

unesp  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ANDRÉ KOJI FUJIMOTO TAMBA

O USO DE SOFTWARE PARA ESTUDO DE SELETIVIDADE E COORDENAÇÃO.

Guaratinguetá
2013

ANDRÉ KOJI FUJIMOTO TAMBA

O USO DE SOFTWARE PARA ESTUDO DE SELETIVIDADE E
COORDENAÇÃO.

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

Orientador: Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli

Guaratinguetá
2013

T154u	<p>Tamba, André Koji Fujimoto</p> <p>O uso de software para estudo de seletividade e coordenação / André Koji Fujimoto Tamba – Guaratinguetá : [s.n], 2012.</p> <p>91 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 88-90</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli</p> <p>1. Indústria - Instalações elétricas I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.316.17</p>
-------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

O USO DE SOFTWARE PARA ESTUDO DE SELETIVIDADE E COORDENAÇÃO

ANDRÉ KOJI FUJIMOTO TAMBA

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

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


Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. DURVAL LUIZ SILVA RICCIULLI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. DANIEL JULIEN BARROS DA SILVA SAMPAIO
UNESP-FEG


Prof. Me. FERNANDO RIBEIRO FILADELFO
UNESP-FEG

Março de 2013

DADOS CURRICULARES

ANDRÉ KOJI FUJIMOTO TAMBA

NASCIMENTO	04.01.1986 – GUARULHOS / SP
FILIAÇÃO	Júlio Sadao Tamba Marli Kiyomi Fujimoto Tamba
2005/2013	Curso de Graduação Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia campus Guaratinguetá

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente e principalmente à minha família, pois ela é a principal responsável pelo ser humano que sou hoje.

Só cheguei até esta fase final deste curso de graduação graças aos professores, não só no sentido de ensinamentos curriculares, mas principalmente na formação de cidadão. Agradeço muito a cada um que contribuiu, mesmo que pouco, mas que me fizeram ser o que sou. A formação e educação que levo comigo são frutos de cada palavra dita, de cada matéria apresentada, de cada chamada de atenção, de cada agradecimento, de cada confraternização, de cada segundo vivido em sala de aula e fora dela, pois a amizade e aprendizado não se restringem à sala de aula.

Agradeço à minha segunda família, com a qual convivi quase que todos os dias da vida universitária, a família da minha república. Local onde passei grande parte do tempo livre, onde aprendi muitos valores da vida, fiz grandes amigos, enfim minha casa durante a jornada acadêmica. Casa a qual circularam grandes seres humanos, que se tornaram grandes amigos, quase irmãos, devido à convivência diária.

Agradeço à minha namorada pela paciência que teve, por me aguentar nos momentos ruins, por me incentivar sempre que precisei, por me acolher nos maus momentos, mas principalmente por me fazer ver a vida de uma maneira diferente. Foi a grande responsável, mesmo sem saber e fazer nada, por me erguer e permitir finalizar a longa e árdua vida universitária do curso de Engenharia Elétrica.

Agradeço a todos que fizeram parte dessa jornada acadêmica que chega ao fim com esse trabalho de graduação. Grandes amigos que acompanhei durante anos, nos bons e nos maus momentos, nas alegrias e nas dificuldades, mas que a cada dia sempre estiveram comigo apoiando e ajudando sempre que precisei.

“A formação acadêmica se deve aos professores, à faculdade, mas principalmente a cada esforço e vontade em aprender de cada um. Porém tudo que aprendemos, seja na escola, na faculdade, no trabalho um dia pode se perder, mas duas características a vida nos ensina e são para sempre: a dignidade e o ser humano, não no sentido de objeto, mas no sentido do verbo: o respeito, a bondade, a educação.”

Adaptado, Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

TAMBA, A. K. F. **O uso de software para estudo de seletividade e coordenação.** 2013. 91f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a elaboração de um estudo de coordenação e seletividade em um sistema elétrico isolado com o auxílio do *software* computacional PTW (*Power Tools for Windows*). Com base nas devidas normas de proteções, nos dados dos equipamentos e levantamento das curvas de “tempo *versus* corrente” (*Time Current Curve - TCC*), são definidos os ajustes das proteções a fim de deixar o sistema seletivo, coordenado e devidamente protegido. As definições dos ajustes são feitas levando-se em conta os dados das chamadas curvas térmicas dos equipamentos, que levam em conta a corrente nominal e a suportabilidade de corrente de curto-circuito dos equipamentos e cabos envolvidos na instalação em questão. Para tanto se utiliza de ferramentas disponibilizadas pelo *PTW* no qual é simulado um circuito elétrico industrial, apresentando e discutindo os resultados. Com isso se valida o *software* PTW, tendo-o como uma ótima ferramenta auxiliadora na execução de estudo de coordenação e seletividade.

PALAVRAS-CHAVE: estudo de coordenação e seletividade, *Time Current Curve*. proteções

TAMBA, A. K. F. **The software use for coordination and selectivity study.** 2013. 91f. Graduate Work (Graduation in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

The present work aims to prepare a study of selectivity and coordination in an isolated electrical system with the aid of computer software PTW (Power Tools for Windows). Based on appropriate protection standards, on equipment data and the survey of the curves of “time versus current” (Time Current Curve – TCC), may be defined protection settings to leave the system selective, coordinated and properly protected. Definitions of adjustments are made taking into account the data of, so called, thermal curves of the equipment, which take into account the rated current and the supportability of short-circuit current of the equipment and cables involved in the installation in question. For that we use the tools provided by the PTW in which an industrial electrical circuit is simulated, presenting and discussing the results. With that validates the software PTW, taking it as a great tool helper implementation the coordination and selectivity study.

PALAVRAS-CHAVE: selectivity and coordination study, Time Current Curve. protections

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Folha <i>di-log</i> para geração de gráficos TCC	18
Figura 2: Exemplo de fusíveis	19
Figura 3: Curva típica de fusível	21
Figura 4: Disjuntores de baixa tensão, da esquerda para a direita: modulares, caixa moldada e abertos.....	22
Figura 5: Curva típica de disjuntor de baixa tensão	23
Figura 6: Curva de atuação de disjuntor com ajustes mecânicos	24
Figura 7: Curva típica de disjuntor regulável com disparador eletrônico	25
Figura 8: Relés digitais de proteção	27
Figura 9: Curvas dependentes, padrão ANSI	29
Figura 10: Tipos de Transformadores de Corrente.....	30
Figura 11: Transformadores: isolado em óleo e seco	33
Figura 12: Curva térmica do transformador	34
Figura 13: Cabos de baixa tensão	37
Figura 14: Curva térmica de cabo de baixa tensão	38
Figura 15: Motores de indução trifásicos	39
Figura 16: Curva típica de motor de indução trifásico com partida direta	41
Figura 17: Bancos de capacitores	43
Figura 18: Interface de ajuste e geração de curvas TCC	51
Figura 19: Interface da biblioteca com a edição de dispositivo	52
Figura 20: Interface geral do programa para criação e/ou edição de diagrama unifilar	53

Figura 21: Exemplo de relatório gerado pelo software	54
Figura 22: Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico	56
Figura 23: Proteção da entrada do sistema e primário do transformador de entrada	61
Figura 24: Proteção do secundário do transformador de entrada (TF-01)	62
Figura 25: Curva de proteção do Motor 1	63
Figura 26: Proteção do Motor 2	64
Figura 27: Motor 3 e sua proteção	65
Figura 28: Proteção para a Carga 1	66
Figura 29: Curva de atuação da proteção da Carga 2	67
Figura 30: Proteção para o Motor 4	68
Figura 31: Proteção do Motor 5	69
Figura 32: Curva de atuação da proteção do Banco de Capacitores	70
Figura 33: Proteção da entrada do Painel de 220V	71
Figura 34: Proteção do Motor 6	72
Figura 35: Curva da proteção do Motor 7	73
Figura 36: Proteção do Motor 8	74
Figura 37: Proteção da Carga 3	75
Figura 38: Curvas de proteção da Carga 4	76
Figura 39: TCC da Carga 5 e suas proteções	77
Figura 40: Proteção do UPS 2	78
Figura 41: Proteção do painel de iluminação e tomada	79
Figura 42: Proteção do circuito de iluminação IL 1	80
Figura 43: Proteção do circuito de iluminação IL 2	81

Figura 44: Proteção do circuito de iluminação IL 3	82
Figura 45: Proteção do circuito tomadas de uso geral TUG	83
Figura 46: Proteção do UPS 1	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Constantes das Curvas	29
Tabela 2: Categorias de Transformadores segundo norma IEEE Std. 242	36
Tabela 3: Motores de Indução trifásico	57
Tabela 4: Transformadores de potência	57
Tabela 5: Lista de cabos	58
Tabela 6: Cargas não motóricas	58
Tabela 7: Resumo dos níveis de curto circuito	59
Tabela 8: Resumo dos valores de ajustes de proteções dos equipamentos	60
Tabela 9: Resumo de cargas e proteções	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	– <i>American National Standards Institute</i>
CAD	– <i>Computer-Aided Design</i>
CC	– Curto Circuito
IEC	– <i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	– <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NBR	– Norma Brasileira
PAC	– Programa de Aceleração ao Crescimento
PTW	– <i>Power Tools for Windows</i>
STD	– <i>Standard</i>
TC	– Transformador de Corrente
TCC	– <i>Time Current Curve</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos.....	15
1.2	Organização do trabalho.....	16
2	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO, COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE.....	17
2.1	Dispositivos básicos de proteção.....	19
2.1.1	Fusíveis.....	19
2.1.2	Disjuntores para baixa tensão.....	21
2.2	Dispositivos auxiliares de proteção.....	26
2.2.1	Relés digitais de proteção.....	26
2.2.2	Transformadores de Corrente (TC).....	30
3	PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS PROTEGIDOS.....	33
3.1	Transformadores de potência.....	33
3.2	Cabos de baixa tensão.....	36
3.3	Motores de indução trifásicos.....	38
3.4	Banco de capacitores.....	41
4	SELETIVIDADE E PRINCIPAIS AJUSTES CONSIDERADOS.....	44
4.1	A seletividade.....	44
4.2	Critérios de ajustes das proteções.....	45
4.2.1	Critérios para transformadores de potência.....	46
4.2.2	Critérios para cabos de baixa tensão.....	47
4.2.3	Critérios para motores de indução trifásicos.....	47
4.2.4	Critérios para banco de capacitores.....	49
5	O SOFTWARE PTW.....	50
6	ESTUDO DE CASO DO SISTEMA ELÉTRICO.....	55
7	RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO.....	59
8	CONCLUSÕES E DISCUSSÕES DO TEMA ABORDADO.....	86
	REFERÊNCIAS.....	88
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	89

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é hoje um dos grandes países em expansão econômica e que futuramente poderá se tornar uma das grandes potências mundiais. Isso se deve principalmente às grandes riquezas naturais que possui. Tendo em vista esse futuro promissor o governo lançou diversos incentivos e injetou grandes quantidades de dinheiro em obras que virão a fornecer a base para a consolidação dessa economia.

O chamado Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) visa, conforme o próprio nome diz, acelerar o crescimento do país. Para tanto bilhões de reais foram, são e serão investidos principalmente em obras de infraestrutura, para dar base à economia e preparar o país para receber os investimentos internacionais nos mais diversos setores da economia.

A maior parte dos investimentos está direcionada na área de geração e transmissão de energia elétrica, a fim de aliviar o atual sistema que opera praticamente no limite da capacidade em horários de pico, permitindo que novas indústrias sejam montadas no Brasil e também distribuir melhor a energia elétrica ao longo do país, podendo fornecer energia elétrica em regiões onde essa não existia.

O sistema elétrico brasileiro é bastante amplo, devido principalmente à extensão territorial e também à cultura de se utilizar a eletricidade como fonte energética e, com isso, possui grande complexidade uma vez que é fortemente integrado e possui diversos meios de geração e padrões de distribuição devido às diversas empresas que a controlam, sendo necessários diversos ajustes e regulagens, a fim de se ter energia elétrica de qualidade.

Uma das grandes preocupações é com o sistema de proteções, independente da instalação elétrica, seja ela residencial, comercial, industrial ou até mesmo uma subestação de uma cidade. Uma proteção bem dimensionada e ajustada é essencial para que equipamentos não sejam danificados e também para que não haja interrupção no fornecimento de energia elétrica.

O sistema de proteção deve ser muito bem dimensionado, parametrizado e ajustado, a fim de garantir o fornecimento ou uso de energia elétrica de maneira contínua e segura, interrompendo o fornecimento no ponto com problema e deixá-lo isolado do restante da instalação, sem que outros pontos sejam prejudicados, ou seja, o sistema estará coordenado e seletivo, garantindo assim a integridade da instalação elétrica, dos equipamentos por ela alimentados e também das pessoas que operam e circulam próximas à instalação.

