhas em motores de indução trifásicos industriais [5]	Taxa de Falha
Falha em mancais	41%
Falhas no estator	37%
Falhas no rotor	10%
Outros tipos de falhas	12%

De forma a evitar a ocorrência destes tipos de falhas, são desenvolvidos diversos tipos de dispositivos de proteção de motores. Antigamente, eram necessários vários relés para desempenhar as funções recomendadas para a proteção de um motor. Não obstante, hoje em dia, apenas um relé e outros dispositivos de proteção são capazes de proteger o motor de anomalias e perturbações durante sua vida útil.

Cada tipo de falha necessita de uma proteção específica, que não é única. Por isso, é necessário uma avaliação por parte do engenheiro eletricista para implementar a melhor solução para determinado caso. A próxima seção apresenta, de forma resumida, as falhas e algumas formas de mitigar seus efeitos.

3.1.1. Falhas ligadas à carga tracionada

Durante a condição de funcionamento normal, uma máquina acionada por um motor elétrico - tal como uma bomba ou um compressor - pode requerer uma potência acima da nominal do motor, em função de necessidades momentâneas do processo. A **sobrecarga** do motor resulta em um aumento da temperatura dos enrolamentos do estator e a conseqüente redução da sua vida útil. Os métodos de detecção de uma sobrecarga ou sobretemperatura do motor em funcionamento são os seguintes:

- Proteção de sobrecorrente com tempo definido utilizando a função ANSI 51, ajustada de forma que permita a partida do motor. Esta proteção é geralmente desempenhada na baixa tensão por relés térmicos. Por não ser muito preciso e flexível, essa solução é mais comumente utilizada para motores com características não especiais, como por exemplo em casos que o ponto de rotor bloqueado e o tempo de partida estão separados por uma distância que aceite a imprecisão do dispositivo.
- Proteção de sobrecarga térmica utilizando a função ANSI 49, que atua detectando o sobreaquecimento devido à corrente elevada. Este método de proteção é utilizado quando um

relé inteligente é empregado na gaveta que alimenta o motor. A origem da informação vem através de um TC instalado na gaveta e conectado ao relé.

- Supervisão da temperatura feita pela função ANSI 49T. São instalados sensores (RTDs⁷) nos enrolamentos do estator que medem a temperatura e sinalizam ao microprocessador quando os patamares ajustáveis de alarme e *trip* são ultrapassados.

Quando há uma situação de **rotor bloqueado** devido a uma causa qualquer ligada à carga mecânica tracionada, o motor absorve a corrente de partida e permanece bloqueado em velocidade zero. Não há ventilação e o aquecimento é muito rápido. Já quando ocorre uma situação intermediária em que o motor acelera para uma rotação abaixo da nominal e permanece neste estado, o motor pode absorver aproximadamente a corrente de rotor bloqueado indefinidamente. Este fenômeno é chamado **Partida Longa**. Para estas duas proteções são utilizadas as funções ANSI 48 e 51LR, respectivamente. As duas cumprem o mesmo papel. É função do engenheiro escolher a forma mais adequada para cada situação ou, eventualmente, optar pelas duas simultaneamente.

Ainda em relação a partida do motor, é necessário que esta quantidade seja regulada. A função ANSI 66 faz este monitoramento e é ajustada de acordo com especificações do fabricante e necessidades da planta. No geral, permite-se, por dia, no máximo 2 **partidas consecutivas**, partindo da situação "a frio", com o retorno ao repouso entre partidas (tempo definido na folha de dados do motor), ou uma partida "a quente", após ter funcionado nas condições nominais.

O **desarme de bomba** ou a ruptura de acoplamento provocam a operação sem carga do motor, o que não causa nenhuma consequência nefasta direta para o motor. No entanto, a bomba por si só se deteriora rapidamente. Este acontecimento é detectado por uma proteção de sobrecorrente com tempo definido – ANSI 37 – que é reinicializado quando a corrente é anulada na parada do motor, e que desarma a carga tracionada ligada a ele.

3.1.2. Falhas da alimentação

O torque desenvolvido pelo motor durante a partida é diretamente proporcional ao quadrado da tensão aplicada aos terminais do motor. Quando a tensão nos terminais do motor é reduzida, o torque desenvolvido pelo motor pode se tornar menor do que o torque requerido pela carga. Esta **queda de tensão** pode levar o motor à condição de rotor bloqueado ou à falha na aceleração da carga até a sua rotação nominal.

Portanto, uma tensão reduzida não é benéfica para a partida do motor - especialmente para a partida de motores que acionam cargas com elevadas inércias, tais como ventiladores e sopradores centrífugos e compressores. Este evento é monitorado por uma proteção de subtensão de sequência positiva temporizada, a função ANSI 27D. As regulagens do nível de tensão e da temporização são determinadas para serem seletivas com as proteções de curto-circuito da rede e para tolerar as quedas de tensão normais, por exemplo, na partida de um motor. Esta mesma proteção pode ser comum a diversos motores do painel.

A existência de tensões de **alimentação desbalanceadas** no motor causa a circulação de correntes desequilibradas no estator do motor. As componentes de sequência negativa de correntes desbalanceadas causam um significativo aquecimento do motor. Determinados modelos de proteção térmica já levam em consideração este aquecimento devido às correntes de sequência negativa.

⁷ Resistance Temperature Detectors

Apesar deste fato, muitos engenheiros preferem efetuar o ajuste de uma função de proteção exclusiva para o desequilíbrio de corrente de fases e para os casos de operação do motor com falta de fase – devido à abertura de uma das fases por fusíveis ou disjuntores.

Neste caso, a proteção é assegurada por uma detecção com tempo inverso ou definido da componente inversa da corrente utilizando a função ANSI 46. Este mesmo fenômeno pode ocasionar **inversão do sentido de rotação** do motor. A direção de rotação de fase é detectada pela medição da sobretensão de sequência negativa através da função ANSI 47.

3.1.3. Falhas internas no motor

Uma das falhas comumente associada ao motor é a falha no enrolamento do estator. Estas são ocasionadas, normalmente, por problemas na isolamento. O **curto-circuito** é detectado pela proteção de sobrecorrente de fase temporizada – funções ANSI 50 (instantânea) e 51 (temporizada) [para o caso de aplicações com relé + disjuntor].

A regulagem do nível de corrente instantânea (com foco no curto-circuito) deve ser superior à corrente de partida com o objetivo de tornar a proteção insensível aos primeiros picos da corrente de energização, fenômeno normal explicado em detalhes na seção 3.1.

Se o dispositivo de interrupção correspondente for um contator, este será associado a fusíveis para assegurar a proteção contra curtos-circuitos. Este tipo de proteção é empregada, preferencialmente, em motores de média tensão, por ser uma solução que equilibra o fator econômico e a confiabilidade.

Normalmente uma proteção diferencial é ainda aplicada para motores de grande porte, em sistemas industriais com tensão nominal igual ou maiores do que 13,8kV, para motores com potência acima de 1500kW. Em motores deste porte, os custos dos serviços de manutenção corretiva e da perda de produção justificam a implementação de técnicas de proteção mais sensíveis e elaboradas, as quais possibilitam um desligamento mais rápido. A proteção diferencial em motores trifásicos aumenta a sensibilidade e atua com maior velocidade na operação de curto-circuitos entre fases e para a terra, internos ao motor.

A amplitude da corrente de falha no motor depende do regime de neutro da rede de alimentação e da posição da falha no enrolamento. Curtos-circuitos fase-fase e falhas na carcaça do estator requerem a rebobinagem do motor, o que pode provocar danos irreparáveis ao circuito magnético. Quando o neutro é aterrado diretamente ou por uma impedância, uma proteção de sobrecorrente residual temporizada – função ANSI 51N ou 51G – é utilizada para proteger os enrolamentos principais. O ajuste utilizado deve ser escolhido pelo engenheiro electricista responsável pelo estudo. Como indicação, um valor aceitável é 10% da corrente máxima de fuga à terra.

Falhas nos mancais podem ser resultados de lubrificação indevida, vibrações excessivas e falhas no alinhamento com a máquina acionada. Tais falhas podem ocasionar elevação de temperaturas severas. A proteção dos mancais é feita através da função ANSI 38 ajustada de acordo com a especificação do fabricante na folha de dados do motor. A temperatura dos mancais é medida usando sensores RTDs.

3.1.4. Tabela de ajustes para as funções ANSI de proteção para motores de indução

Tabela 3. 2: Ajustes de proteção para motores de indução

Falhas	Dispositivo de proteção adaptado	Função ANSI	Ajuste
Sobrecarga	Sobrecorrente de fase com tempo inverso	50/51	Regulagem que permita a partida
	Sobrecorrente térmica	49	Segundo características de funcionamento do motor
	Sensores de temperatura RTDs	49T	Depende da classe térmica do motor - encontrado na FD
Partidas Longas	Nível de corrente temporizado	48	$I_{aj} = 2,5I_n$; $t_{aj} = 0,5$ a 1 segundo
Partidas muito frequentes	Contagem do número de partidas	66	Segundo o fabricante - encontrado na FD
Perda de carga	Subcorrente de fase	37	$I_{aj} = 70\%$ da corrente absorvida; $t_{aj} = 1$ s
Desbalanço	Desbalanço/corrente de sequencia negativa	46	Tempo definido
Direção de rotação	Direção de rotação das fases	47	Nível de tensão negativo em 40% da tensão nominal
Curto-circuito fase-fase	Fusíveis		Calibre que permita partidas sucessivas
	Sobrecorrente com tempo definido	50/51	$I_{aj} > 1,2$ corrente de partida; $t_{aj} = 0,1$ s
Falha na carcaça do estator	Fuga à terra	51N/51G	Definido pelo engenheiro
Aquecimento dos Mancais	Medição de temperatura	38	Segundo indicação do fabricante

3.2. Proteção de Transformadores

O desenvolvimento de modernos sistemas de potência tem se refletido em avanços no projeto de transformadores. Isso resultou num vasto leque de equipamentos com potência que variam desde alguns kVA, a algumas centenas de MVA, disponíveis para uso numa grande variedade de aplicações.

As considerações para um pacote de proteções para um transformador variam de acordo com sua aplicação, importância e característica construtiva. Para reduzir os efeitos de estresse térmico e das forças eletrodinâmicas, é aconselhável assegurar que o pacote de proteções utilizado minimize o tempo de desconexão, caso uma falta ocorra no interior do transformador.

Os transformadores de distribuição de pequeno porte podem ser satisfatoriamente protegidos, tanto por considerações técnicas, quanto econômicas, com uso de fusíveis ou relés de sobrecorrente – neste trabalho serão tratados como as cargas não motóricas. Isso resulta em proteção temporizada devido aos requisitos de coordenação a jusante. Entretanto, o tempo de atraso de remoção da falta é inaceitável em transformadores de potência de maior porte, em virtude da operação/estabilidade do sistema, bem como pelo custo de reparo/duração da interrupção.