Para garantir tais fatos, é necessário que o sistema de proteção possua as seguintes características:

- Rapidez: as proteções devem atuar no menor tempo possível a partir da detecção da falha;
- Confiabilidade: os dispositivos de proteção devem atuar de maneira correta: coordenada e seletiva; com isso garante-se a isolação e não propagação da falha;
- Robustez: as proteções devem suportar os níveis de curto circuito (CC) do sistema para que os mesmos não se danifiquem ou levem a causar algum acidente.

Para garantir o correto funcionamento dos dispositivos de proteção são feitos estudos elétricos que visam ajustar os dispositivos e também verificar as curvas de “tempo *versus* corrente” garantindo, com isso, a seletividade e coordenação das proteções.

A coordenação é feita através de uma sequência temporal de atuação dos dispositivos, a sequência de ajustes é feita no sentido do dispositivo de vanguarda para os de retaguarda, com isso garante-se que a proteção de uma carga atue antes da proteção do sistema todo. A seletividade das proteções é feita com ajustes de corrente dos dispositivos, valendo a mesma lógica da coordenação, devendo a mesma garantir que a parcela do sistema que apresenta falha seja isolada do restante do sistema.

Atualmente, *softwares* computacionais são utilizados para levantar as curvas tempo x corrente, sendo possível a visualização e validação dos ajustes dos dispositivos de proteção de maneira simples e rápida, precisa e confiável, podendo, com isso, visualizar todo sistema de proteção e seus ajustes na fase de projeto, garantindo uma instalação elétrica segura e confiável.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo de coordenação e seletividade, utilizando como base para geração de resultados o *software* PTW. Para tanto é utilizado um modelo no qual são estudados os ajustes de cada dispositivo (relé, disjuntor e fusível) a fim de proteger o sistema de forma coordenada e seletiva, levando-se em conta as características de cada dispositivo de proteção, a relação de transformação dos transformadores de corrente, as correntes de CC de cada barramento do sistema e as características dos equipamentos envolvidos, tais como cabos, transformadores e motores.

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho é organizado da seguinte maneira:

- Capítulo 2: Descreve as características dos dispositivos de proteção utilizados na simulação do sistema em questão, tais como: disjuntores reguláveis de baixa tensão, relés microprocessados, transformadores de corrente (TC) e fusíveis;
- Capítulo 3: São apresentados os equipamentos principais que são protegidos, descrevendo os parâmetros elétricos mais importantes de cada dispositivo;
- Capítulo 4: São apresentados os critérios de proteção bem como os ajustes dos dispositivos.
- Capítulo 5: Este capítulo é dedicado a uma rápida descrição do *software* utilizado neste trabalho;
- Capítulo 6: Neste capítulo é descrito o sistema elétrico cujas proteções são estudadas e simuladas, indicando o diagrama unifilar da instalação, as características dos componentes do sistema e o nível de CC dos barramentos e do padrão de entrada;
- Capítulo 7: Levanta os resultados obtidos com a simulação e os discute, validando-os ou recomendando novos ajustes;
- Capítulo 8: Apresenta as considerações finais do trabalho;

2 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO, COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

Por melhor que seja projetado e dimensionado, um sistema elétrico está sujeito a falhas uma vez que equipamentos dos mais diversos tipos são utilizados, tais como: motores, geradores, transformadores, fornos elétricos, entre outros, e podem apresentar problemas. Além disso, o sistema está propício a problemas de origem ambiental, como descargas atmosféricas, por exemplo, erros provenientes de falhas humanas, tal como erro de ligação de equipamentos, e também problemas relacionados com o fornecimento, como exemplo pode-se citar a instabilidade do sistema.

Estes problemas podem resultar em um curto-circuito, que deve ser eliminado o mais rápido possível a fim de evitar danos maiores ao sistema e outros equipamentos, tais como: comprometimento da isolação dos equipamentos (isolação da bobina de transformadores, por exemplo), queima de dispositivos eletrônicos (inversor de frequência, por exemplo) e danos aos cabos da instalação (um dos focos das proteções elétricas é garantir a integridade dos cabos).

Um sistema de proteção bem dimensionado, ou seja, que suporte o nível de curto circuito (CC) do sistema, que corte o fornecimento o mais rápido possível no ponto da falha e que garanta a isolação do problema, garante a integridade não só da instalação e dos equipamentos, mas também das pessoas que estejam trabalhando nos arredores.

Resumindo, para que o sistema de proteção atue da maneira como foi planejada, deve responder aos seguintes requisitos básicos (MAMEDE FILHO, 2002):

- Seletividade: capacidade do sistema de proteção em selecionar a parte falha do restante do sistema;
- Exatidão e segurança: sistema com alta confiabilidade operativa;
- Sensibilidade: faixa de valores no qual o dispositivo atua ou não.

Para que tudo isso seja garantido, diversos dispositivos de proteção são utilizados e estudos do sistema de proteção são realizados preliminarmente e também a cada mudança realizada no sistema. Nas seções seguintes são apresentados e descritos os dispositivos de proteção utilizados, bem como equipamentos auxiliares e também os estudos focados em sobrecorrente e curto circuito.

Normalmente os trabalhos realizados com proteções elétricas utilizam diversos critérios normatizados para ajustar as proteções, bem como efetuar cálculos de corrente e tempo de

ajustes para cada dispositivo de proteção. O resultado das proteções é visualizado em folhas do tipo logarítmico duplo, ou *di-log*, conforme Figura 1, nas quais são gerados gráficos de tempo por corrente dos equipamentos e dispositivos de proteção, as chamadas curvas TCC (*Time Current Curve*) que são utilizadas no estudo de coordenação e seletividade.

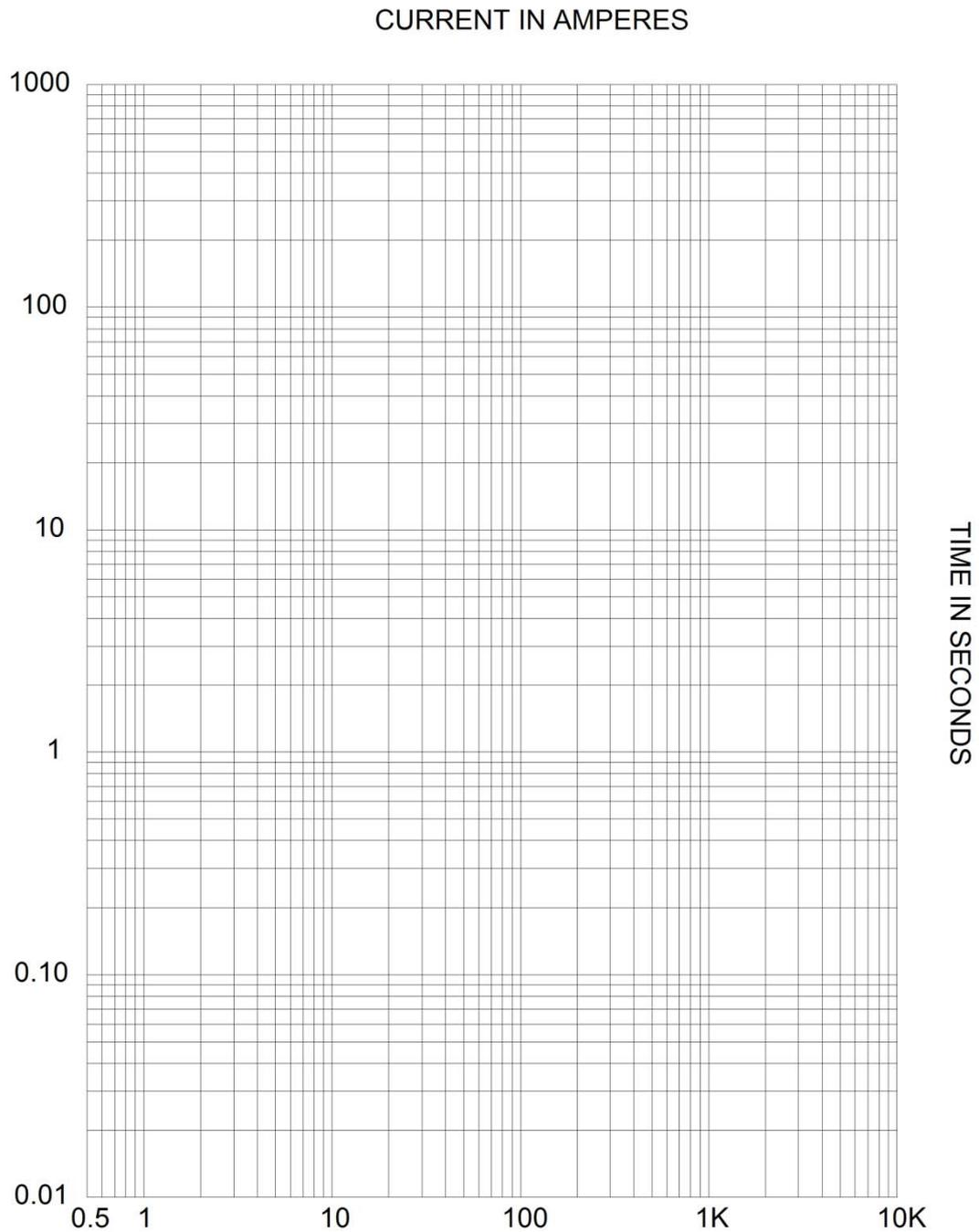


Figura 1: Folha *di-log* para geração de gráficos TCC (Fonte: PTW)

2.1 Dispositivos básicos de proteção

O foco do presente trabalho é o estudo envolvendo sobrecorrente e também curto circuito em um sistema elétrico de potência. No que diz respeito a dispositivos que exercem as funções de proteção os mais utilizados são: fusíveis, disjuntores e relés de proteção, os quais são apresentados a seguir descrevendo o funcionamento e também apresentando as curvas características de cada um (MAMEDE FILHO, 2002; IEEE STD. 242, 2001).

2.1.1 Fusíveis

Os fusíveis “são dispositivos destinados à proteção dos circuitos elétricos e que se fundem quando são percorridos por uma corrente de valor superior àquele para o qual foram projetados.” (MAMEDE FILHO, 2002, p.438). A Figura 2 mostra alguns modelos de fusíveis disponíveis no mercado, tais como fusíveis tipo faca, tipo *diazed*, ultra rápidos, entre outros.



Figura 2: Exemplo de fusíveis (Fonte:WEG)

Projetados para proteção contra sobrecorrente, são constituídos por um filamento ou placa metálica que se funde, devido ao efeito Joule, abrindo o circuito e interrompendo a circulação de corrente quando essa for superior à de projeto (IEEE 100, 2000).

Basicamente os fusíveis são classificados em fusíveis de alta tensão (tensão superior a um kilovolt) e de baixa tensão (tensão inferior a um kilovolt) (IEEE STD. 242, 2001). Pode-se dizer que essas são as duas grandes classes de fusíveis, dessas duas grandes classes derivam

os vários tipos de fusíveis existentes no mercado, cada um com suas características e curvas de tempo de fusão por corrente, no caso a curva *TCC* do dispositivo.

As principais características elétricas dos fusíveis são (MAMEDE FILHO, 2002, p.399):

- Corrente nominal: corrente máxima que o fusível pode operar por tempo indefinido sem apresentar aquecimento excessivo. Geralmente a corrente de fusão do fusível é 1,6 vezes a corrente nominal;
- Tensão nominal: tensão máxima de exercício do circuito em que o fusível deve operar regularmente;
- Capacidade de interrupção: corrente simétrica máxima de CC que o fusível é capaz de interromper, dentro das condições de operação.

Outro fator relevante dos fusíveis é referente à característica de atuação dos mesmos, podem ser classificados como: rápidos ou retardados. Os fusíveis de atuação rápida são geralmente empregados em circuitos que operam com corrente abaixo da nominal do fusível, como cargas resistivas. Já os de atuação retardada são empregados em circuitos onde há sobrecargas temporárias, como em motores e capacitores (MAMEDE FILHO, 2002, p.400).

Além disso, deve-se levar em conta a curva *TCC* característica de atuação dos fusíveis que apresenta uma faixa de imprecisão devido às características de tempo e fusão que o elemento condutor apresenta. Para um valor médio de corrente estabelece-se uma margem máxima de 15% para mais ou para menos, variando de valor de acordo com cada fabricante. Os valores máximo e mínimo em um mesmo instante de tempo da curva característica são utilizados para obter uma condição ótima de proteção de equipamentos. No caso do valor mínimo da curva, e o valor máximo é adotado para a coordenação dos dispositivos de proteção à montante do fusível (IEEE Std. 242, 2001).

A Figura 3 exemplifica uma curva de atuação de fusível para diversos valores de corrente nominal de atuação do mesmo sem levar em consideração a margem de tolerância permitida por norma.

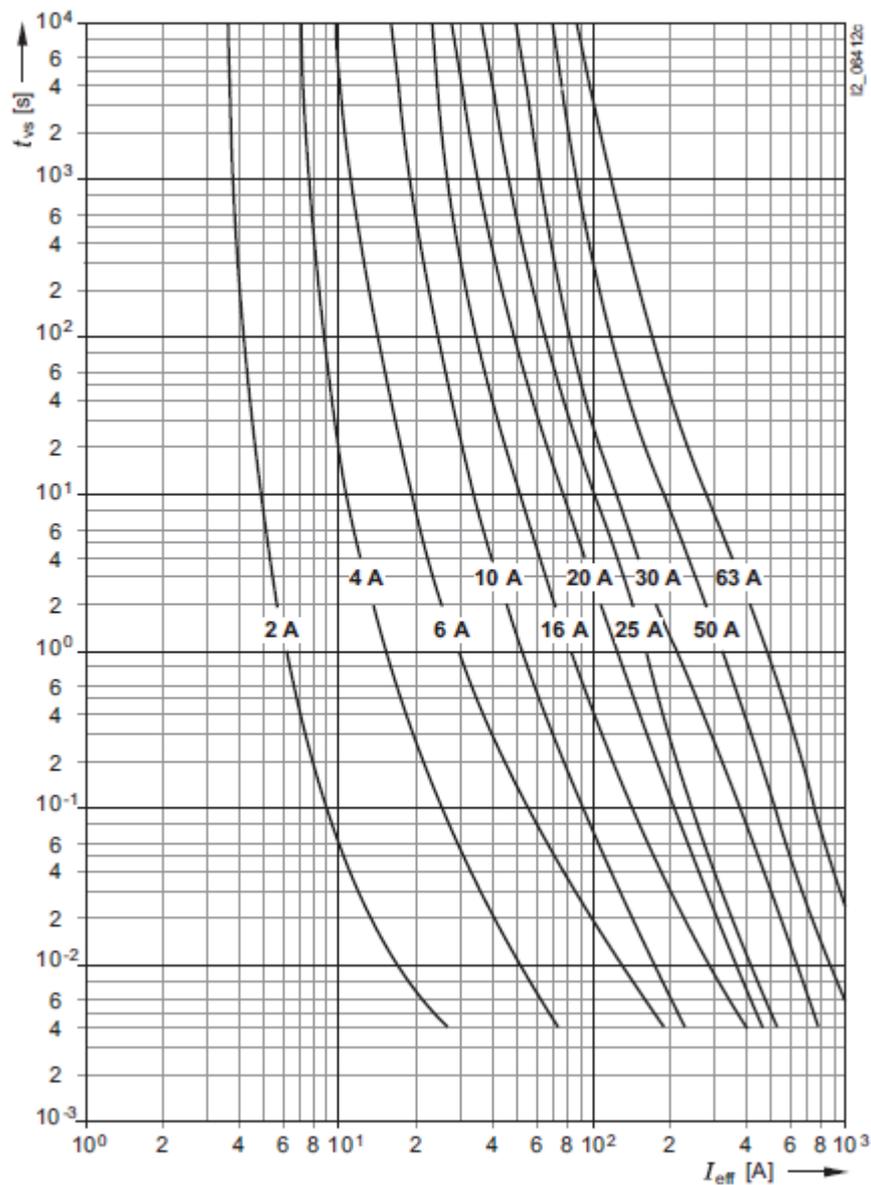


Figura 3: Curva típica de fusível (Fonte: Catálogo de fusíveis Siemens)

2.1.2 Disjuntores para baixa tensão

Disjuntores são dispositivos capazes de conduzir a corrente exigida pelo circuito, sob condições nominais, de maneira contínua e interromper o fluxo de corrente em condições anormais de sobrecarga ou de curto-circuito (MAMEDE FILHO, 2002, p.393). No caso, pode-se definir o disjuntor como sendo: “um dispositivo que pode realizar manobras de abertura e fechamento manuais e caso exposto a uma determinada sobrecorrente deve atuar abrindo o circuito automaticamente sem que haja danos ao mesmo” (IEEE Std. 242, 2001).

A principal característica deste dispositivo é que o mesmo não é descartável, podendo atuar várias vezes no circuito sem sofrer danos, ou seja, quando atua basta religar ou rearmar

o dispositivo que o mesmo estará pronto para atuar novamente. No caso do fusível, quando o mesmo atua, seu filamento se funde e o dispositivo deve ser substituído por um novo. Além disso, com a integração tecnológica dos dispositivos, é possível monitorar e comandar os disjuntores de maneira remota ou através de comandos com sinais analógicos oriundos de outros dispositivos ou equipamentos.

Comercialmente são encontrados diversos modelos de disjuntores termomagnéticos, divididos por categorias, dependendo do nível de CC da instalação e do nível de proteção exigidos na instalação. Basicamente há três tipos de disjuntores: disjuntores modulares (minidisjuntores), disjuntores de caixa moldada e disjuntores abertos (*Air Circuit Breaker*), também conhecidos como disjuntores tipo *Power*, conforme exemplos mostrados na Figura 4.



Figura 4: Disjuntores de baixa tensão, da esquerda para a direita: modulares, caixa moldada e abertos
(Fonte: Schneider Electric e WEG)

Alguns disjuntores possibilitam pequenos ajustes mecânicos, permitindo que um disjuntor atue em correntes menores que as nominais, em uma pequena gama de valores. Há também disjuntores que utilizam os chamados disparadores eletrônicos, ou seja, o controle de disparo (atuação do dispositivo) é feito de maneira eletrônica, baseado nos valores de corrente do circuito, similar a um relé digital, porém com maior simplicidade e custo menor. Com isso os valores de atuação dos dispositivos podem ser ajustados de acordo com a necessidade da instalação, tornando-os dispositivos bastante versáteis.

Para tanto, normalmente, são ajustados três parâmetros do dispositivo, que usualmente são identificados na curva característica do disjuntor, baseados no tempo e na corrente de atuação: tempo longo, tempo curto e instantânea (IEEE Std. 242, 2001).

Os disjuntores fixos, ou seja, aqueles que possuem o valor fixo de atuação possuem curva característica conforme Figura 5 e podem ser de dois tipos: os chamados minidisjuntores (ou disjuntores modulares) e os disjuntores de caixa moldada. Basicamente os minidisjuntores possuem curvas normatizadas, já os disjuntores caixa moldada possuem

curvas de atuação que dependem do fabricante e o nível de curto circuito que o mesmo suporta é maior que o dos minidisjuntores.

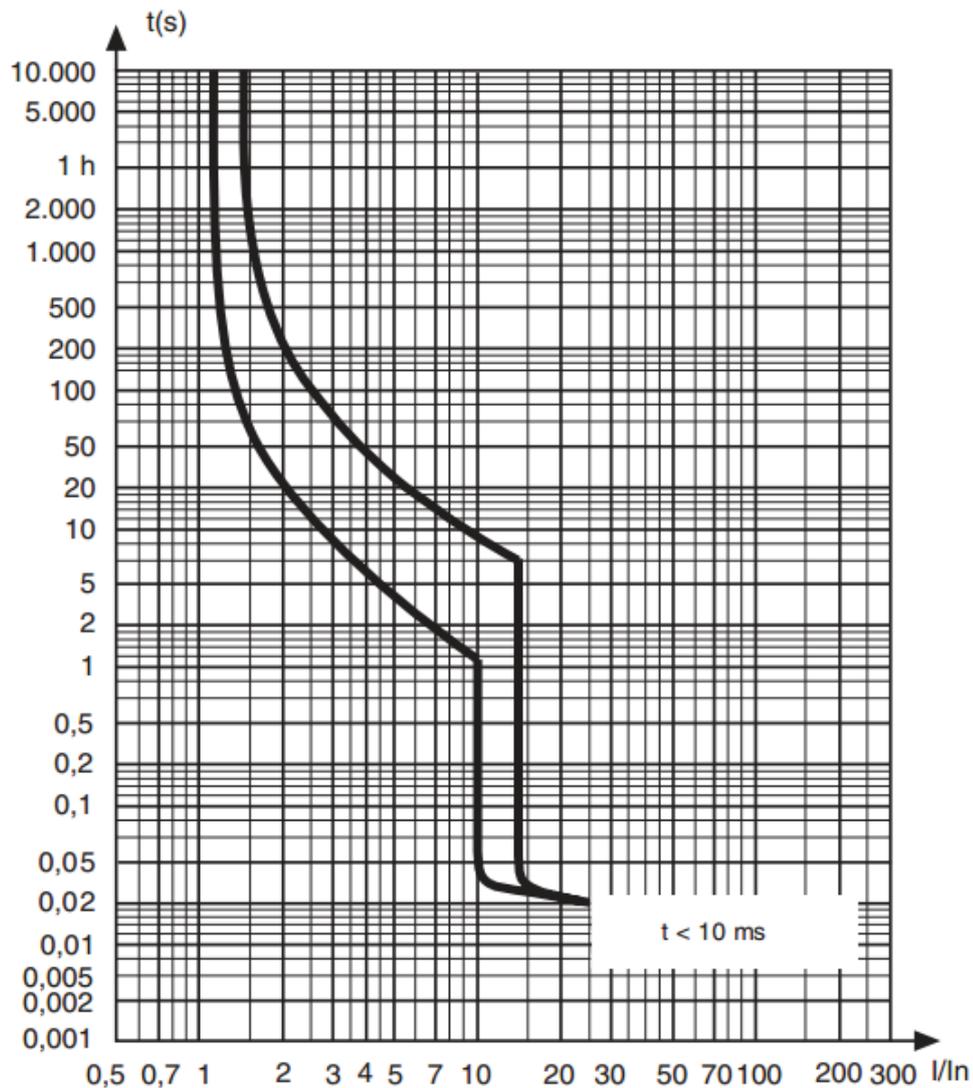


Figura 5: Curva típica de disjuntor de baixa tensão (Fonte: Catálogo de disjuntores Schneider)

Esse tipo de disjuntor possui a característica de atuar de maneira térmica ou magnética, de acordo com a magnitude da corrente a qual foi dimensionado a proteger. A atuação térmica se deve ao aquecimento, em função da sobrecorrente, das partes metálicas internas do dispositivo, com isso as mesmas se dilatam e fazem o disjuntor desarmar. Já atuação magnética se deve à variação brusca de corrente, ou seja, quando há um curto no circuito a corrente sobe rapidamente, essa brusca variação faz com que seja induzida uma corrente em bobinas internas, gerando assim um campo magnético que desloca um núcleo de material magnético, fazendo o dispositivo atuar e abrir o circuito.

Há também os disjuntores que permitem pequenos ajustes nos valores de corrente de atuação, conforme Figura 6, permitindo uma pequena flexibilidade de uso do disjuntor em questão.

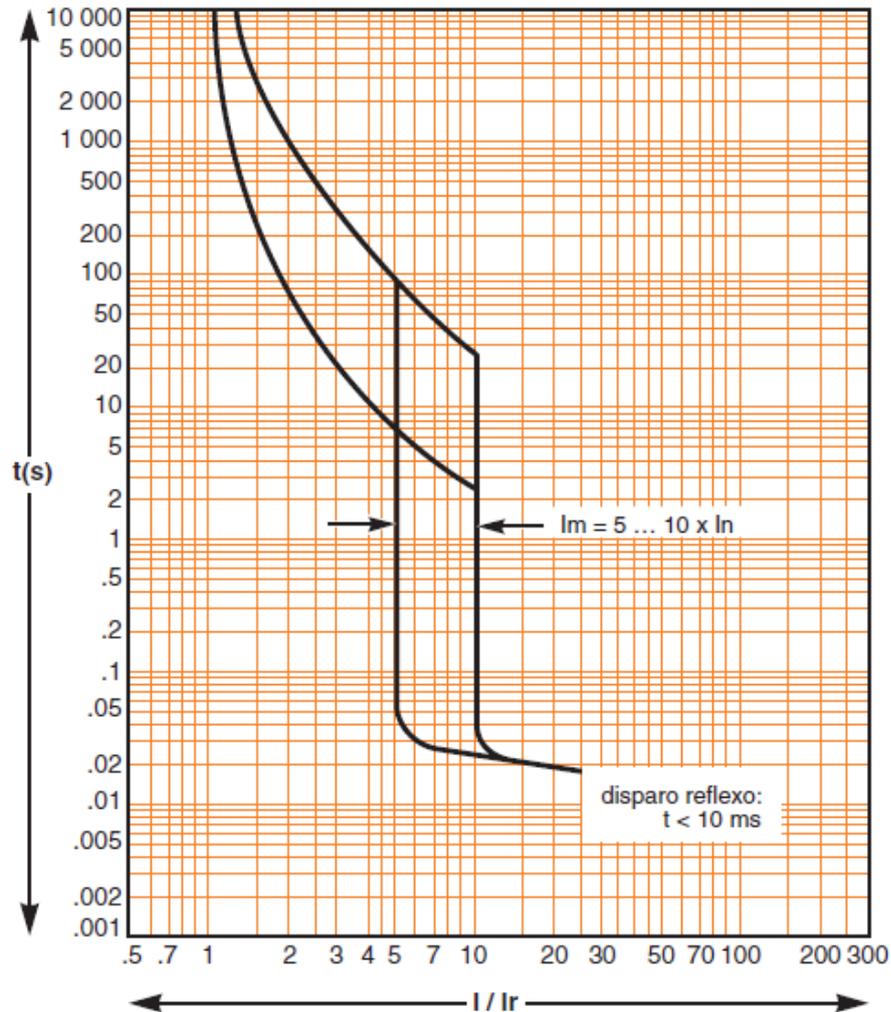


Figura 6: Curva de atuação de disjuntor com ajustes mecânicos (Fonte: Catálogo de disjuntores Schneider)

Já os disjuntores com disparadores eletrônicos apresentam a curva característica conforme Figura 7, os quais permitem pequenos ajustes de corrente nominal do circuito e também de corrente de curto-circuito, ou seja, na curva térmica e na curva magnética do dispositivo, permitindo uma flexibilidade maior em relação aos disjuntores modulares, porém são mais caros que os mesmos.