Assim como outros equipamentos, os transformadores possuem certas características que devem ser respeitadas ao planejar a proteção, para que esta não atue de forma indevida, prejudicando o desempenho ideal do transformador. Estas são:

a) Ponto de Inrush – Energização do Transformador

A energização de um transformador provoca um pico transitório da corrente, que pode atingir até 20 vezes a corrente nominal com constantes de tempo de 0,1 a 0,7 segundos. Este fenômeno é acontecido devido à saturação do circuito magnético, que provoca o aparecimento de uma corrente de magnetização elevada. O valor de pico da corrente é máximo quando a energização for efetuada na passagem a zero da tensão e com indução remanente máxima na mesma fase. A forma de onda contém uma quantidade substancial de harmônicos de 2ª ordem. Este fenômeno é uma manobra normal de operação da rede. Logo, não deve ser detectado como uma falha pelas proteções, que deverão deixar passar o pico de energização.

A corrente de magnetização circula apenas no enrolamento primário. Assim, deve-se tomar certas precauções com as proteções diferenciais e proteção de terra do primário, pois poderá haver desligamento indevido na energização, confundindo a corrente de magnetização do transformador com uma falta monofásica, por exemplo.

b) Suportabilidade Térmica e Mecânica

O principal objetivo da proteção é garantir que o equipamento funcione normalmente e que, em caso de faltas, não seja danificado - nem termicamente, nem mecanicamente. Por estes motivos, existem limites que definem a curva de suportabilidade do transformador aos efeitos térmicos e mecânicos das correntes de curto-circuito. Estes devem ser respeitados ao efetuar a proteção. Tais curvas definem os limites térmico e mecânico do transformador. Elas dependem das normas que regulam a fabricação e da potência nominal do equipamento, dentre outros fatores.

A proteção do transformador, portanto, devem garantir que essa região de suportabilidade não seja atingida em nenhuma ocasião de operação, intermitente ou não do equipamento.

c) Suportabilidade Térmica Deslocada (STD)

Devido à conexão dos transformadores, a corrente de falta à terra no secundário, vista pelo primário, em pu, pode ser menor. Assim, a suportabilidade térmica do transformador deve ser deslocada para se garantir a sua proteção. Desta forma, quando o engenheiro de projeto está fazendo os ajustes das funções de proteção para o transformador, especial cuidado deve ser direcionado a este ponto, uma vez que, a depender do sistema elétrico desenvolvido, a corrente de curto no secundário do trafo, refletida ao primário pode não ser grande o suficiente para acionar os dispositivos de proteção.

As principais falhas que podem afetar um transformador são sobrecargas, curto-circuitos e falhas na carcaça. A seguir, é apresentado, de forma resumida, as falhas e algumas formas de mitigar seus efeitos.

3.2.1. Falhas e proteções específicas

As **sobrecargas** podem ser causadas pelo aumento do número de cargas alimentadas simultaneamente ou pelo aumento da potência absorvida por uma ou por diversas cargas. Traduzem-se por uma sobrecorrente de longa duração, que provoca uma elevação de temperatura prejudicial à isolamento e à longevidade do transformador. Tal sobrecorrente pode ser detectada por uma proteção de sobrecorrente de fase temporizada com tempo definido ou com tempo inverso, através da função ANSI 51, seletiva com as proteções secundárias.

A proteção de sobrecarga térmica (ANSI 49) é utilizada para monitorar com uma melhor sensibilidade a elevação de temperatura: o aquecimento é determinado por simulação da liberação de calor de acordo com a corrente e a inércia térmica do transformador. Para os transformadores MT/BT, uma sobrecarga pode ser detectada no lado de baixa tensão pelo disparador de longo retardo do disjuntor BT principal.

É através da função 49 que os transformadores que contam com facilidades de ventilação forçada têm o sistema de sobrepotência acionado, minimizando os efeitos térmicos da sobrecarga, mencionados anteriormente.

É importante também mencionar que o efeito da sobrecarga é um efeito a ser considerado na proteção do secundário do transformador.

O **curto-circuito** pode ser interno ou externo ao transformador. No caso do curto interno, trata-se de uma falha entre condutores de fases diferentes ou de uma falha entre espiras do mesmo enrolamento. O arco de falha danifica o enrolamento do transformador e pode provocar um incêndio. Em transformadores a óleo, o arco provoca a emissão de gás de decomposição. Mesmo se a falha for leve, há uma pequena emissão de gás, cujo acúmulo pode tornar-se perigoso. Um curto-circuito violento pode causar danos muito sérios, entre eles a destruição dos enrolamentos e também do tanque, além do derramamento do óleo em combustão. O curto externo se caracteriza por uma falha fase-fase nas ligações a jusante. A corrente de curto-circuito a jusante provoca esforços eletrodinâmicos no transformador, que podem afetar mecanicamente os enrolamentos e levar a uma falha interna.

Diversas proteções podem ser utilizadas. Para os transformadores a óleo, são utilizados dispositivos sensíveis à emissão de gases e ao deslocamento de óleo - função ANSI 63. Esses fenômenos são provocados por curto-circuito entre espiras de uma mesma fase ou por curto-circuito fase-fase. Esta função admite duas formas: relé Buchholz, para transformadores AT/AT de ventilação natural ou detectores de gás e pressão, para os transformadores AT/BT tipo estanque.

A proteção diferencial de transformador (ANSI 87T) fornece uma proteção rápida contra falhas fase-fase. Ela é sensível e vital para os transformadores de alta potência. Para evitar o trip intempestivo, o harmônico de 2ª ordem da corrente diferencial é medido para detectar a energização do transformador e o harmônico de 5ª ordem é medido para detectar o sobrefluxo.

Uma proteção de sobrecorrente de fase instantânea (ANSI 50) associada ao disjuntor situado no primário do transformador assegura a proteção contra os curtos-circuitos violentos no primário. O nível de corrente é regulado em um valor superior à corrente devido a um curto-circuito no secundário: a seletividade amperimétrica é assim assegurada. Um fusível de AT pode garantir a proteção dos transformadores de baixa potência, garantindo nessa configuração uma solução mais econômica, embora conte com as desvantagens inerentes aos fusíveis, mencionadas no capítulo 2.

As **falhas de carcaça** são falhas internas. Estas podem ocorrer entre o enrolamento e o tanque ou entre o enrolamento e o núcleo magnético. Elas provocam uma emissão de gases em transformadores a óleo. Como o curto-circuito interno, elas podem provocar a destruição do transformador e incêndio. A amplitude da corrente de falha depende do regime de neutro das redes a montante e a jusante. E depende também da posição da falha no enrolamento.

Para a proteção contra falha na carcaça do tanque do transformador, é utilizada uma proteção de sobrecorrente levemente temporizada – ANSI 51G – instalada na conexão de aterramento da carcaça do transformador, se sua regulação for compatível com o regime de neutro. Constitui uma solução simples e eficaz contra as falhas internas entre um enrolamento e a carcaça. O transformador deve ser isolado da terra. Esta proteção é seletiva, isto é, somente sensível às falhas na carcaça do transformador dos lados primário e secundário.

Outra solução é utilizar a proteção contra fuga à terra através da função ANSI 51N situada na rede a montante para a falha de carcaça que afeta o primário do transformador, ou pela mesma função ANSI 51N situada na entrada do quadro alimentado, se o aterramento do neutro da rede a jusante for realizado no barramento. Estas proteções também são seletivas. Elas são somente sensíveis às falhas fase-terra situadas no transformador ou nas ligações a montante e a jusante ou, por fim, por uma proteção de fuga à terra com ponto neutro (ANSI 51G) se o aterramento do neutro da rede a jusante for efetuado no transformador.

3.2.2. Tabela de ajustes para as funções ANSI de proteção para transformadores

Tabela 3. 3: Ajustes de proteção para transformadores

Falhas	Dispositivo de proteção adaptado	Função ANSI	Ajuste
Sobrecarga	Sobrecarga térmica	49	Nível de alarme = 100% de aquecimento Nível de trip = 120% de aquecimento taj = 10 a 30 min
	Disjuntor de baixa tensão	-	Iaj > corrente nominal
Curto-circuito	Fusível	-	Escolha do calibre segundo método do equipamento relacionado
	Sobrecorrente de fase instantânea	50	Nível alto > Icc a jusante
	Sobrecorrente com tempo definido	51	Nível baixo < 5 x corrente nominal taj = t a jusante + 0,3 s
	Sobrecorrente com tempo inverso	51	Nível baixo com tempo inverso seletivo com a jusante, aproximadamente 3 x corrente nominal
	Diferencial de porcentagem	87T	Inclinação = 15% + extensão da regulagem; Nível mínimo 30%
	Bulchholz ou detecção gás e pressão	63	Lógica
Fuga à terra	Sobrecorrente da carcaça do tanque	51G	Iaj = 20A; taj = 0,1 s
	Fuga à terra	51N/51G	Iaj < 20% da corrente máxima de fuga à terra e > 10% do calibre do TC; taj = em função da seletividade
	Fuga à terra com ponto neutro	51G	Iaj < I permanente na resistência de limitação

3.3. Proteção de Cargas não motóricas e cabos elétricos

No que concerne às cargas não motóricas e cabos elétricos, a proteção dos equipamentos que se encaixam nessa classificação deve garantir que os fenômenos relacionados à sobrecarga e ao curto-circuito sejam minimizados.

Através dos termos, carga não motóricas entende-se transformadores de baixa potência (transformadores de iluminação, por exemplo), conversores de frequência, bastante usuais em plantas industriais e unidades de refinarias, aquecedores, painéis de controle de carga, alimentações de sistemas em pacotes (unidade de geração de nitrogênio, por exemplo), painéis de tomadas de solda e iluminação, etc.

Os cabos elétricos, embora também sejam classificados como cargas não motóricas, recebem tratamento diferente neste trabalho, uma vez que já no seu dimensionamento, os defeitos e outros fenômenos físicos já são levados em conta.

De forma a proteger as cargas não motóricas dos efeitos do curto-circuito a função 50 é comumente utilizada. O ajuste de ser compatível com o nível de curto-circuito do painel alimentador calculado no estudo de curto-circuito. Não é raro que esses circuitos sejam protegidos através de dispositivos com pouca possibilidade de ajuste, através de disjuntores termomagnéticos, por exemplo. Assim, cabe ao engenheiro escolher corretamente o dispositivo a utilizar, baseado nas características dos equipamentos apresentadas nos catálogos dos produtos dos fabricantes.

No que se refere aos cabos elétricos, esses fazem parte do circuito alimentador de todas as cargas da planta. Desta forma, automaticamente estão protegidos pelo dispositivo de proteção à montante contra os defeitos associados às cargas. Cabe ao engenheiro do projeto garantir que a cura de suportabilidade térmica dos condutores não é atingida em nenhuma ocasião.

É interessante lembrar que o curto-circuito já é considerado no dimensionamento dos cabos elétricos. Diferente de linhas de transmissão, se o defeito ocorrer no meio do condutor, este fica inutilizado e deve ser substituído no campo. Tendo isso em vista, o cabo elétrico, no seu processo de dimensionamento, utiliza a corrente de curto no terminal da carga, garantindo que na ocorrência do defeito neste ponto, e para o tempo de atuação da proteção prevista, o condutor consegue suportar a corrente de falta sem que haja dano para o equipamento.