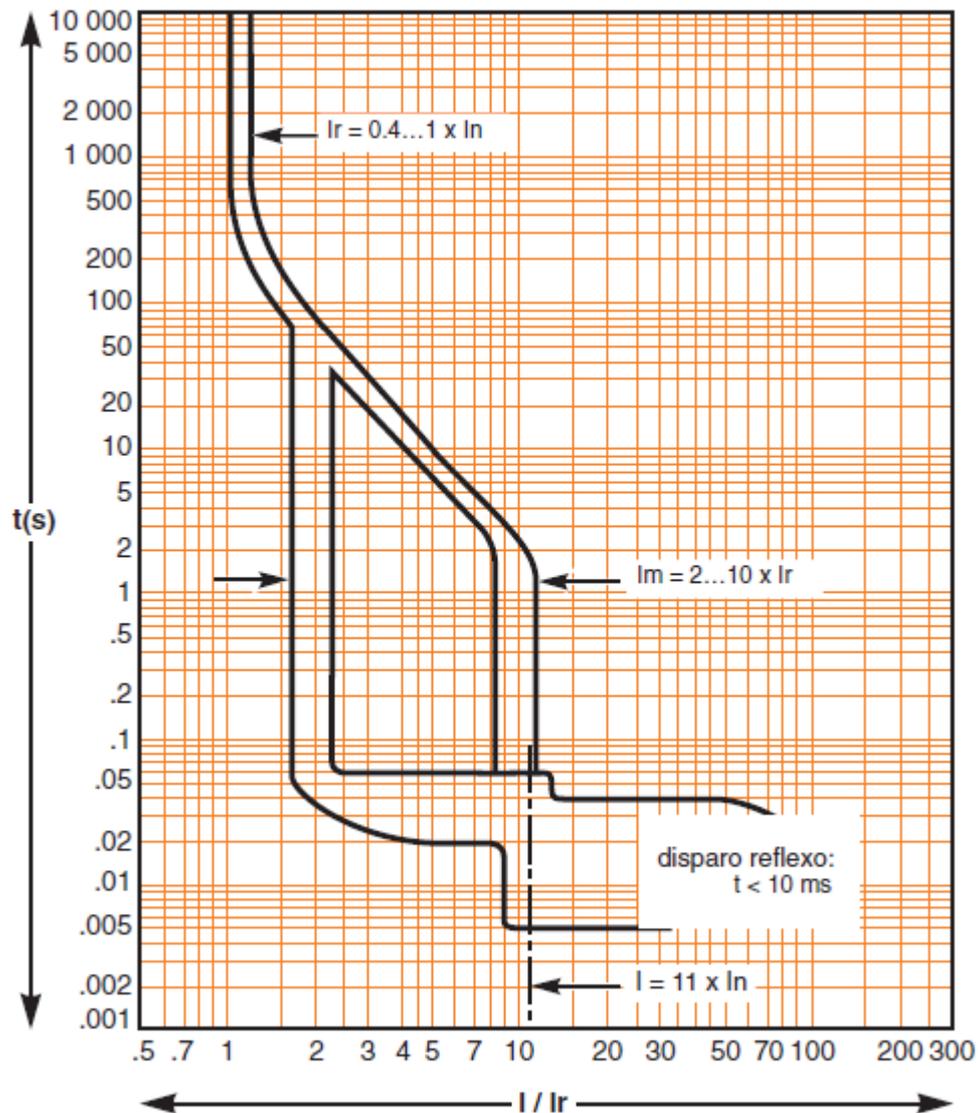


Figura 7: Curva típica de disjuntor regulável com disparador eletrônico (Fonte: Catálogo de disjuntores Schneider)

O ajuste desses disjuntores é baseado no tempo de atuação dos mesmos e também na corrente de atuação, as chamadas curvas LSI (*Long-Short-Instantaneous*)

- **Tempo Longo (*Long Time*):** Atuação do dispositivo devido à sobrecorrente em relação ao ajuste, ou seja, o dispositivo atua devido a uma corrente superior àquela ajustada. O tempo de atuação pode ser da ordem de minutos ou até mesmo horas dependendo da magnitude da sobrecorrente. Pode-se considerar similar à atuação térmica de um disjuntor fixo.

- **Tempo curto (*Short Time*):** O dispositivo atua na ordem de segundos. A sobrecorrente que passa pelo dispositivo é superior à do tempo longo e o seu ajuste de tempo é bem menor. Esta característica da curva é muito utilizada na proteção de CC e também na partida direta de motores ou partida do tipo estrela-triângulo, onde a corrente é elevada nos primeiros segundos da partida.
- **Atuação instantânea (*Instantaneous*):** A principal proteção contra curto circuito. Nesse tipo de atuação o tempo de atuação pode ser considerado instantâneo, sendo na ordem de milésimos de segundos. Essa atuação é similar à atuação magnética do disjuntor fixo.

No caso desse tipo de disjuntor cada tempo da curva LSI e a corrente podem ser ajustados de acordo com as necessidades de projeto, desde que respeitados os limites do equipamento.

Uma grande vantagem desse tipo de disjuntor é a flexibilidade na coordenação e seletividade do sistema elétrico no qual o mesmo será instalado. Com a possibilidade de ajuste dos tempos de atuação o sistema é mais facilmente coordenado, evitando assim desligamentos errados no caso de uma falta.

Alguns dispositivos com esse tipo de disparador permitem a proteção para faltas do tipo fase-terra, ou seja, o disparador possui um sensor que mede todas as correntes de sequência zero do circuito, quando as mesmas ultrapassam o valor de corrente ajustado no disparador, o mesmo atua e desliga o circuito.

2.2 Dispositivos auxiliares de proteção

Neste tópico serão abordados alguns dos equipamentos auxiliares que são utilizados na proteção de sistemas elétricos. Esses equipamentos funcionam em conjunto com os dispositivos básicos de proteção e, além de facilitarem a coordenação e seletividade, melhoram a confiabilidade do sistema de proteção elétrico.

2.2.1 Relés digitais de proteção

Os relés de proteção são dispositivos auxiliares que possuem a função de coordenar e comandar outros dispositivos de proteção. Os relés tem como objetivo retirar de operação um

equipamento ou circuito elétrico que esteja operando de maneira inadequada, sendo essa falta de conformidade caracterizada como uma situação de defeito (Coury ET AL, 2007).



Figura 8: Relés digitais de proteção (Fonte: Siemens e Pextron)

A Figura 8 mostra dois modelos de relés encontrados no mercado. O relé de proteção se baseia na leitura de parâmetros elétricos tais como: tensão, corrente, frequência, potência ativa, fator de potência, entre outras; para atuar ou não em algum dispositivo.

Baseado na comparação dos ajustes pré-definidos e o monitoramento das grandezas elétricas, o relé pode atuar no dispositivo ao qual ele esteja integrado no caso de alguma anomalia, podendo ser uma chave seccionadora, um disjuntor, uma chave contatora, entre outros dispositivos de seccionamento de circuitos, visando sempre retirar de operação a menor quantidade possível de circuitos e garantindo a estabilidade e integridade dos demais circuitos.

Nos projetos de sistemas de potência, os relés digitais são largamente aplicados, devido à sua versatilidade, confiabilidade e facilidade de implementação nos novos sistemas, além disso, muitos deles permitem a comunicação via rede através de diversos protocolos de comunicação.

Nos relés existem microprocessadores que gerenciam seu funcionamento e também possibilitam a utilização de algoritmos específicos para a identificação, classificação e extinção das faltas. Esse tipo de relé possui, em sua maioria, a função de autodiagnose no qual o relé realiza uma inspeção em si mesmo e, no caso de alguma falha interna, o relé sai de operação e pode disponibilizar um sinal de alarme de falha em uma de suas saídas. Outra grande vantagem que possui é a função de multimedidação de grandezas elétricas, eliminando assim a necessidade de medidores adicionais no circuito em que será aplicado.

No mercado encontra-se uma gama muito grande de relés digitais, desde os mais simples até os mais sofisticados que possuem diversas entradas e saídas, analógicas ou digitais e executam diversas funções de proteção de acordo com a programação desejada.

As funções de proteção são baseadas na *ANSI Standard Device Numbers* (ANSI /IEEE Standard C37.2), que usualmente é chamada de tabela ANSI. Essa tabela codifica os dispositivos elétricos existentes e usualmente utiliza-se a função que determinado dispositivo efetua para programar ou identificar as funções que o relé irá efetuar.

Além dos ajustes LSI, alguns relés digitais possibilitam ajustes de tempo chamados de definido e dependente, tornando esses dispositivos os mais versáteis dos dispositivos de proteção à sobrecorrente, uma vez que todos os parâmetros da curva de atuação podem ser ajustados.

- **Tempo definido:** este ajuste permite definir no relé o tempo em que o dispositivo irá atuar, juntamente com a corrente mínima que o dispositivo irá se basear para a atuação, ou seja, atingido esse valor de corrente, ou em um surto de corrente, o relé atuará no tempo ajustado.
- **Tempo dependente:** nesta curva o tempo de atuação do relé é inversamente proporcional à corrente de atuação do mesmo, ou seja, quanto maior a corrente, menor será o tempo de atuação. Para tanto são normatizadas equações de atuação para relés digitais. As curvas que serão utilizadas no trabalho baseiam-se na norma americana ANSI, a qual utiliza as seguintes curvas para tempo dependente: Inversa de Tempo Curto, Extremamente Inversa, Muito Inversa, Inversa e Moderadamente Inversa, conforme Figura 9.

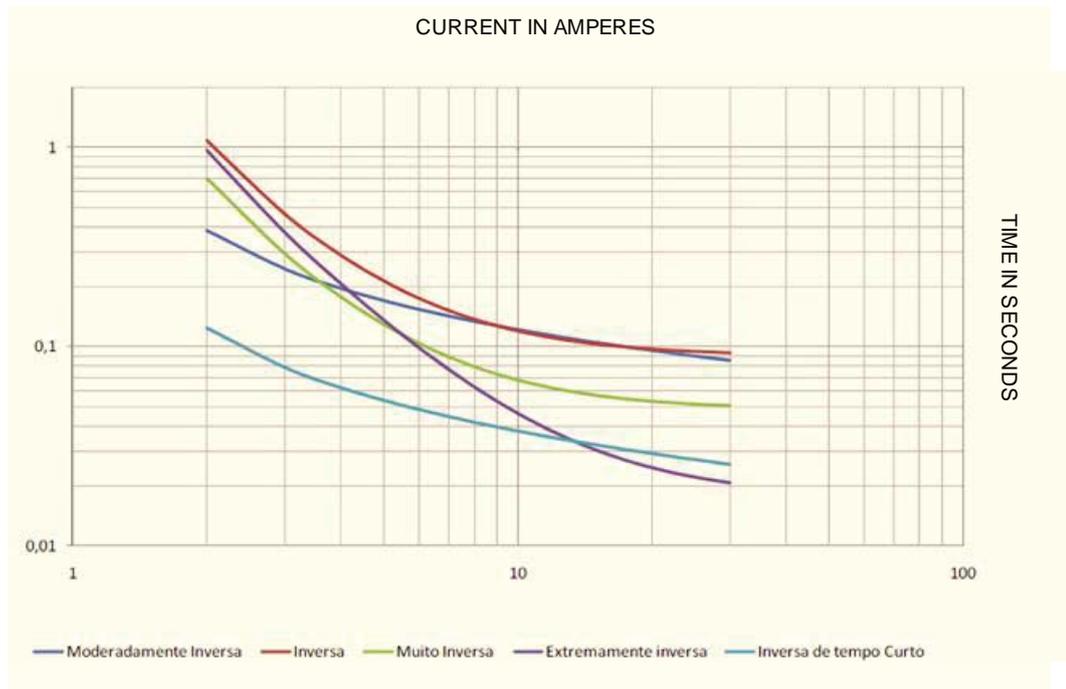


Figura 9: Curvas dependentes, padrão ANSI (Fonte: PTW)

- A equação do tempo de operação para cada curva é, segundo a norma IEEE Std C37.112 (1996), dada pela equação 1.

$$T = TDS \times \left(K_1 + \frac{K_2}{(M^{K_3} - 1)} \right) \quad (1)$$

Onde:

T: Tempo de atuação do relé

TDS: Multiplicador do ajuste de tempo do relé

M: Múltiplo de corrente

K1, K2 e K3: Constantes de acordo com o tipo de curva do relé

Os valores das constantes K1, K2 e K3 são definidos de acordo com o tipo de curva da norma ANSI e os valores são listados na Tabela 1

Tipo de Curva	K1	K2	K3
Moderadamente Inversa	0,02260	0,01040	0,20000
Inversa	0,18000	5,95000	2,00000
Muito Inversa	0,09630	3,88000	2,00000
Extremamente Inversa	0,03520	5,67000	2,00000
Inversa de Tempo Curto	0,00262	0,00034	0,02000

Tabela 1: Constantes das Curvas (Fonte: Norma ANSI)

2.2.2 Transformadores de Corrente (TC)

Os transformadores de corrente (TCs) são dispositivos auxiliares de proteção que possuem a função de reduzir a amplitude de corrente a ser utilizada para leitura e proteção e também isolar o equipamento de proteção, no caso o relé digital, do circuito em que é aplicado.

Os transformadores de corrente permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuírem correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito ao qual estão ligados (MAMEDE FILHO, 2005, p.157).



Figura 10: Tipos de Transformadores de Corrente (Fonte: ATS Elétrica)

Há diversos tipos e modelos de TCs no mercado, além da relação de transformação os fabricantes possuem diversos formatos de equipamento, conforme Figura 10, podendo os mesmos ser encomendados da maneira como for desejada.

Ao se utilizar TCs no sistema de proteção alguns parâmetros básicos do mesmo devem ser levados em conta ao se dimensionar e especificar os mesmos, de acordo com a norma NBR 6856 (ABNT NBR 6856, 1992 – TRANSFORMADORES DE CORRENTE):

- **Correntes nominais:** As corrente nominais primárias devem ser compatíveis com a corrente de carga do circuito primário (MAMEDE FILHO, 2005, p.166). A corrente primária pode variar entre 5 e 8000 ampères de acordo com os valores padronizados. Já a corrente nominal secundária é geralmente 5 ampères, valor esse padronizado e geralmente utilizado nos projetos e pelos fabricantes.
- **Relação nominal:** Indica a relação de transformação do TC variando de 1:1 à 1600:1 de acordo com os valores padronizados para a corrente primária.
- **Classe de tensão de isolamento nominal:** este parâmetro define o nível de tensão máximo ao qual o transformador de corrente pode ser aplicado, geralmente utiliza-se o nível de tensão máximo de operação do circuito a ser aplicado.
- **Classe de exatidão nominal:** refere-se ao erro máximo do transformador de corrente. Segundo Mamede Filho (2002) exprime nominalmente o erro esperado do transformador de corrente levando em conta o erro de relação e o erro de defasagem entre a corrente primária e secundária.
- **Carga nominal:** é uma especificação do TC que se refere a carga que a ser ligada no seu secundário. Identifica-se através de um símbolo representado pela letra C seguida de um número de unidade volt-ampère correspondente à carga nominal a ser instalada no secundário. Para tanto, há um padrão de cargas secundárias na norma ABNT NBR 6856.
- **Tensão secundária nominal:** Tensão nos terminais secundários de um TC resultante de corrente muito alta no primário dos TCs ou devido a um acoplamento de carga secundária superior à nominal, sem que o valor do erro exceda. É padronizado o valor de 20 vezes a corrente nominal do secundário do TC.
- **Fator de sobrecorrente (FScor):** é a relação entre a máxima corrente de curto circuito que o TC suporta por curtos períodos de tempo e a corrente nominal do TC sem que haja a saturação do mesmo. O valor padrão desse fator de sobrecorrente é 20, segundo a norma ABNT NBR 6856 (1992).
- **Fator térmico nominal:** é aquele que se pode multiplicar a corrente primária nominal de um TC para se obter a corrente que pode conduzir continuamente, na frequência nominal e com cargas específicas, sem que sejam excedidos os limites 1,0 – 1,2 – 1,3 – 1,5 – 2,0 (MAMEDE FILHO, 2005, p.176).

- **Limites de corrente de curta duração para efeito térmico:** refere-se à corrente primária simétrica (corrente térmica nominal) que o TC suporta durante 1s, tendo seu secundário em curto circuito e sem que sejam excedidos os valores normalizados de elevação de temperatura.
- **Limites de corrente de curta duração para efeito mecânico:** é o valor de impulso da corrente de curto-circuito assimétrica que circula no primário do transformador de corrente e que este pode suportar, por um tempo estabelecido de meio ciclo, estando os enrolamentos secundários em curto-circuito, sem que seja afetado mecanicamente, em virtude das forças eletrodinâmicas desenvolvidas (MAMEDE FILHO, 2005, p.177).

Outro fator importante sobre os TCs é o fato de existirem equipamentos destinados à medição e outros destinados à proteção, sendo a principal diferença em relação à exatidão dos mesmos, a qual é maior nos TCs de medição; em contrapartida, os TCs de proteção são mais robustos e saturam com correntes muito superiores às nominais do TC. Porém deve-se atentar aos valores de cada um desses tipos de Transformadores de Corrente, uma vez que os mais precisos, ou seja, destinados à medição, são muito mais caros que os destinados à proteção de circuitos.

3 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS PROTEGIDOS

Nos sistemas elétricos de potência podem existir diversos tipos equipamentos ligados a ele, porém alguns desses equipamentos merecem atenção especial devido à sua importância, preço e/ou tempo de manutenção ou troca devido a alguma falha ou dano em consequência de um curto circuito.

No presente item são descritos e apresentados de maneira simplificada os principais elementos a serem protegidos dentro de um sistema elétrico.

3.1 Transformadores de potência

No mercado, diversos são os tipos e modelos de transformadores disponíveis para instalação em sistemas elétricos, cada um com suas características de fabricação, porém todos são fabricados seguindo normas. Há diversas normas que regem a padronização de transformadores, as quais impõem diversos parâmetros devem ser respeitados a fim de estar de acordo com a mesma.

O presente trabalho dá foco aos transformadores de baixa tensão secos ou isolados em óleo, conforme exemplos mostrados na Figura 11, com ligação delta no primário e estrela no lado secundário, defasamento de 30° , ou seja, o transformador será do grupo de ligação Dy30, sendo o neutro das bobinas do secundário será solidamente aterrado.



Figura 11: Transformadores: isolado em óleo e seco (Fonte: Schneider Electric)

A proteção nos transformadores tem por objetivo garantir seu funcionamento normal sem que haja interferências e também garantir a integridade do equipamento no caso de uma falta no sistema elétrico que venha a causar danos físicos devido às consequências térmicas e

mecânicas de uma falta. Para tanto, a curva térmica do transformador deve ser respeitada, conforme Figura 12.

Esta figura mostra, ainda, outro importante parâmetro normatizado pela IEEE Std. 242 (2001): a curva ANSI 58%. Característica de transformadores solidamente aterrados com ligação delta-estrela, esse parâmetro apresenta valores de 58% do valor da corrente nominal primária do transformador, uma vez que quando ocorre uma falta fase-terra no secundário do transformador, pode circular uma corrente com valor de 58% do valor da corrente de curto no primário do transformador. Com isso essa curva é bastante importante quando é feita a proteção de sobrecorrente no primário do transformador.

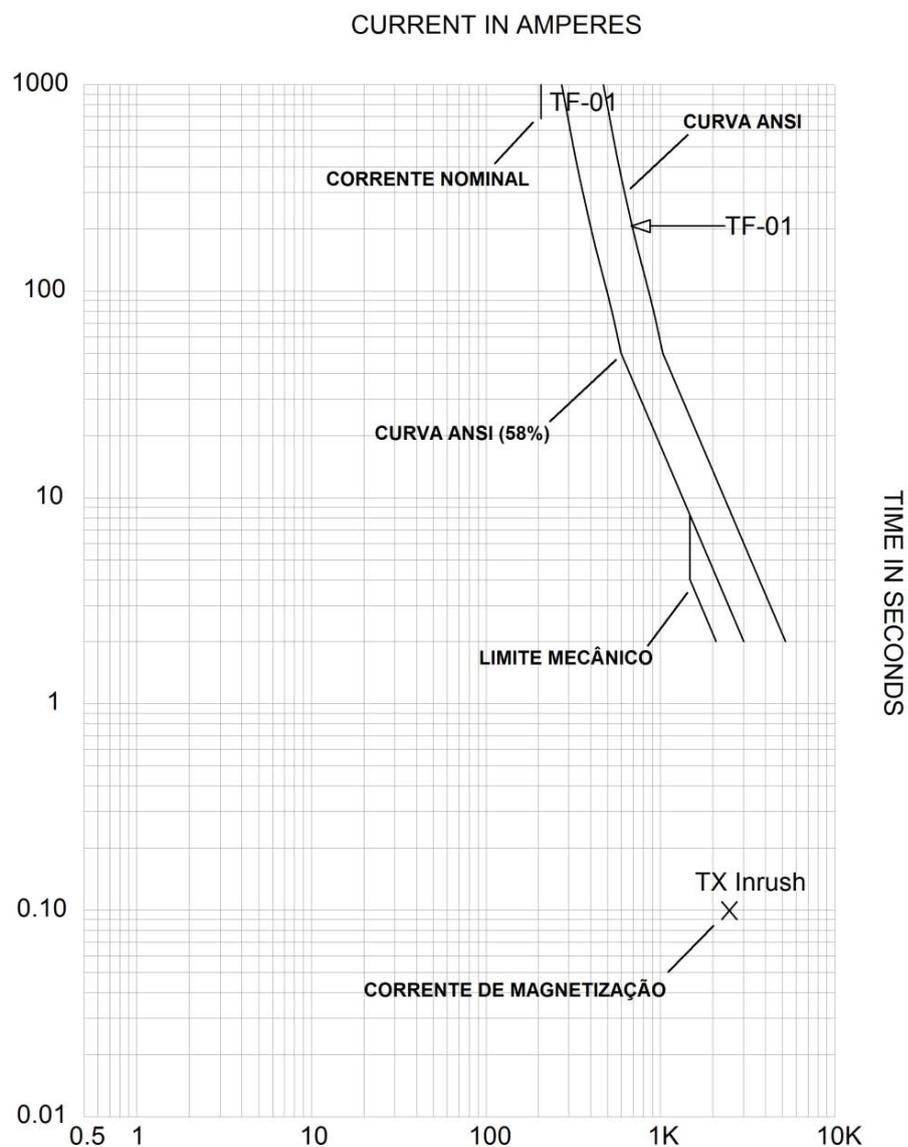


Figura 12: Curva térmica do transformador (Fonte: PTW)

Segundo a norma IEEE Std. 242 (2001) o mais usual na proteção de transformadores é utilizar dispositivos de sobrecorrente no lado primário do transformador, tais como fusíveis, disjuntores e relés digitais. Porém quando o transformador é vital para o sistema elétrico, tanto o primário quanto o secundário do transformador recebem proteções de sobrecorrente, sendo que neste caso, os dispositivos ligados no primário do transformador são direcionados para a retaguarda da proteção e os dispositivos ligados no secundário do transformador, para a proteção de sobrecarga do transformador.

Na proteção dos transformadores devem-se levar em conta os parâmetros elétricos do mesmo a fim de se evitar falhas nas proteções ou atuações indevidas dos dispositivos de proteção. Os parâmetros que influenciam na proteção do mesmo são: corrente nominal de operação, tempo e corrente de energização do transformador (*In-Rush*) e os limites de corrente de curto-circuito que o equipamento suporta:

- **Corrente nominal (I_n):** corrente de operação normal do transformador, nenhum dispositivo de proteção do transformador deve atuar sem que esse valor de corrente seja excedido.
- **Corrente *In-Rush* do transformador (I_{INRUSH}):** corrente oriunda do ligamento do transformador dentro do sistema elétrico. Essa corrente circula apenas no primário do transformador e atenção deve ser dada às proteções nele ligadas a fim de se evitar desligamentos indevidos durante a energização. Diversos fatores construtivos, tais como tamanho e material utilizado, influenciam no valor da corrente de *in-rush* do transformador.