Para a sobrecarga, a proteção ANSI 51 é geralmente utilizada garantindo que os efeitos térmicos da sobrecorrente não sejam nocivos aos equipamentos à jusante. Especificamente para os cabos, esse fenômeno, assim como no caso do curto-circuito, já é considerado no dimensionamento dos equipamentos através dos fatores de agrupamento e temperatura. Desta forma, o equipamento instalado no campo, já está apto a aceitar alguma sobrecarga, ficando a carga da proteção à jusante eliminar as sobrecorrentes anormais.

4. Estudo de Caso

Normalmente, um projeto de engenharia é dividido em duas grandes etapas: projeto básico e projeto detalhado. No projeto básico, os sistemas - a partir das necessidades da planta - são criados e, entre estes, está o sistema elétrico. Nesta fase, também são definidas as classes de tensão que serão utilizadas no projeto, a divisão das cargas em cada barra, bem como a constituição da proteção de cada carga, barra, cabo e de outros elementos que constituem o sistema. O estudo de coordenação e seletividade ocorre ao final da segunda fase, já com o projeto detalhado. Neste momento, boa parte das informações já está em caráter final, os estudos relacionados - curto-circuito e fluxo de potência - já foram emitidos e o trabalho a ser feito se resume ao ajuste das funções que foram definidas no projeto básico.

Imersos neste contexto, este capítulo utilizará as informações e premissas descritas nos capítulos anteriores, a constituição do sistema elétrico e os níveis de curto-circuito máximos - provenientes do estudo de curto-circuito - para desenvolver os ajustes às funções de proteção já definidas pelo projeto básico.

Além do objetivo anteriormente citado este capítulo se propõe, através de um estudo de caso para o sistema elétrico de uma planta de refino de petróleo, a utilizar os conceitos e as características dos dispositivos de proteção vistos nos dois capítulos anteriores.

Ao final deste, são serão apresentados as curvas de coordenação que são parte integrante dos entregáveis do estudo de coordenação e seletividade de um projeto de engenharia.

4.1. Descrição da Planta

O sistema alvo deste estudo é a planta de uma refinaria de petróleo, na qual a disciplina chefe é Processos. Este sistema, que foi criado para suprir as demandas dos processos químicos de uma unidade da refinaria, é simplificada em três partes. Esta divisão é feita pela classe de tensão das barras - alta, média e baixa tensão. O Anexo I apresenta o unifilar do sistema. A seguir será descrita, de forma simplificada, a formação deste sistema.

- Alta Tensão - 34,5kV

O sistema é alimentado em 34,5kV por dois circuitos cada um com 3 condutores de 70mm² através de um secundário seletivo que chega no painel principal PN-2100001. Este possui duas barras ligadas por um TIE⁸; seis circuitos de saída para alimentar transformadores e uma saída típica.

- Média Tensão - 4,16kV

Das barras de 34,5kV saem dois transformadores - TF-2100001A e TF-2100001B - de 8/10MVA, 34,5 - 4,16kV, Z = 8%. Estes alimentam um Centro de Distribuição de Cargas (CDC) em 4,16kV através de dutos de barra isolados - DB-2100001A e DB-2100001B. O CDC é

⁸ Faz parte da filosofia de operação a redundância da alimentação de todos os CDCs. Desta forma, tais painéis apresentam mais de uma fonte de energia. Cada entrada fica em um seguimento do barramento formado a partir da divisão do barramento principal por disjuntores TIE. Estes são normalmente abertos e cada seção é alimentada por uma fonte de energia. Este tipo de ligação recebe o nome de "L aberto" e é conveniente por facilitar a manutenção e por reduzir o nível de curto do painel. A formação da interligação entre as barras é feita utilizando três TCs de dois enrolamentos, um disjuntor de interconexão e um relé digital microprocessado.

composto por duas barras, PN-2100002A e PN-2100002B, ligadas por um TIE, e alimenta seis motores de média tensão e doze cargas estáticas.

- Baixa Tensão – 480V

Também das barras de 34,5kV saem seis transformadores de 2/2,8 MVA, 34,5-0,48kV, TF-2100002A/B, TF-2100003A/B, TF-2100004A/B, que alimentam os CDCs PN-2100003 e PN-2100004 e PN-2100013, respectivamente.

Os centros de distribuição de cargas alimentam os Centros de Controle de Motores (CCM) através de uma única fonte de alimentação como pode ser visto no Anexo I. O sistema tem ao todo 7 CCMs que alimentam 56 motores com potência nominal abaixo de 75kW.

4.2. Premissas

Para as simulações, foi utilizado o software PTW de propriedade da SKM Systems INC (módulo DAPPER para os estudos de curto-circuito e módulo CAPTOR para o estudo de coordenação e seletividade).

Como evidenciado na introdução o estudo de coordenação e seletividade se encontra na fase final de um projeto de engenharia. Desta forma a maioria das informações já estão definidas. Assim, o objetivo deste estudo é ajustar as funções de proteção dos dispositivos já existentes e especificados.

Os TPs e TCs, da mesma forma, são fornecidos e calculados pelos fabricantes dos painéis, a partir das informações constantes nos documentos de engenharia já emitidos. Deste modo, as relações de transformação e características serão utilizadas como premissas.

Existe uma relação importante entre o Estudo de Curto-Circuito e o Estudo de Coordenação e Seletividade. De fato, o Estudo de Curto-Circuito serve como documento de referência para o outro. Por esta razão, não faz parte do escopo deste trabalho o cálculo dos níveis de curto-circuito nas barras do sistema.

Desta forma, como conclusão do Estudo de Curto-Circuito (aqui considerado como premissa) a Tabela 4.1 apresenta os valores de curto-circuito máximos e mínimos para todas as barras do sistema calculados pelo método da IEC60909.

É importante dizer que o nível de curto-circuito máximo considera além da correção de alguns fatores, a contribuição dos motores para a corrente de falta. Tendo isto em vista, cabe ao engenheiro electricista do projeto garantir que para cada circuito alimentador da planta os níveis de curto-circuito máximos e mínimos estejam compatíveis com o ajuste da função sobrecorrente instantânea.

É possível perceber pelos valores apresentados na Tabela 4.1 não são muito distantes em magnitude um dos outros. Desta forma a dificuldade evidenciada no parágrafo anterior se torna menos grave, uma vez que a zona instantânea de proteção do relé abrangeria de forma natural os dois níveis de curto-circuito.

Os IEDs utilizados na planta são conectados via IEC61850, o que permite que a seletividade lógica seja implantada na unidade e os ajustes de tempo da função ANSI 50 sejam iguais.

De forma a permitir que a informação de ordem de abertura percorra a rede de comunicação, o ajuste de tempo da função ANSI 50 será feito em 100ms. Reservam-se ainda 200ms para a coordenação seletiva dos ajustes dos relés, pelo mesmo motivo.

Tabela 4. 1: Valores de curto máximos e mínimos para curto-circuito trifásico

BARRA	Corrente	
	Mín	Máx
PN-2100001	7,89	9,62
PN-2100002	9,47	11,78
PN-2100003	27,74	35,86
PN-2100004	28,52	34,19
PN-2100005	29,84	34,67
PN-2100006	24,93	28,81
PN-2100007	27,7	32,78
PN-2100008	27,49	32,81
PN-2100009	25,93	30,64
PN-2100010	30,38	35,11
PN-2100011	21,38	24,7
PN-2100012	27,99	35,82
PN-2100013	30,75	35,73

De posse dos níveis de curto-circuito nas barras, da relação dos TCs e das informações técnicas das folhas de dados dos equipamentos elétricos é possível proceder a etapa de cálculo e ajuste dos dispositivos de proteção para o estudo de caso em questão conforme as tabelas 3.2 e 3.3.

4.3. Resultados

Conforme enunciado na seção 1.2 o objetivo do estudo de coordenação e seletividade é informar para todos os circuitos da planta os ajustes dos dispositivos de proteção. De forma a favorecer a compreensão do tema, neste estudo de caso serão considerados circuitos típicos, para os quais os cálculos e a forma das curvas tempo x corrente podem ser replicados para outras cargas análogas.

Em outras palavras, serão considerados na parte dos resultados os mesmos circuitos típicos tratados no capítulo anterior, notadamente:

- Cargas motóricas
- Transformadores
- Conversores de frequência (cargas não motóricas)
- Coordenação da entrada e saída de painéis

Primeiro serão apresentados os cálculos para cada circuito típico e na sequência todas as curvas elaboradas a partir dos cálculos mencionados. De forma a facilitar a compreensão, é aconselhável relacionar os cálculos com a respectiva curva tempo x corrente.

4.3.1. Transformador TF-2100001A/B – 34,5/4,16kV

Dados do transformador:

;

;

;

;

;

;

Determinação dos pontos de dano ANSI e de magnetização:

A corrente de dano ANSI é definida pelo Buff Book e representa a suportabilidade térmica do transformador. Seu cálculo leva em conta a impedância do equipamento, a corrente nominal do mesmo, além de um fator de ajuste que considera o efeito da corrente nos enrolamentos primários devido à conexão delta-estrela.

A intercessão entre essa corrente e a curva térmica do transformador no primário define o ponto ANSI a ser protegido.

Proteção Primária do TF-2100001A/B

a) Ajuste da unidade 51 (sobrecorrente temporizado):

O ajuste de tempo da função 51 é feito de forma gráfica de forma que o ponto ANSI esteja acima da curva do relé.

b) Ajuste da unidade 50 (sobrecorrente instantâneo):

Como já mencionado anteriormente a corrente de magnetização é um fenômeno do primário do transformador, desta forma o ajuste da unidade 50 deve considerar não somente o nível de curto-circuito à jusante como também esta corrente transitória, permitindo a partida do equipamento.

c) Ajuste da unidade 50GS/51GS:

Como o sistema de 34,5 kV não é isolado, faz sentido o cálculo da proteção 50/51GS

Proteção Secundária do TF-2100001A/B – Entrada/Tie PN-2100002

a) Ajuste da unidade 51 (sobrecorrente temporizado):

* IEEE muito inversa 0.78. O tie será ajustado com TD 0.51 para fins de coordenação.

b) Ajuste da unidade 50 (sobrecorrente instantâneo):

100ms, considerando seletividade lógica com as saídas do PN-2100002.

c) Ajuste da unidade 50G/51G

, (t = 100ms)

4.3.1.1. Motor de Média Tensão – M-B-2100025A/B

A seguir serão utilizadas as seguintes expressões:

In: Corrente nominal da carga;

Iaj: corrente de ajuste do relé.

IRT: Corrente de rotor travado do motor;

Ta: Tempo de aceleração do motor;

TRT: Tempo que o motor pode suportar com o rotor travado;

Dados do motor:

- a) Ajuste da unidade 46 (desbalanceamento de fase):
- b) Ajuste da unidade 48 (sequencia completa de partida):
- c) Ajuste da unidade 49 (Sobrecarga térmica):
- d) Ajuste da unidade 50/51GS (sobrecorrente instantânea/temporizado de terra):

4.3.1.2. Conversor de Frequência - CF-M-B-210001A/B

Dados do Conversor:

- a) Ajuste da unidade 51:
- b) Ajuste da unidade 50/51GS:

4.3.2. Alimentação de barra em 34,5kV

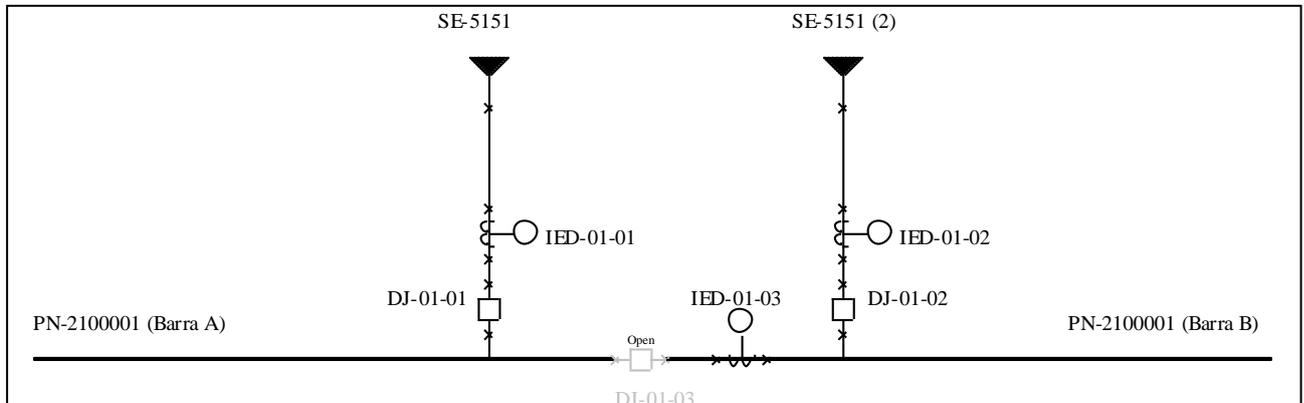


Figura 4. 1: Alimentação do sistema em 34,5kV

Como a subestação à montante não pertence ao escopo do contrato em questão, foi necessário implementar o ajuste dos relés de entrada do PN-2100001 de forma a deixar a maior margem possível para a parametrização dos relés da subestação, com o objetivo de não criar dificuldades de ajuste para os relés dos circuitos alimentadores.

Nota-se que o ajuste dos dispositivos das duas entradas é igual e que existe seletividade lógica na função ANSI 50 e esta atua como foi comentado nas premissas.

Pode-se observar também que há uma defasagem de 200ms entre os ajustes dos relés de entrada e do TIE, assim como comentado nas premissas, para que permita que a informação de ordem de abertura percorra a rede de comunicação.

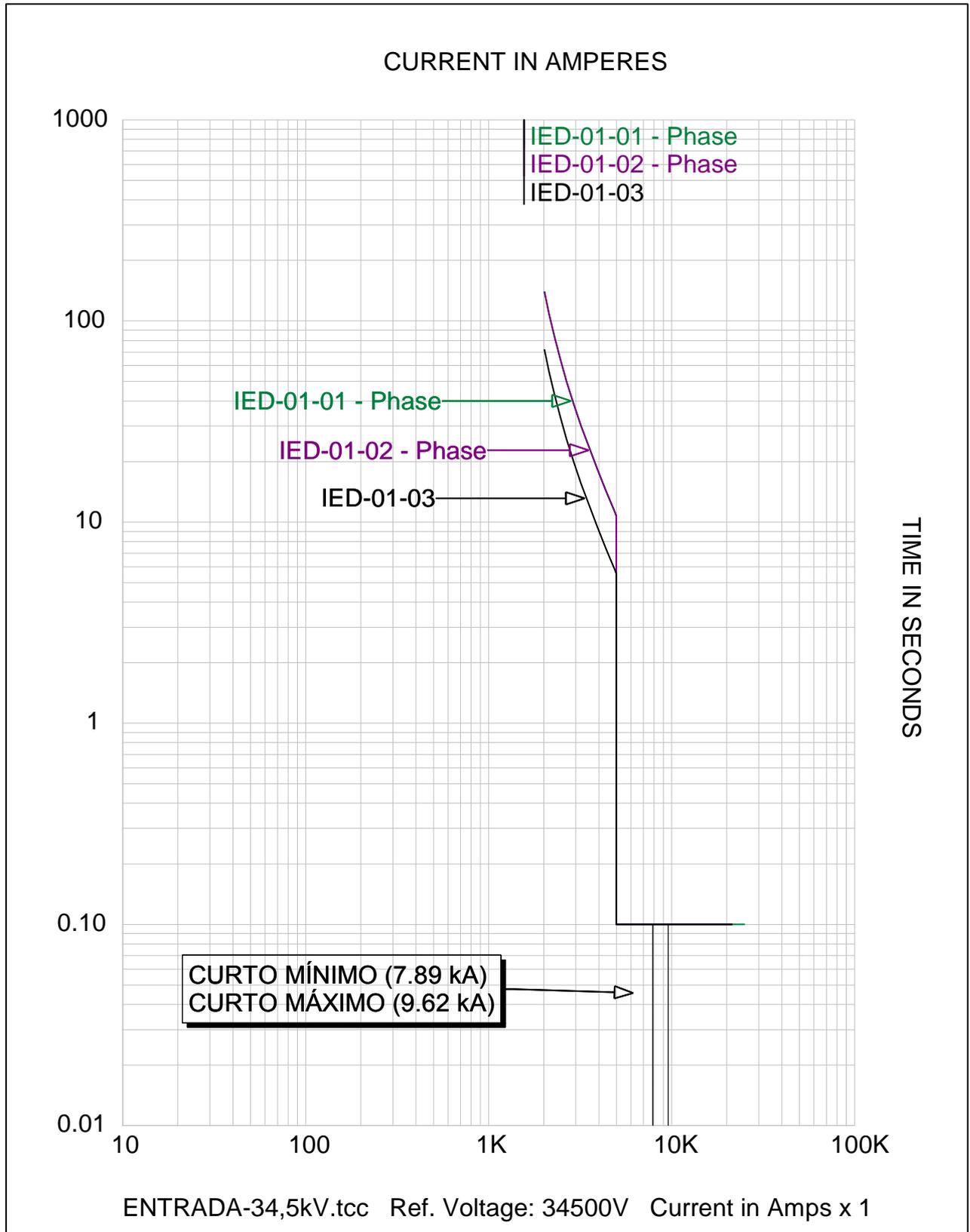


Figura 4. 2: Curva tempo x corrente para alimentação do sistema em 34,5kV

4.3.3. Saída da barra PN-2100001A e primário do TF – 2100001A/B

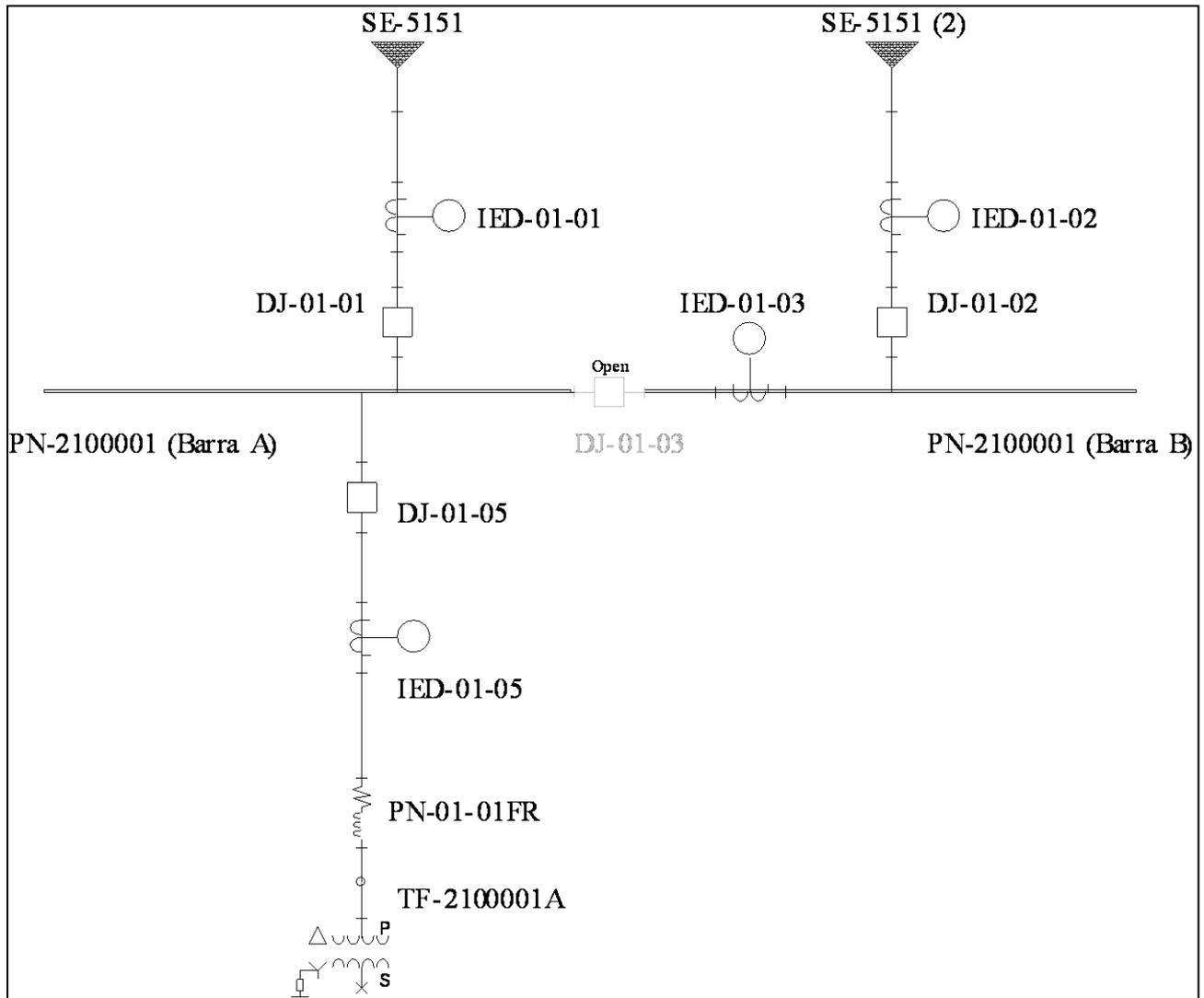


Figura 4. 3: Alimentação do PN-2100001A/B em 34,5 e saída para o TF-2100001A

O objetivo maior de um estudo de seletividade é determinar os ajustes dos dispositivos de proteção, de forma que, na ocorrência de um curto-circuito, opere apenas o dispositivo mais próximo da falta, isolando a menor porção do sistema elétrico, no menor tempo possível e ainda protegendo os equipamentos e o sistema.

A aplicação deste requisito no sistema da Figura 4.3 ocorre quando os dispositivos de proteção que devem atuar na presença de uma falha no transformador seja os mais próximos deste. Neste caso é necessário que o ajuste de atuação do IED-01-05 esteja mais a esquerda que o ajuste dos IED-01-01 e IED-01-02.

No gráfico tempo versus corrente apresentado na Figura 4.4 é possível observar a curva térmica do TF-2100001A e seu ponto de INRUSH, a curva térmica do cabo PN-01-01FR e os ajustes dos três IEDs.

É fácil perceber a coordenação entre os IEDs. O IED-01-05 é o dispositivo que deve proteger o equipamento, este deve atuar na ocorrência de uma falta no equipamento antes os outros dois IEDs, por este motivo a disposição das curvas de tal IED está mais a esquerda que a dos demais.