Segundo Mardegan (2012), as correntes de energização dos transformadores podem ser calculadas de acordo com os dados, baseada em informações de fabricantes:

- Transformadores a óleo < 1,0 MVA : $I_{INRUSH} = 10 \times I_n$
- Transformadores a óleo > 1,0 MVA : $I_{INRUSH} = 8 \times I_n$
- Transformadores a seco: $I_{INRUSH} = 14 \times I_n$

Além do valor de corrente deve-se levar em conta também o tempo da magnetização das espiras do primário, o qual foi padronizado em 100 milissegundos.

- **Suportabilidade térmica (ST):** segundo Mardegan (2012), esse parâmetro define o limite térmico do transformador e está atrelado à norma a qual a fabricação do transformador atende:

- Segundo a norma ABNT NBR 5356 (1993) os limites térmicos são dados, em um tempo definido de 2 segundos, por:

- $$I_{ST} = \left(\frac{100}{Z} \% \right) \times I_n$$
- $$I_{ST} = 25 \times I_n \text{ (caso } I_{ST} > 25 \times I_n \text{)}$$

- Segundo a norma IEEE Std. 242 (2001) os limites térmicos são definidos por categorias de potência dos transformadores:

Categoria	Potência Nominal [KVA]
I	15 a 500
II	501 a 5000
III	5001 a 30000
IV	> 30000

Tabela 2: Categorias de Transformadores segundo norma IEEE Std. 242

Para cada categoria definida na norma existe uma curva TCC característica que deve ser considerada no dimensionamento e configuração das proteções. Tomando por base as curvas apresentadas na norma IEEE Std. 242 ajustam-se as proteções, uma vez que se sabe a região de operação normal do transformador e que, em caso de falta, o mesmo não venha a sofrer danos.

3.2 Cabos de baixa tensão

Os cabos do sistema elétrico podem ser considerados os mais importantes materiais do sistema elétrico, uma vez que são os responsáveis por distribuir energia elétrica por todo sistema, alimentando assim todas as cargas que necessitem da mesma. Os cabos devem suportar toda corrente demandada pela carga que alimenta e também suportar correntes de curto circuito por curtos períodos de tempo sem que sejam danificados devido aos efeitos térmicos.



Figura 13: Cabos de baixa tensão (Fonte: Prysmian)

É muito importante que o dimensionamento dos cabos seja feito de maneira criteriosa, levando-se em consideração todos os fatores que possam influenciar sua condutividade elétrica, tais como agrupamento, método de instalação, temperatura ambiente, presença de harmônicos entre outros.

A proteção dos cabos é de extrema importância para o sistema elétrico, a mesma baseia-se no princípio do limite térmico dos mesmos, que pode ser expresso através de curva de limites de corrente, conforme Figura 14. Segundo a norma IEEE Std. 242 (2001), a capacidade de corrente, ou ampacidade, do cabo deve ser respeitada sempre, a fim de se evitar que o mesmo aqueça demais devido a uma sobrecorrente. Caso a sobrecorrente persista e o cabo aqueça, devido ao efeito Joule, por muito tempo as características elétricas do mesmo, tais como resistência, isolamento e diâmetro podem ser afetados e conseqüentemente sua vida útil seja reduzida. Esporadicamente o cabo pode operar em sobrecarga a fim de suprir as necessidades no caso de uma emergência ou na partida direta de um motor, mas esse tipo de operação não pode ser frequente, pois o cabo seria danificado da mesma maneira.

Além disso, é muito importante que o cabo seja protegido durante uma falta, pois nesse caso a corrente que ele conduz é muitas vezes maior que a nominal para o qual o mesmo foi projetado. Nesse caso a extinção da falta deve ser feita o mais rápido possível para que o cabo não sofra um sobreaquecimento e venha a ser danificado devido ao efeito Joule.

Conhecendo o limite térmico do cabo e a ampacidade do mesmo, a proteção pode ser feita baseada nesses dois parâmetros, para tanto a norma IEEE Std. 242 (2001) recomenda que a proteção instantânea contra curto circuito seja feita de maneira que a corrente máxima de curto circuito no instante 0,01 segundo seja menor que o limite térmico do cabo e também que a ampacidade do cabo define o valor nominal do dispositivo de proteção.

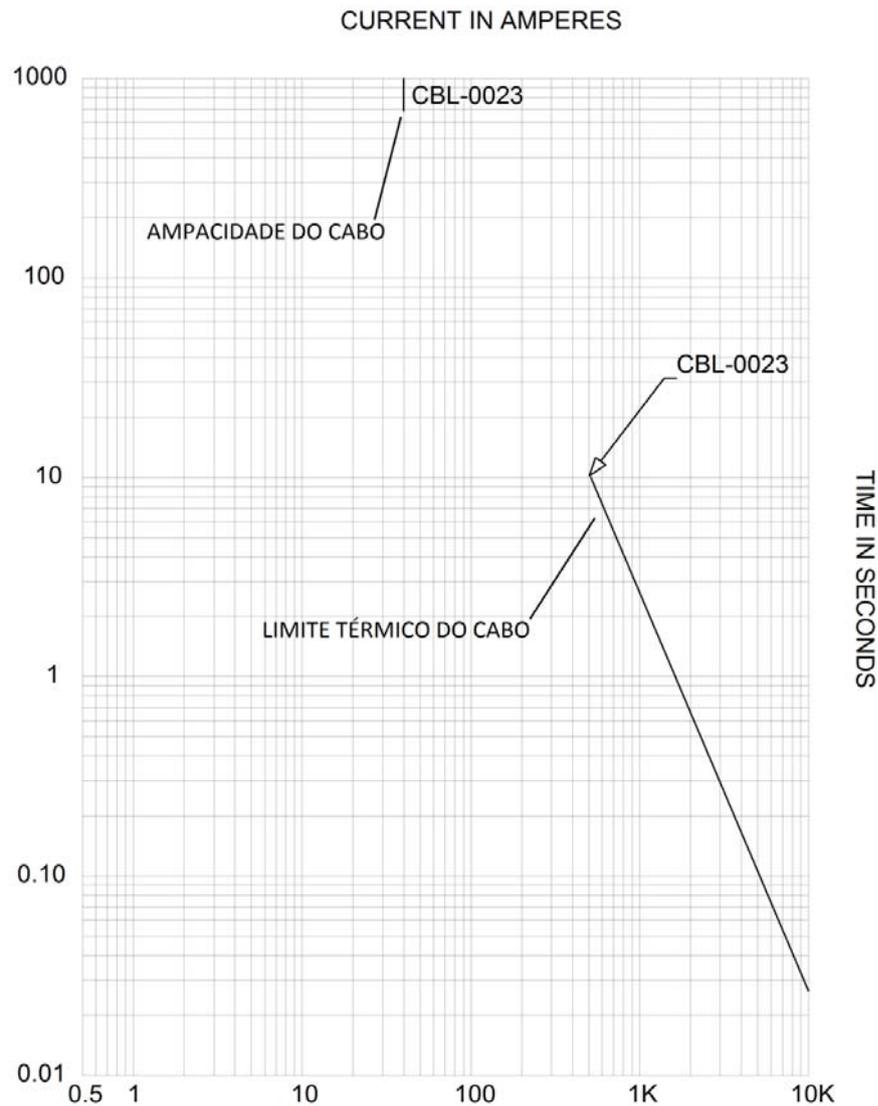


Figura 14: Curva térmica de cabo de baixa tensão (Fonte: PTW)

3.3 Motores de indução trifásicos

Os motores elétricos a serem utilizados no presente trabalho serão os motores trifásicos de indução de baixa tensão que podem ser visualizados na Figura 15. Assim como os equipamentos anteriormente apresentados, os motores possuem alguns parâmetros elétricos importantes que devem ser levados em conta no dimensionamento e configuração das proteções do mesmo.

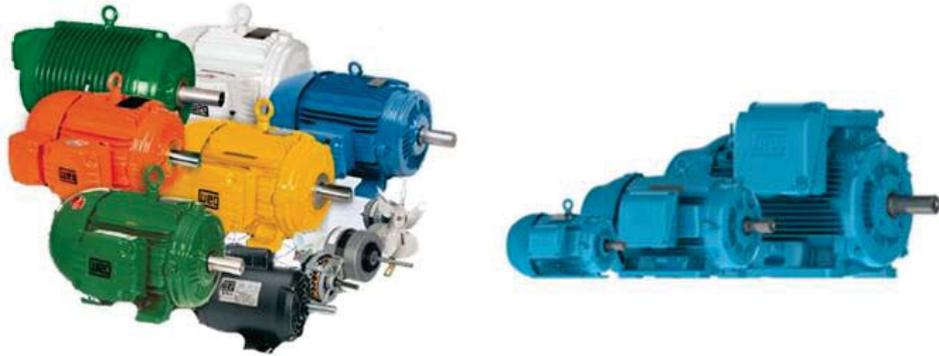


Figura 15: Motores de indução trifásicos (Fonte: WEG)

Nos motores de baixa tensão, ou seja, com tensão de operação menor que 1000 volts, normalmente a proteção de sobrecarga e consequentemente aquecimento é feita através de relés térmicos ou disjuntores de baixa tensão com sensores ou entradas para sensores eletrônicos e a proteção contra curto-circuito é feita através de fusíveis retardados ou disjuntores de baixa tensão.

Os valores e/ou ajustes das proteções dos motores são baseados nas características elétricas do mesmo:

- **Corrente nominal do motor:** é a corrente solicitada da rede de alimentação pelo motor, trabalhando à potência nominal, com frequência e tensão nominais (MAMEDE FILHO, 2005, p.230). Há também um pequeno fator de sobrecarga que pode ser aplicado ao motor sem que o mesmo seja danificado, o chamado fator de serviço.
- **Corrente de partida do motor:** é a corrente solicitada da rede no instante em que o motor é energizado pela rede elétrica. Segundo a norma IEEE Std. 242 (2001), essa corrente é da ordem de 5 a 8 vezes a corrente nominal do motor. O valor da corrente de partida pode ser obtido no *data sheet* (manual técnico) do motor e algumas vezes é encontrado na placa. Quando não se dispõe dessa informação, pode-se adotar a seguinte referência (MARDEGAN, 2012, p.257):

- Motor de baixa tensão: $8 \times I_n$

- **Tempo de aceleração:** tempo necessário para o motor partir, ou seja, o tempo que o motor gasta para sair da inércia e atingir a rotação nominal.

- **Tempo de rotor bloqueado:** é aquele tempo durante o qual o motor pode permanecer com o rotor travado, absorvendo, nesse período, a sua corrente nominal de partida, sem afetar a vida útil (MAMEDE FILHO, 2005, p.267).

Os ajustes das proteções do motor devem ser baseados nos parâmetros anteriormente descrito, de tal forma que, segundo a norma IEEE Std. 242 (2001), o dispositivo de proteção deve atuar caso a corrente seja maior que a corrente nominal do motor e quando aplicável maior que a corrente nominal multiplicada pelo fator de serviço do mesmo, porém durante a partida do motor de maneira direta a proteção não deve atuar. O ajuste da proteção deve ser tal que o tempo para a sobrecorrente de partida não exceda o tempo de rotor bloqueado do motor, a fim de garantir a integridade do mesmo.

Deve-se dar uma atenção maior durante a partida do motor no que diz respeito ao tempo de partida e à corrente de partida. A Figura 16 exemplifica a curva típica de um motor com partida direta. Segundo a norma IEEE Std. 242 (2001), durante a partida muitas vezes a tensão que alimenta o motor não é a nominal do motor, podendo ser menor originalmente ou devido a uma queda de tensão na partida, com isso o tempo de partida do motor é superior e conseqüentemente o dispositivo de proteção pode atuar de maneira indevida, logo, recomenda-se deixar uma folga de tempo para a partida do motor. O outro ponto a ser considerado é que durante a partida do motor a corrente de partida considerada é a corrente simétrica, porém durante a partida há a presença de componentes assimétricas que são dependentes da relação X/R no ponto de fornecimento de energia ao motor. Com isso a norma recomenda deixar uma folga no ajuste instantâneo do dispositivo, o valor recomendado dessa folga é 1,76 vezes a corrente de partida do motor a ser protegido.