Pode-se reparar também que há seletividade lógica, pois o ajuste de tempo da unidade 50 dos três IEDs é igual e atuam como definido nas premissas.

Como já mencionado anteriormente a proteção de sobrecarga do equipamento é feita no secundário, assim, a proteção contra alguma falha deste tipo, no primário, é feita apenas com a utilização do ponto ANSI, não havendo necessidade de proteção da curva térmica do transformador e esta pode estar abaixo da curva do relé, como acontece neste caso.

De acordo com os valores da Tabela 4.1 os níveis de curto-circuito máximo e mínimo estão na região de atuação da função 50 dos IEDs.

Outra observação relevante é que mesmo que os ajustes dos dispositivos de proteção tenham sido calculados a partir da corrente nominal sem ventilação forçada, caso este fato ocorra, o IED não atuará já que seu ajuste foi feito para duas vezes a corrente nominal.

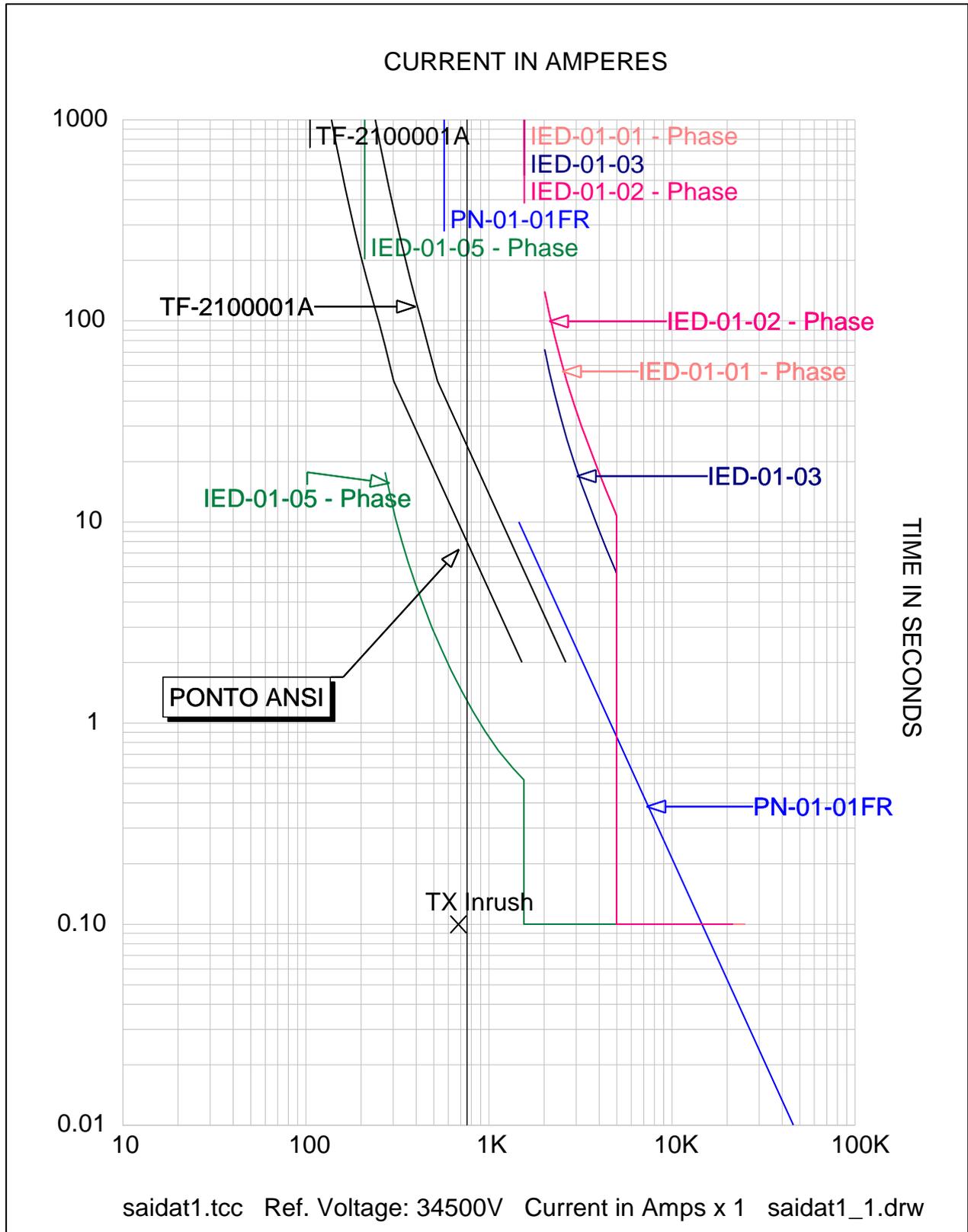


Figura 4. 4: Curva tempo x corrente para a coordenação da proteção da alimentação em 34,5 e do TF-2100001A

4.3.4. Alimentação de barra em 4,16kV e secundário do TF-2100001A

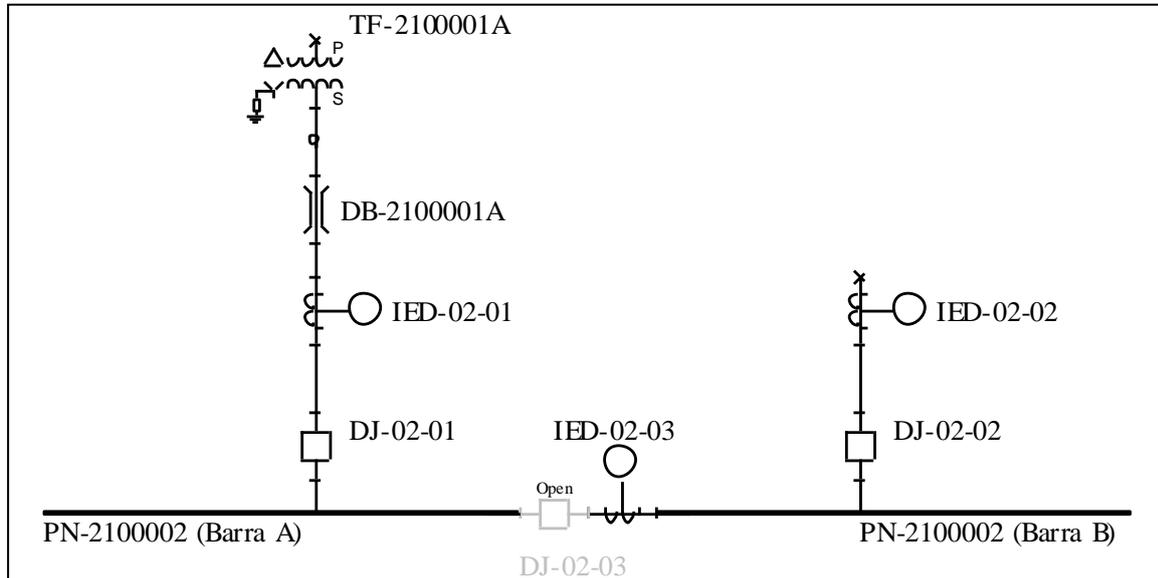


Figura 4. 5: Alimentação do PN-2100002A em 4,16kV

Agora é apresentado o diagrama que ilustra os ajustes de proteção para o secundário do TF-2100001A e sua entrada no painel de 4,16kV. É importante notar que o gráfico tempo versus corrente agora deve estar na mesma tensão que o secundário do transformador.

Como é sabido, a proteção do secundário do transformador se dedica à sobrecarga. Por este motivo, a curva térmica do equipamento não deve ser ultrapassada pelos ajustes de proteção de forma alguma. Mas, como podemos ver na Figura 4.6 a curva do IED-02-01 intercepta a curva do equipamento, isto ocorreu pois o ajuste da proteção foi feito a partir da corrente de ventilação forçada e ainda aplicado um fator de 1,25. Como a zona desprotegida ainda se caracteriza como uma região de sobrecarga, a proteção dessa zona fica a cargo da função ANSI 49, que caso ocorra demanda de corrente acima da nomina, atuaria desligando o equipamento, não por sobrecorrente, mas por sobretemperatura.

Assim como na proteção do primário do transformador não há necessidade de preocupação com sobrecarga, no secundário não há necessidade de atenção ao ponto ANSI que já está protegido pela proteção primária.

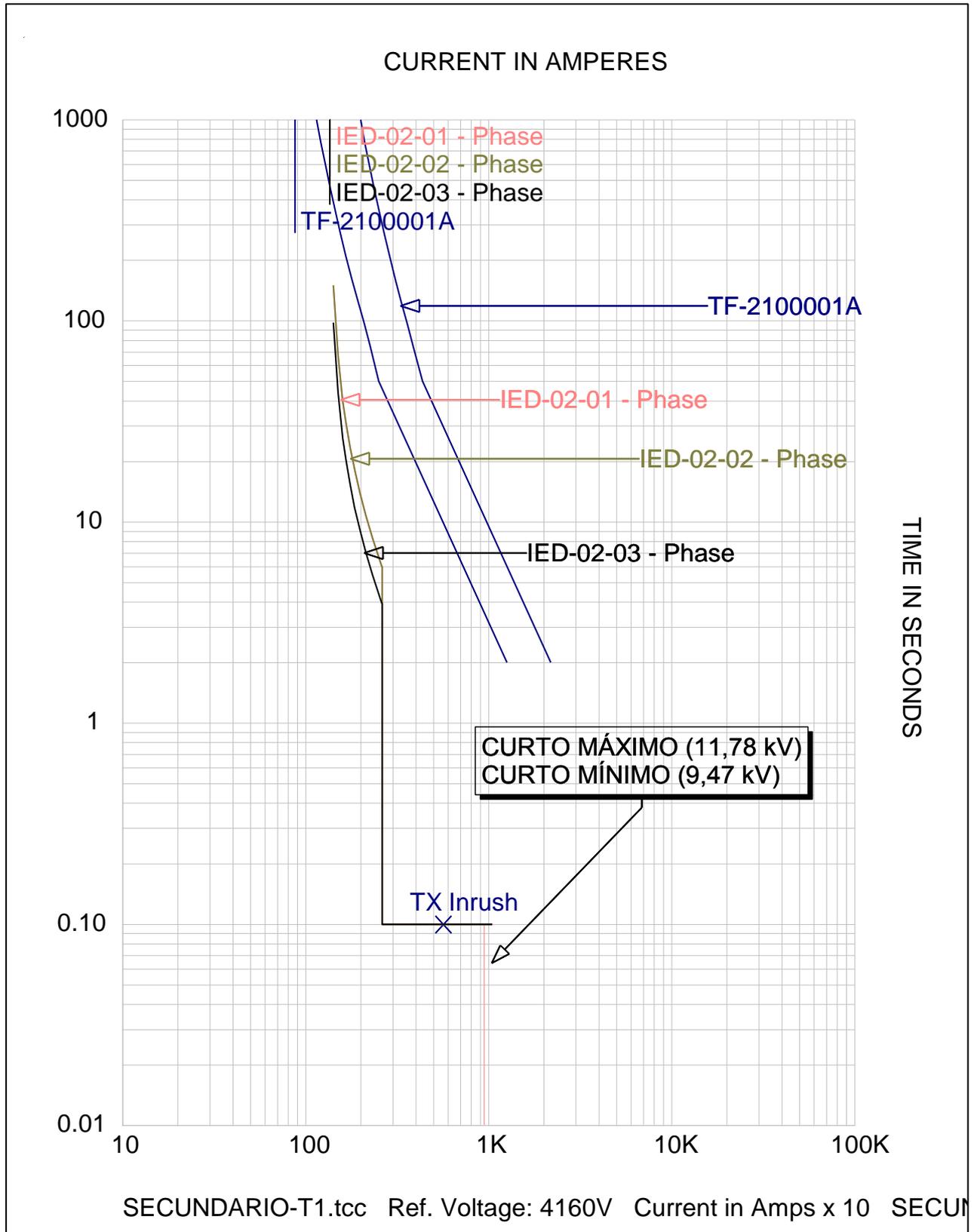


Figura 4. 6: Proteção do Secundário do TF-2100001A e entrada do PN-2100002

4.3.5. Alimentação de barra em 4,16kV e alimentação de motor e alimentação de conversor de frequência

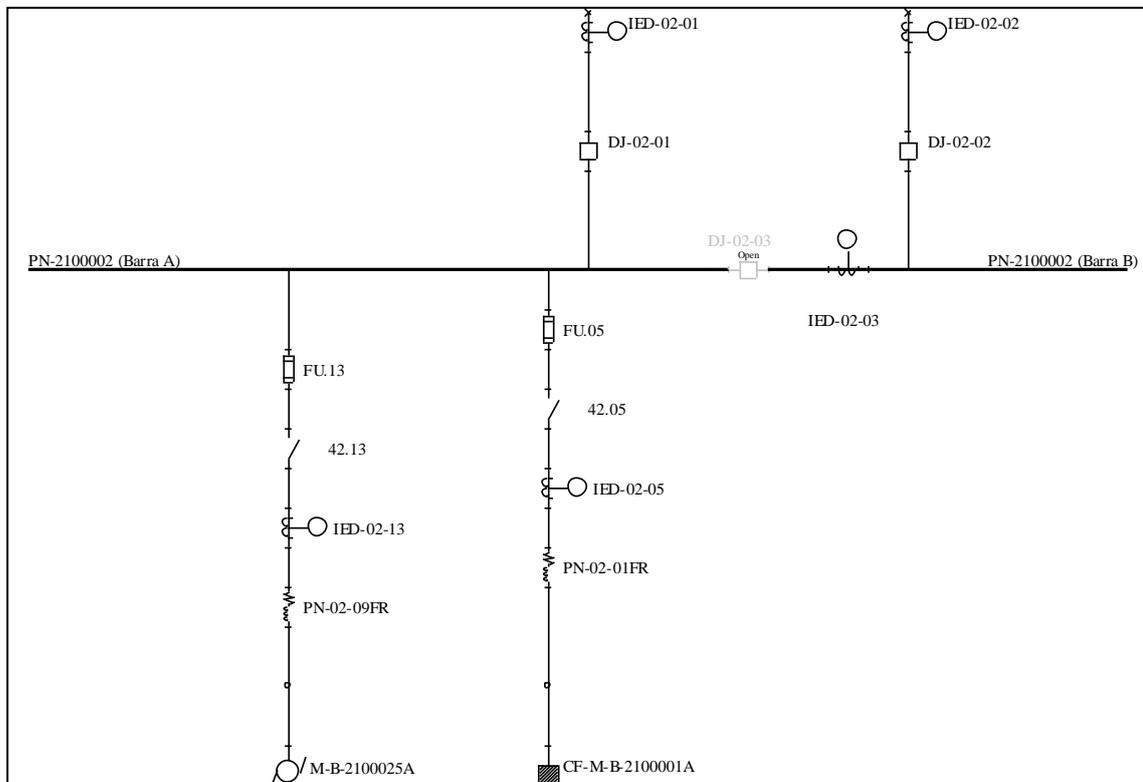


Figura 4. 7: Alimentação do PN-2100002 e saída para motor e conversor

Este circuito típico possui duas cargas, um motor e um conversor de frequência de média tensão. Serão apresentados diagramas para cada uma das cargas separadamente.

É importante notar que, como neste caso, para os circuitos de média a proteção para curto-circuito é feita por fusível, por motivos já explorados no capítulo 2, e que no qual podemos notar sua característica ultra-rápida e a faixa de tolerância.

A Figura 4.8 apresenta o diagrama para a coordenação da proteção do motor M-B-2100025A. Nele podemos observar que o ajuste do IED é feito para proteger o ponto de rotor bloqueado, enquanto o ajuste do fusível é feito para estar logo após a curva de partida do motor, a proteção do motor é feita pela união dos dois. Pelos critérios que já foram falados anteriormente, a coordenação com os dispositivos da entrada do painel está correta.

Vemos também que nos dois diagramas a proteção do cabo é satisfeita pelos dispositivos de proteção da carga.

Para o conversor, vemos na Figura 4.9 que, como este é uma carga estática, não há problemas com a partida ou outros detalhes que devem ser observados. Apenas podemos observar que a função 49 é feita considerando a corrente nominal do equipamento.

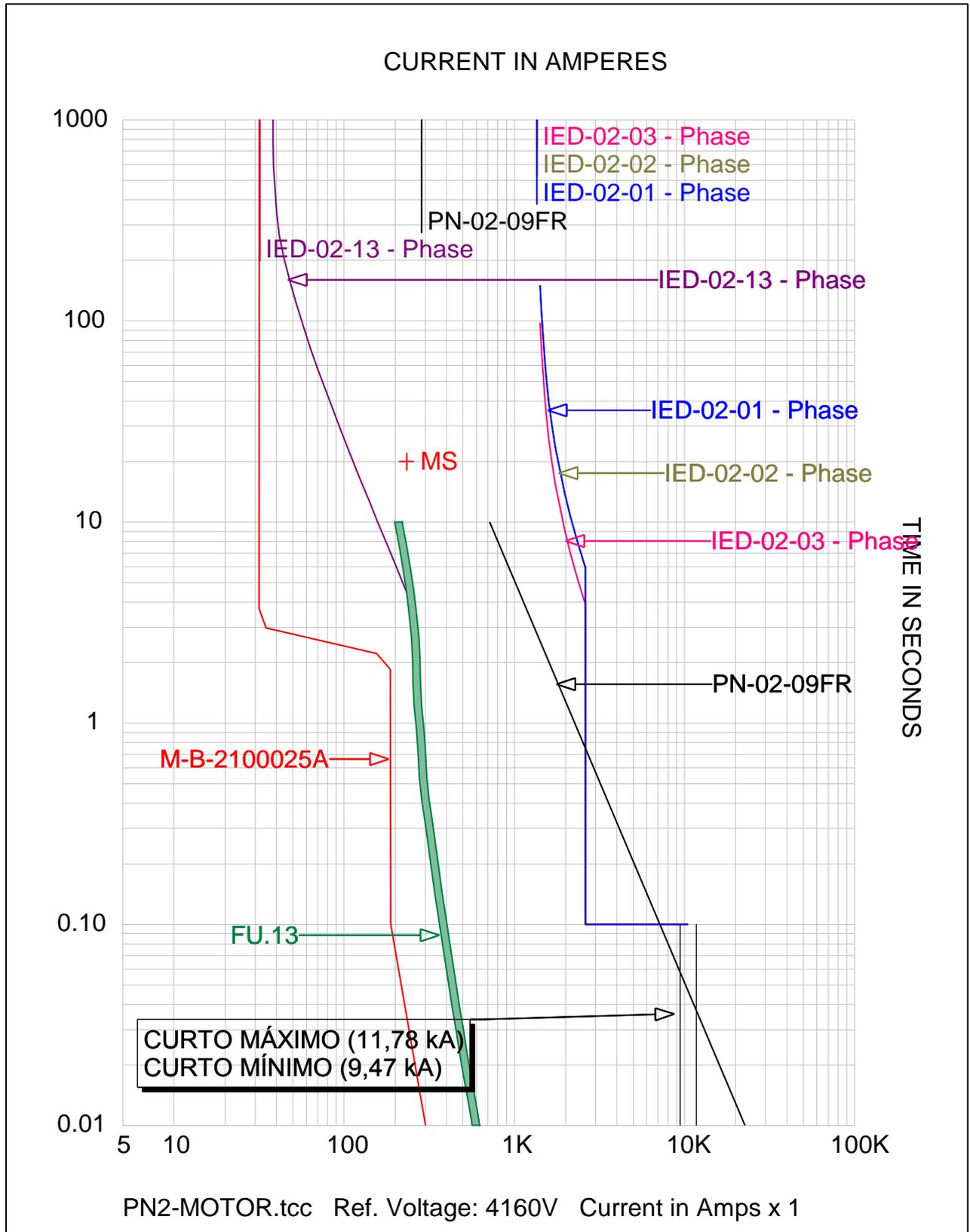


Figura 4. 8: Curva tempo x corrente da coordenação da proteção da alimentação do PN-210002 e do motor