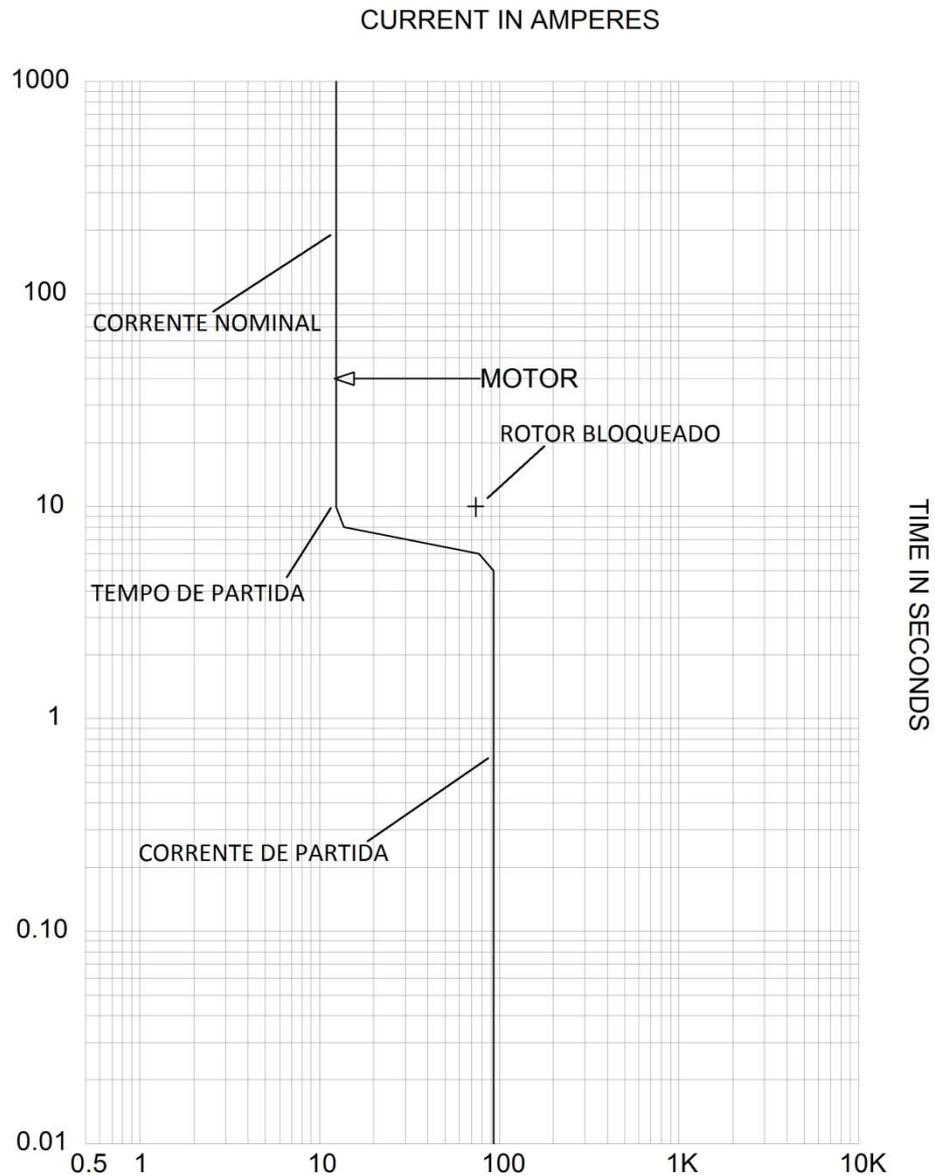


Figura 16: Curva típica de motor de indução trifásico com partida direta

3.4 Banco de capacitores

A utilização de banco de capacitores em sistemas elétricos industriais tem crescido devido ao fato de constituir uma forma simples, prática e econômica de se corrigir o fator de potência. Entretanto, sua aplicação necessita de certos cuidados e atenção, pois podem ocorrer alguns “efeitos colaterais”, sobretudo no que diz respeito ao chaveamento de um banco, uma vez que um disjuntor pode interromper vários kAs de corrente indutiva, mas suporta uma corrente capacitiva de apenas algumas centenas de Ampères (MARDEGAN, 2012, p.320).



Figura 17: Bancos de capacitores (Fonte: Monter, Schneider Electric, ABB)

No mercado há diversos tipos, modelos e potência de banco de capacitores, normalmente pode-se adquirir o mesmo com módulos de capacitores de diversas capacidades de cargas, podendo, esses módulos, ser montados em painéis, conforme Figura 17.

Um fator de potência fora dos limites impostos pela legislação acarreta em pesadas multas por excesso potência reativa consumida, com isso o correto funcionamento do banco de capacitores de correção de fator de potência é fundamental para uma indústria.

Segundo Resolução N.º 456 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) o valor de fator de potência mínimo em uma unidade consumidora de porte industrial é de 0,92. Segundo Mamede Filho (2005) os princípios da legislação são:

- Necessidade de aliviar a capacidade do sistema elétrico brasileiro;
- Promover o uso racional de energia elétrica;
- Reduzir o consumo de energia reativa indutiva que provoca sobrecargas no sistema;
- Reduzir o consumo de energia reativa capacitiva nos períodos de carga leve, pois isso provoca a elevação da tensão no sistema de suprimento;
- Criação de condições para que os custos de expansão do sistema elétrico sejam distribuídos de forma mais justa na sociedade.

Diversos pontos importantes devem ser levados em conta na proteção de um banco de capacitores, segundo Mardegan (2012): sobretensão em algumas unidades capacitivas devido

à falha em outra unidade, sobretensão na alimentação do banco de capacitores, surto de tensão no sistema, descarga de corrente de unidades paralelas, arcos sobre a estrutura do capacitor, porém o foco do presente trabalho é a proteção de sobrecorrente com a finalidade de coordenação e seletividade das proteções.

Com isso dois parâmetros são levados em conta na proteção do banco de capacitores:

- **Corrente nominal:** corrente máxima de operação do banco de capacitores, considerando que toda sua carga seja utilizada na correção do fator de potência.
- **Corrente de carga (In-Rush):** na energização de um banco de capacitores, ocorre um transitório eletromagnético que se traduz pelo aumento dos valores de corrente e frequência. Os valores atingidos neste transitório e sua duração dependem do instante em que circula a tensão da capacitância, da indutância do circuito, da carga inicial do capacitor no instante da energização e dos amortecimentos providos pelas resistências do circuito (MARDEGAN, 2012, p.321).

4 SELETIVIDADE E PRINCIPAIS AJUSTES CONSIDERADOS

Conforme visto no capítulo anterior do presente trabalho cada equipamento possui um conjunto de parâmetros elétricos que influenciam diretamente na sua proteção. Apenas foram apresentados os principais equipamentos normalmente utilizados em uma indústria, porém há uma variedade enorme de cargas que são ligadas ao sistema elétrico em uma indústria, mas que exigem um simples disjuntor ou fusível como proteção.

Cada equipamento deve ser protegido conforme os parâmetros já descritos, com isso cada um de seus dispositivos de proteção deve receber um correto ajuste a fim de garantir a coordenação, seletividade e proteção.

4.1 A seletividade

Conforme visto em capítulos anteriores, a Seletividade é a característica que deve ter um sistema elétrico, quando submetido a correntes anormais, de fazer atuar dispositivos de proteção de maneira a desenergizar somente a parte do circuito afetado (MAMEDE FILHO, 2002, p.453), sendo de extrema importância efetuar um estudo das proteções elétricas da unidade em questão.

O objetivo maior de um Estudo de Seletividade consiste em 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/sistemas (MARDEGAN, 2012, p.364).

Para tanto, existem três maneiras de se efetuar a seletividade em uma instalação elétrica industrial:

- **Seletividade amperimétrica:** segundo Mamede Filho (2002), esse tipo de seletividade baseia-se no princípio de que as correntes de um curto-circuito aumentam conforme se aproxima da fonte de energia elétrica. É utilizada quando existe uma impedância muito alta entre os pontos em que se está fazendo a seletividade. Neste caso, a corrente de falta “vista” pelo dispositivo de proteção à montante é muito maior do que aquela vista pelo dispositivo de proteção instalado à jusante (MARDEGAN, 2012, p.365).
- **Seletividade cronométrica:** é aquela realizada com a aplicação de intervalos de tempo entre os dispositivos de proteção situados à jusante e à montante, de forma que se garanta a operação dos mesmos de forma seletiva e coordenada

(MARDEGAN, 2012, p. 365). Segundo Mamede Filho (2002), essa temporização intencional dos dispositivos podem depender ou independe da corrente, sendo esse o método mais utilizado nos projetos de instalações. A diferença de tempo para a atuação de dispositivos consecutivos deve ser o tempo de abertura do dispositivo somado a um tempo de incerteza da atuação do mesmo.

- **Seletividade lógica:** o conceito de seletividade lógica é mais moderno e surgiu em função dos novos dispositivos de proteção que o mercado oferece. Os relés digitais multifunção possibilitam a aplicação desse novo conceito. É aplicada em unidade de sobrecorrente de fase e de neutro ou terra, tanto em sistemas primários como secundários (MAMEDE FILHO, 2002, p. 458). Basicamente os dispositivos de proteção mais próximos do curto-circuito devem atuar num intervalo de tempo muito pequeno, além disso, os dispositivos se comunicam entre si enviando sinais digitais de atuação a fim de garantir que no caso da falha de um dele o próximo dispositivo atue. Segundo Mamede Filho (2002), cada dispositivo deve ter a capacidade de receber um sinal da proteção à jusante, ou seja, do dispositivo abaixo, e enviar um outro sinal ao dispositivo à montante, ou seja, acima dele, ao mesmo tempo que aciona o dispositivo de abertura do circuito.

No presente trabalho são utilizados os conceitos das seletividades amperimétrica e/ou cronológica para desenvolver o estudo de seletividade e coordenação, segundo Mardegan (2012) esse tipo de aplicação de seletividade é também conhecido como seletividade convencional, a qual mistura os dois conceitos.

4.2 Critérios de ajustes das proteções

O sistema de proteções deve ser configurado de maneira a garantir a seletividade e coordenação dos dispositivos que o compõe e principalmente garantir a integridade dos equipamentos e cabos que compõem o sistema elétrico em questão. Para tanto se seguem algumas das recomendações de proteção descritas na norma IEEE Std. 242 (2001).

Assim como na descrição dos principais equipamentos protegidos, cada tipo de equipamento é detalhado do ponto de vista de proteção dos mesmos, mostrando e discutindo os parâmetros elétricos a serem ajustados.

4.2.1 Critérios para transformadores de potência

A proteção dos transformadores deve ser feita baseada nos valores de corrente nominal de trabalho do mesmo, tanto do lado primário como do secundário, a corrente *in-rush* do transformador e também a corrente de curto-circuito no secundário do transformador. Segundo a norma IEEE Std. 242 (2001) os seguintes valores podem ser adotados:

- **Sobrecorrente (sobrecarga):** a proteção para sobrecorrente pode ser efetuada no primário, no secundário ou em ambos os lados do transformador. Segundo a norma há uma maior eficiência de proteção quando a mesma é feita no secundário do transformador, para tanto, recomenda-se ajustar o dispositivo entre 125% e 300% da corrente nominal secundária, sendo o valor ideal 125%. Caso a proteção seja feita no lado primário do transformador o ajuste na proteção primária de sobrecarga deve ser feito com valores entre 125% e 400%, para tanto a norma permite que a curva ANSI do transformador não seja respeitada no caso de tempos de atuação muito elevados e pequenos intervalos de corrente.

Ainda, segundo Mardegan (2012), o ajuste da temporização da proteção primária deve ser coordenado com a proteção secundária e permitir uma corrente resultante da somatória das correntes de carga do secundário e da corrente de partida do maior motor. Já a temporização do ajuste secundário deve ser feito levando-se em conta a coordenação com a maior carga acoplada na barra do secundário do transformador.

- **Curto-circuito fase-fase:** normalmente esta proteção é feita apenas no lado primário do transformador, uma vez que no secundário do transformador são acopladas diversas cargas e no caso desse tipo de proteção atuar todas as cargas serão desligadas devido a um curto-circuito em qualquer uma das cargas, por menor que ela seja. O ajuste de curto-circuito na proteção primária deve ser tal que seja maior que o valor de curto-circuito assimétrico no secundário referido ao primário e também maior que a corrente de *in-rush* do transformador, para tanto a norma IEEE Std. 242 (2001) recomenda que o valor do ajuste seja o maior valor entre os valores de 120% da corrente de magnetização do transformador e 120% da máxima corrente de curto-circuito assimétrico.

- **Curto-circuito fase-terra:** essa proteção destina-se ao secundário do transformador, uma vez que as bobinas do primário do transformador estão ligadas em delta (triângulo). A norma IEEE Std.242 (2001) recomenda que o ajuste da corrente de curto fase-terra seja de 10% do valor nominal do TC de fase e o ajuste de tempo definido de atuação do mesmo seja de 100 milissegundo. Segundo Mardergan (2012), sistemas solidamente aterrado de baixa tensão devem ter ajuste de no máximo 1200 ampères e o tempo de ajuste deve ser o mais baixo possível desde que se mantenha a seletividade e proteção.

4.2.2 Critérios para cabos de baixa tensão

A proteção dos cabos de baixa tensão consiste em não deixar o cabo sobreaquecer devido a uma sobrecorrente ou um curto-circuito, com isso a proteção deve ser ajustada para que a corrente máxima não ultrapasse a máxima corrente que o cabo suporta, ou seja, a ampacidade do cabo e o ajuste instantâneo não deve exceder a capacidade de curto-circuito do cabo.