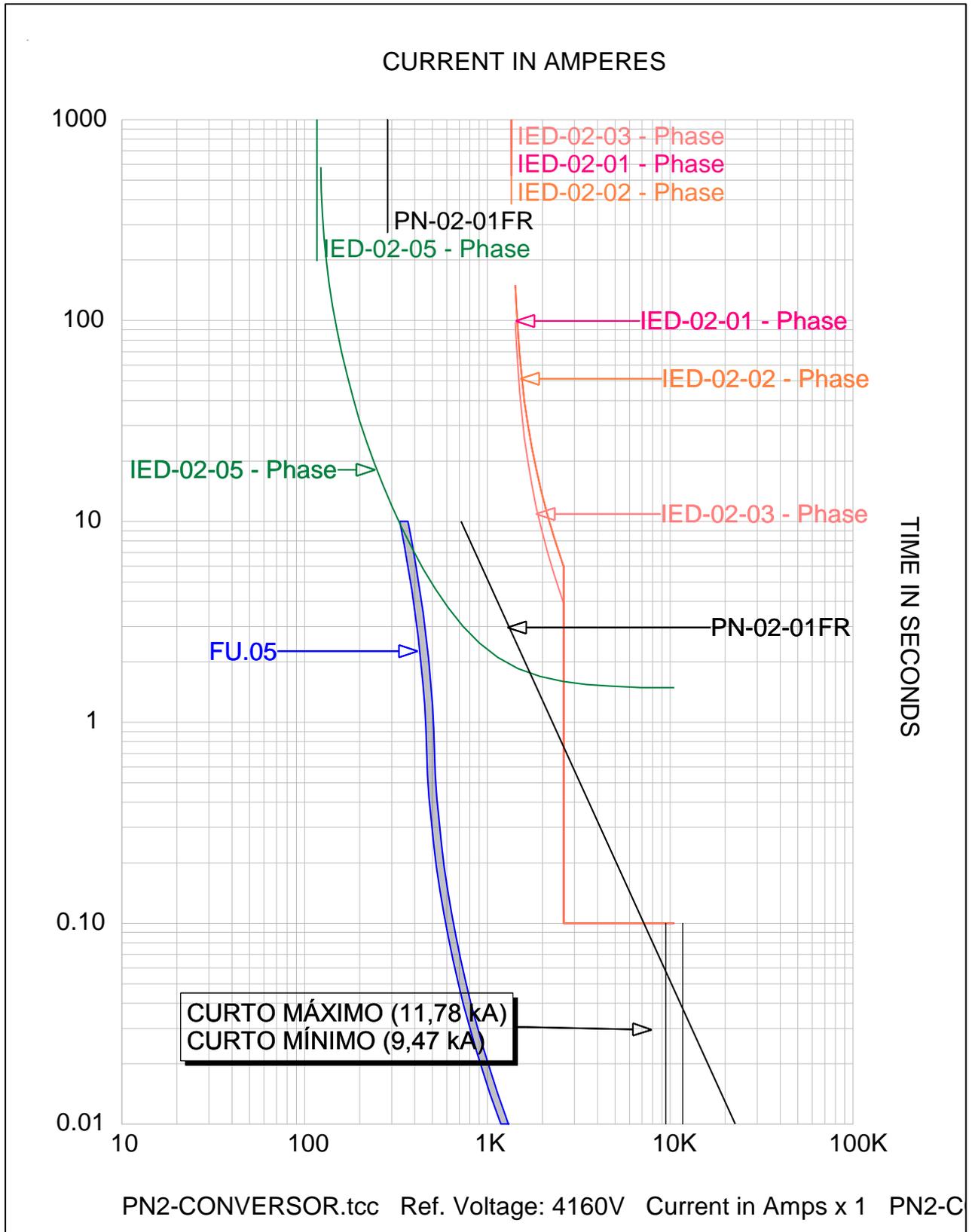


Figura 4. 9: Curva tempo x corrente da alimentação do PN-2100002 e do conversor

4.3.6. Alimentação de CDC em 480V e conversor de frequência

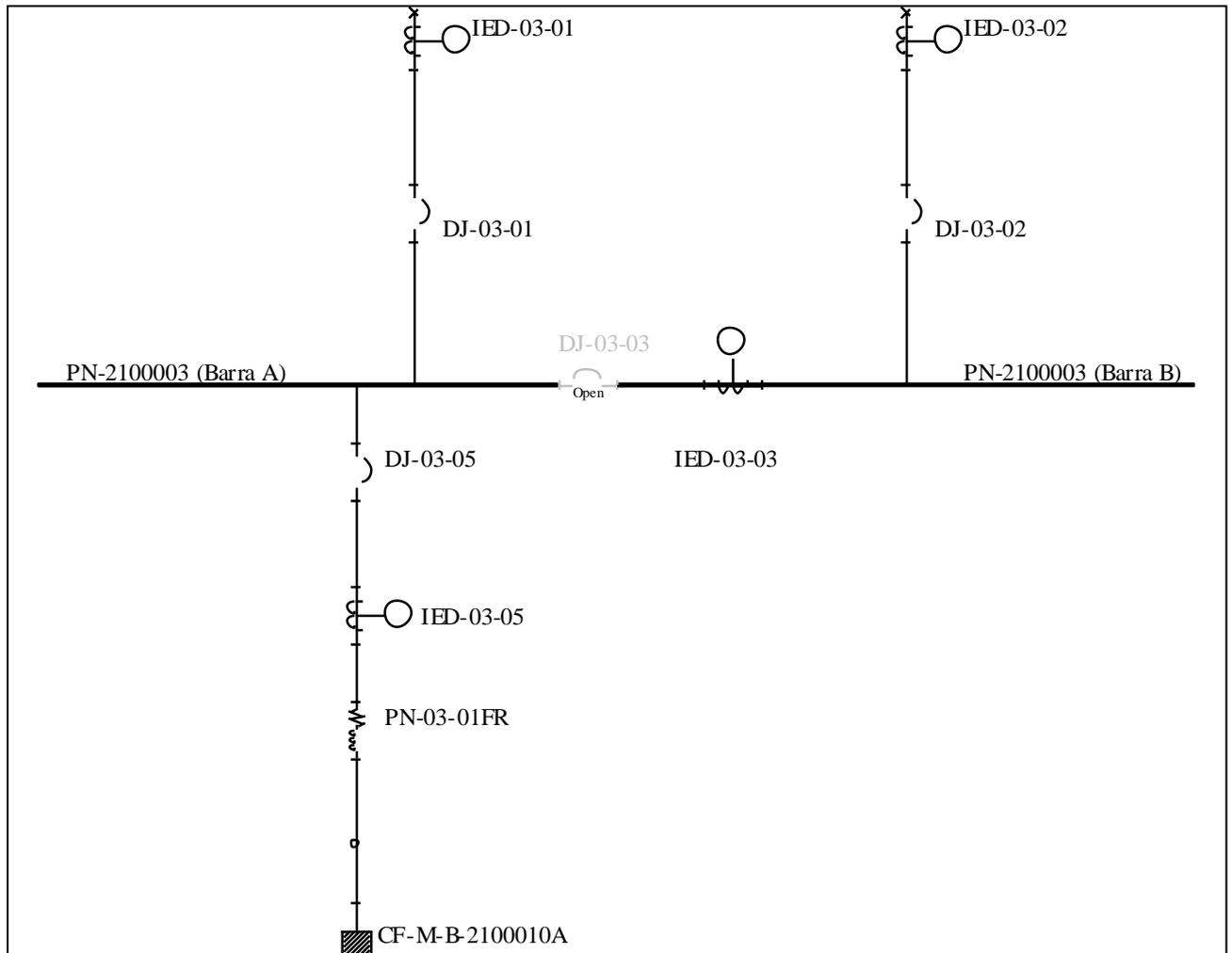


Figura 4. 10: Alimentação de CDC e saída para conversor de frequência

Agora é apresentado um circuito de baixa tensão que alimenta uma carga estática. Nota-se que o curto é protegido por um disjuntor ao invés de fusível, como explorado no capítulo 2.

Pode-se observar também que com a presença do IED ajustamos a função 51 e não a 49 como no caso anterior e por isso obtemos mais precisão já que a ausência da faixa de tolerância facilita a coordenação.

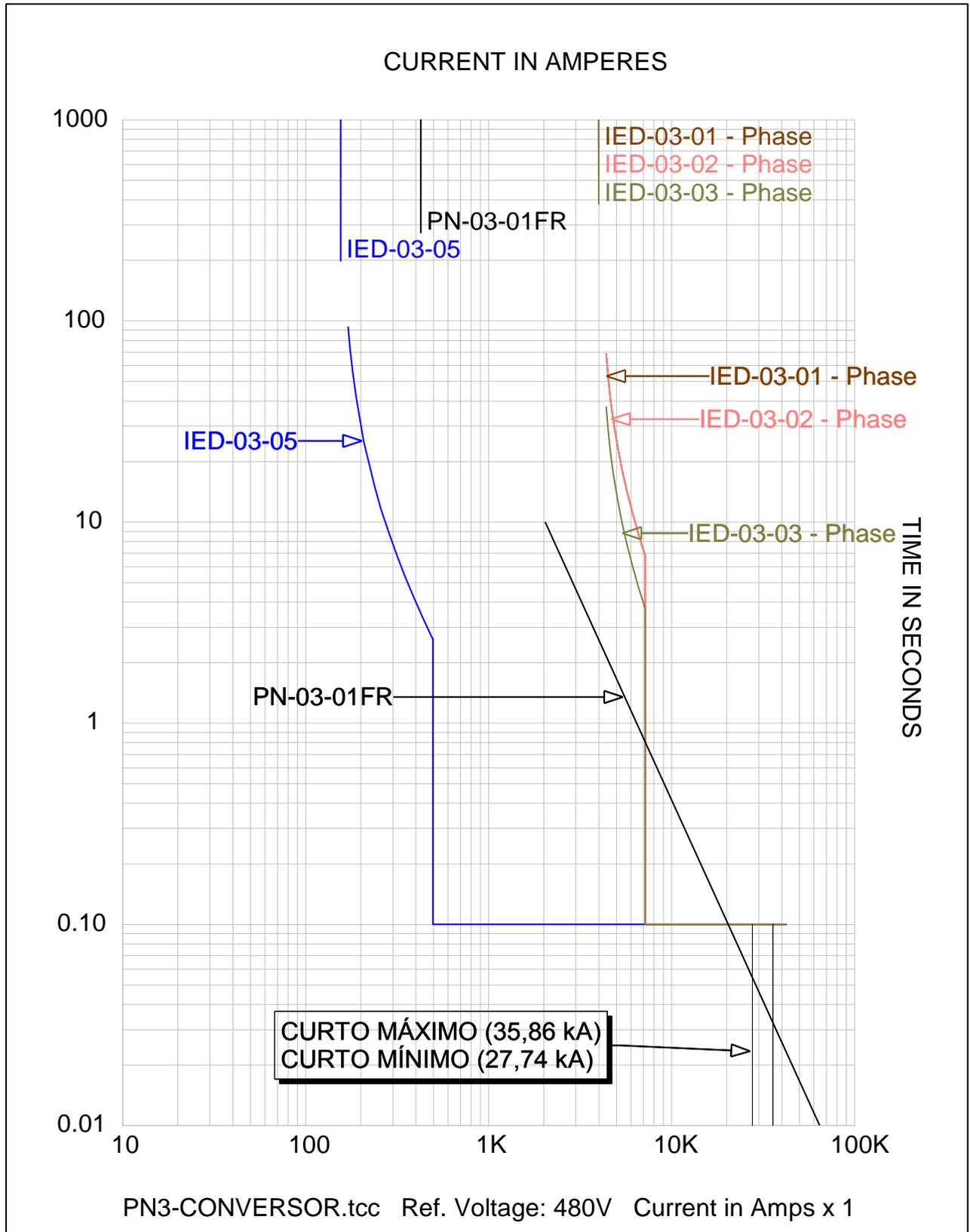


Figura 4. 11: Curva tempo x corrente para alimentação de CDC e para conversor de frequência

4.3.7. Alimentação de CCM, alimentação de motor e conversor de frequência

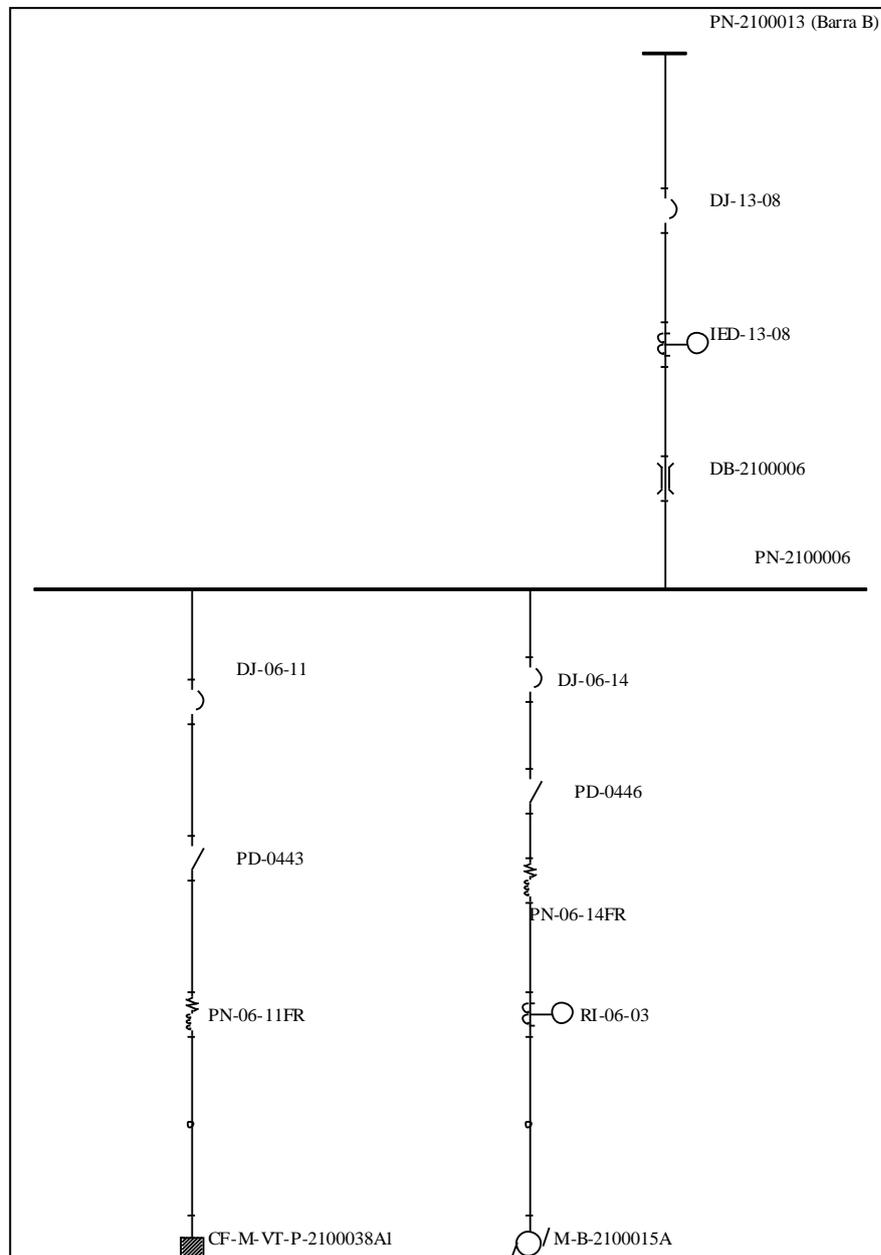


Figura 4. 12: Alimentação de CCM, motor e conversor.

Aqui é apresentado a entrada de um CCM e a saída de duas cargas, uma conversor e um motor. Pode-se notar que no circuito do motor há um relé inteligente. Este é necessário para haver comunicação com a rede profibus DP. O conversor já possui uma função que faz tal comunicação, por este motivo não é necessário um dispositivo inteligente em sua proteção.

Nota-se que para o motor a proteção de sobrecarga é feita pela função 49 do relé inteligente e a proteção contra curto-circuito é feita pela função 50 do disjuntor.

Como já foi discorrido anteriormente, os certificados de coordenação são obtidos para um conjunto específico de equipamentos da gaveta. Neste caso, para motores de baixa potência, pode ser que a menor gaveta testada para a coordenação especificada não seja capaz de garantir a proteção e seletividade.

Nesta situação, pode ser que a função ANSI 50 do disjuntor do circuito seja muito grande em magnitude para o ajuste da função 49 do relé inteligente, acarretando em uma zona não seletiva.

Assim, cabe ao engenheiro do projeto, no momento da análise das propostas de painéis, analisar essas situações limites, evitando que o problema seja identificado apenas ao final do projeto.

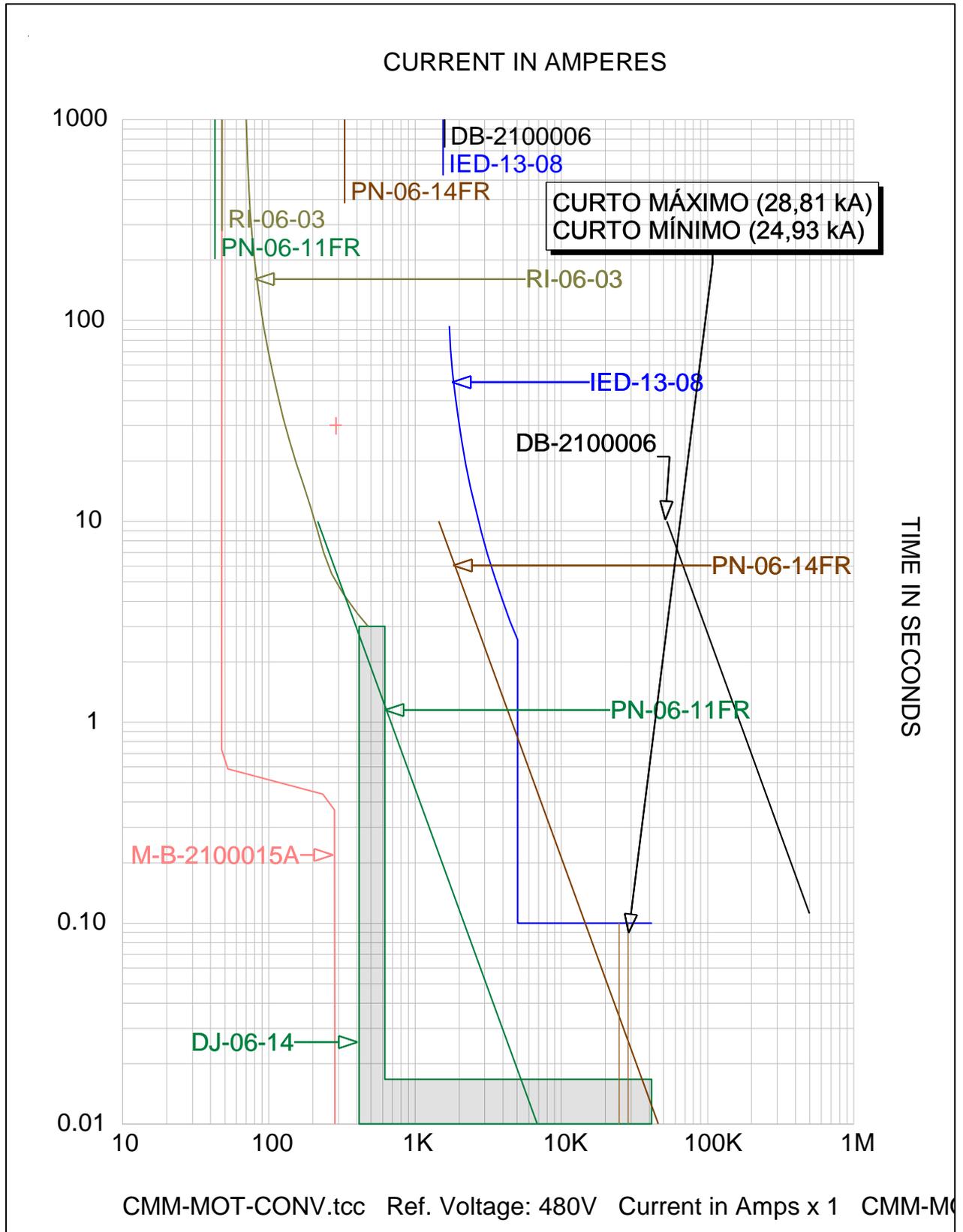


Figura 4. 13: Curva tempo x corrente da alimentação de CCM, motor e conversor.

5. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo compreender o assunto de proteção, coordenação e seletividade, além do método para o cálculo dos ajustes e os funcionamentos dos dispositivos envolvidos, com o intuito de aplicá-los a um estudo de caso.

Foi apresentada uma breve introdução sobre os equipamentos utilizados na proteção de um sistema elétrico industrial, além dos fenômenos físicos das anomalias associadas aos principais equipamentos. Com base na literatura e no conhecimento técnico da área de projetos, calculou-se os ajustes dos dispositivos de proteção para cubículos/gavetas típicos através de um estudo de caso, no qual, foi criado os diagramas típicos de proteção e seletividade. Ao final deste trabalho, foi possível desenvolver e compreender toda a cadeia produtiva de um estudo de coordenação e seletividade.

A utilização do programa PTW (Power Tools for Windows) foi fundamental para o estudo realizado, pois a partir das funcionalidades disponíveis, foi possível obter de maneira simples os ajustes dos dispositivos de proteção, as curvas de dano dos equipamentos protegidos, além da geração das curvas tempo x corrente.

O estudo de coordenação e seletividade tem um papel fundamental no funcionamento do sistema, pois dele depende a segurança da operação e do operador, a proteção dos equipamentos, a continuidade do fornecimento de energia, entre outras funções.

A partir do estudo de caso foi possível compreender o quão importante são as informações contidas em outros documentos de engenharia e como elas são utilizadas no estudo de coordenação e seletividade.

De forma clara, esse trabalho oferece ao leitor uma abordagem estruturada para proteção de sistemas elétricos industriais e pode servir de premissa para a definição de outros estudos.

Outro ponto a destacar foi a oportunidade de utilizar uma das ferramentas mais eficazes e reconhecidas no mercado de engenharia, o PTW (Power Tools for Windows), software desenvolvido pela SKM Systems, que se propõe a oferecer a interface gráfica e a modelagem dos equipamentos necessárias para a elaboração do estudo.

Através do estudo de caso, foi possível observar várias formas de proteger os circuitos elétricos dependendo da estrutura e características dos painéis (CCM ou CDC).

Uma relevante constatação retirada do estudo de caso é a importância de, já na fase de propostas, analisar a aplicação das gavetas de CCM certificadas conforme coordenação para os menores motores.

5.1. Trabalho futuros

- Estudo de Energia Incidente - de posse dos ajustes de proteção aqui calculados, há a possibilidade de, seguindo as normas ANSI, avaliar a energia incidente nos painéis quando da ocorrência de um arco elétrico.
- Utilizar os conceitos aplicáveis em uma subestação de alta tensão.
- Mapear de forma estruturada, para uma empresa de projetos de engenharia, todas as informações e documentos de referência necessários a fim de criar um procedimento para elaboração de tal estudo.

Referências Bibliográficas

- [1] A. C. Caminha, *Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos*, São Paulo: Edgard Blücher Ltda , 1977.
- [2] “Schneider Electric,” [Online]. Available: http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/apostila_procobre_eficienc.pdf. [Acesso em 18 Outubro 2013].
- [3] F. Zemetek, “moodle.stoa.usp.br,” [Online]. Available: http://moodle.stoa.usp.br/file.php/1465/teoria/motores_eletricos.pdf. [Acesso em 15 Novembro 2013].
- [4] “Revista O Setor Elétrico,” [Online]. Available: <http://www.osetoelettrico.com.br/web/a-revista/fasciculos/442-capitulo-viii-protECAo-de-motores.html?catid=51%3Aprotecao-e-seletividade>. [Acesso em 21 Setembro 2013].
- [5] R. Bulgarelli, *Proteção Térmica de Motores de Indução Trifásicos Industriais*, São Paulo, 2006.
- [6] J. Mamede Filho, *Manual de Equipamentos Elétricos*, 3ª Edição ed., Rio de Janeiro: LTC, 2005.

Anexo