Para que a isolação do cabo não apresente envelhecimento precoce, o cabo não deve estar exposto a temperaturas acima daquelas especificadas para o tipo de isolação (MARDEGAN, 2012, p.308). Segundo ele a corrente do dispositivo de proteção não deve exceder a corrente nominal relativa do local onde o cabo foi instalado.

4.2.3 Critérios para motores de indução trifásicos

A proteção feita nos motores deve respeitar os parâmetros elétricos do mesmo desde que em condições normais de operação. O ponto principal a ser considerado é a partida do motor, uma vez que a corrente de partida é muitas vezes maior que a corrente nominal e se o ajuste não levar em consideração essa característica o motor será desligado durante a partida. Há diversos dispositivos e combinação de dispositivos que visam proteger o motor, porém todos os métodos devem respeitar no mínimo as recomendações da norma IEEE Std.242 (2001) descritas a seguir:

- **Sobrecorrente:** essa proteção visa interromper o funcionamento do motor no caso de uma sobrecarga no mesmo, fazendo com que a corrente de operação seja maior que a nominal. A norma IEEE Std. 242 (2001) recomenda que o ajuste

dessa proteção seja feito com um valor de 105% do valor da corrente nominal do motor. Segundo Mardegan (2012), caso o motor possua fator de serviço superior a 1, o ajuste da proteção pode ser feito de acordo com o valor de corrente nominal multiplicado pelo fator de serviço, pois o motor suporta essa pequena sobrecarga. Já o ajuste de tempo para sobrecorrente deve ser feito levando-se em consideração o tempo de partida do motor, que varia de acordo com fabricantes, modelos e cargas acionadas e o tempo de rotor bloqueado, sendo recomendado que a proteção atue com tempos de 2 a 10 segundos acima do tempo de partida, mas que não supere o tempo de rotor bloqueado do motor.

- **Curto-circuito:** a proteção contra curto-circuito em um motor visa eliminar qualquer corrente anormal de elevado valor oriunda de uma falha interna do motor ou de uma falta que ocorra próxima ao motor e se propague até o mesmo. O valor do ajuste deve levar em conta a corrente de partida do motor e a capacidade de curto-circuito do alimentador do mesmo, devendo ser maior que a corrente de partida e menor que a corrente de curto circuito do condutor. Para tanto a norma IEEE Std. 242 (2001) recomenda um ajuste de 165% a 250% do valor da corrente máxima de partida do motor, desde que esse valor de ajuste não venha a danificar o alimentador do motor. Caso a proteção seja feita através de fusível, a recomendação segundo Mardegan (2012), é que o valor máximo do fusível seja de 300% a corrente nominal do motor e que o mesmo suporte o tempo de partida do motor.

Atualmente, com a grande evolução da tecnologia e das necessidades de grandes motores, é comum utilizar nos motores dispositivos eletrônicos a fim de suavizar a partida ou até mesmo controlar a velocidade de rotação do motor, os chamados *soft-starter* e inversor de frequência. Com isso, na maioria dos casos a corrente de partida dos motores não ultrapassa o valor de duas vezes a corrente nominal do motor. Além disso, os próprios dispositivos possuem as próprias proteções eliminando, muitas vezes, a necessidade de dispositivos de proteção contra sobrecorrente e utilizando fusíveis do tipo rápido ou ultrarrápido para a proteção contra curto-circuito.

4.2.4 Critérios para banco de capacitores

O banco de capacitores constitui um equipamento muito sensível e que deve ser muito bem protegido principalmente da variação de tensão e sobretensão, porém esse não é o foco do presente trabalho, o qual avalia e discute a proteção contra sobrecorrente e curto-circuito a fim de deixar o sistema coordenado e seletivo.

As proteções acima descritas devem ser baseadas nos dois principais parâmetros do equipamento, corrente de *in-rush* ou de energização do banco e corrente nominal do mesmo.

Segundo Mardegan (2012) diversos fatores influenciam na corrente *in-rush* do banco de capacitores:

- Se o banco está descarregado inicialmente a corrente na energização pode ser bastante expressiva;
- Se existir um banco ligado no sistema e um outro banco é chaveado na mesma barra, as correntes de energização do novo banco tendem a ser ainda maiores, podendo até exceder os valores de corrente de curto-circuito no ponto de chaveamento;
- A duração do transitório varia de uma fração de ciclos até alguns ciclos.

Com isso os valores recomendados e usuais nos dispositivos de proteção, segundo Mardegan (2012) podem ser definidos e analisados. Para a proteção de sobrecorrente temporizada os valores normalmente utilizados são entre 1,2 e 1,35 vezes a corrente nominal do banco de capacitores, porém deve-se atentar à norma ao qual o banco foi construído e o tempo de atuação deve garantir que o dispositivo não atue durante a corrente de *in-rush*, sendo o valor recomendado de 100 milissegundos, uma vez que o transitório dura menos que esse tempo na maioria das vezes. O ajuste instantâneo do dispositivo de proteção deve garantir o banco seja energizado sem haver corte, com isso o valor recomendado de ajuste é de 110% do valor de corrente de *in-rush* do banco de capacitores.

5 O SOFTWARE PTW

Com um mercado cada vez mais diversificado e disputado, é possível encontrar diversos *softwares* desenvolvidos para estudos em circuitos elétricos que possuem a mesma finalidade: a geração de curvas TCC para estudo de coordenação e seletividade. Em sua grande maioria, essa ferramenta constitui apenas uma das funcionalidades disponibilizadas pelos *softwares* com finalidade de análise de sistema elétricos, tais como análise de curto-circuito, de fluxo de potência, de harmônicos, partida de motores, entre outros tipos de análise que podem ser feitas em um sistema elétrico. Muitos desses programas são desenvolvidos em parceria com fabricantes de dispositivos de proteção ou equipamentos elétricos, os quais financiam parte do investimento feito para o desenvolvimento do *software* e em contrapartida seus dispositivos e/ou equipamentos fazem parte do banco de dados base do programa.

Dentre os diversos programas disponíveis utiliza-se o *Power Tools for Windows* (PTW) versão 6.5 no estudo de caso do presente trabalho de graduação, que, assim como descrito, possui diversas funcionalidades para diferentes tipos de análise e estudo em sistemas elétricos de potência. O programa computacional PTW é dividido em diversos módulos, onde cada um deles pode efetuar funções específicas de acordo com o desejado pelo usuário.

Para o estudo de seletividade e coordenação usa-se, mais especificamente, o módulo CAPTOR, módulo responsável por gerar as curvas, o qual permite ajustar em tempo real as proteções e aprimorar, visualmente, os tempos e ajustes de correntes dos dispositivos de proteção, baseando-se nas curvas térmicas dos equipamentos utilizados na análise, podendo assim visualizar a coordenação dos dispositivos de proteção no próprio gráfico do programa.

O PTW dispõe de uma biblioteca de dados, na qual constam com milhares de dispositivos de proteção e equipamentos elétricos, de diversos tipos, modelos e fabricantes encontrados no mercado, possibilitando uma grande versatilidade na escolha de dispositivos de proteção. Essa biblioteca é gerenciável podendo adicionar ou retirar equipamentos elétricos de maneira simples da mesma, não limitando apenas à base de dados do *software*, uma vez que, por se tratar de um programa de uso internacional, muitos dos equipamentos constituintes da base de dados respeitam normas internacionais podendo as normas brasileiras recomendar características e valores diferentes, como nível de curto-circuito por exemplo.

Permite também a criação de diversos tipos de relatórios que podem ser exportados nos formatos de arquivos de texto mais utilizados no mercado. Os relatórios podem ser completos e simples, constando todos os dados e resultados obtidos, ou em formato de blocos mais sofisticados, que podem ser selecionados para a finalidade desejada pelo usuário. Assim como

os relatórios, os gráficos, tais como diagramas unifilares, curvas de coordenação e seletividade, entre outros, podem ser exportados para diversos formatos de extensões gráficas utilizadas.

Apresenta uma interface simples e intuitiva de uso, porém não há versão em português do mesmo. Junto ao programa é fornecido um tutorial básico de uso o qual guia o usuário de maneira simples e objetiva, fornecendo todos os comandos básicos para uso do mesmo. Além disso, há diversos exemplos prontos no banco de dados do programa que permitem ao usuário visualizar circuitos prontos, bem como gerar relatórios de diversos estudos disponibilizados, curvas TCC de equipamentos e dispositivos de proteção.

As Figuras 18, 19, 20 e 21 apresentam algumas das interfaces do programa utilizadas no levantamento das curvas de seletividade, bem como a interface geral utilizada para gerar o diagrama unifilar base para todas as funções que o programa disponibiliza. Para cada tipo de estudo possível do programa trabalham-se dentro de uma interface interna diferente, algumas se mesclam, porém a base sempre será o diagrama unifilar criado na interface principal do programa.

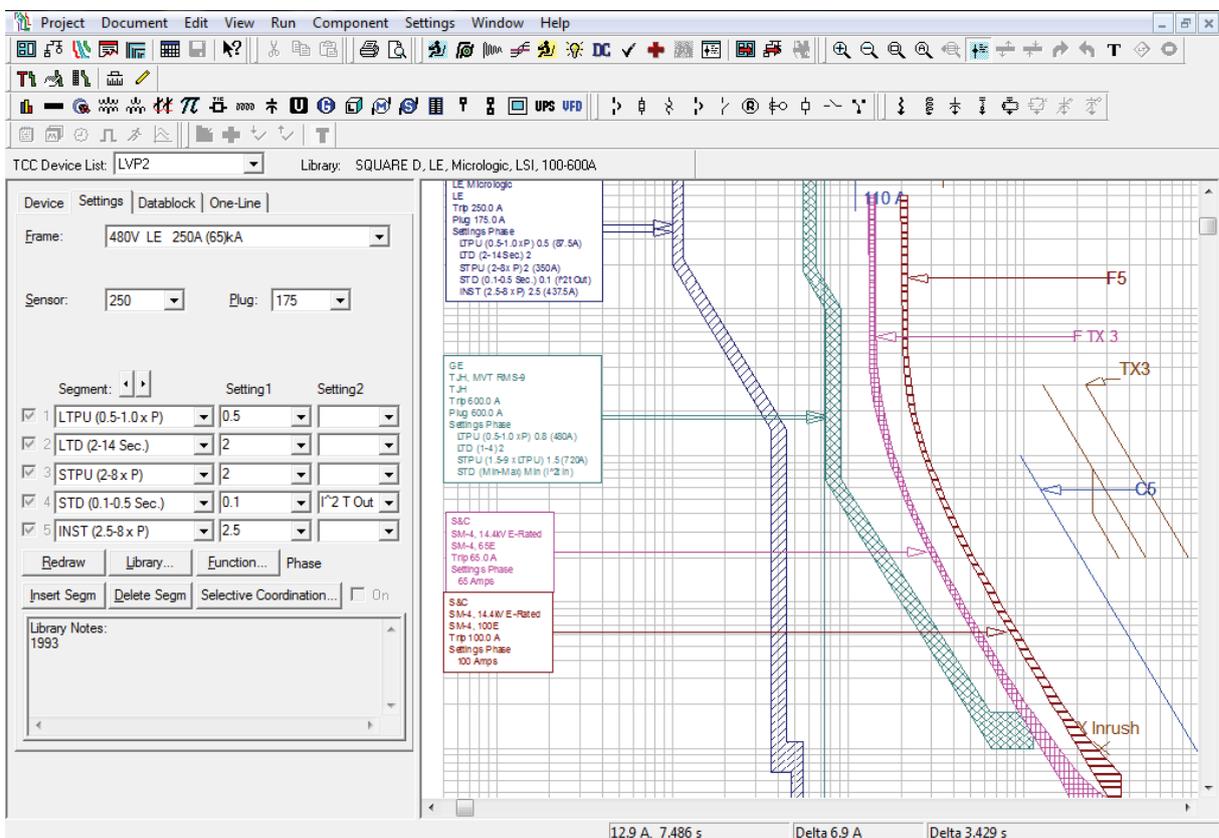


Figura 18: Interface de ajuste e geração de curvas TCC (Fonte: PTW)

A Figura 18 exemplifica a interface de ajustes, juntamente com a curva TCC de coordenação de dispositivos geradas pelo PTW. Nesta interface é possível ajustar as proteções, configurando todos os seus parâmetros, bem como os dos equipamentos envolvidos no caso específico. Assim que modificado o ajuste as curvas são automaticamente ajustadas aos novos valores, tornando possível visualizar o resultado de novos ajustes instantaneamente, podendo-se validar as curvas de maneira rápida. As curvas podem ser exportadas em alguns formatos de imagem, facilitando a confecção de relatórios de estudos ou de calibração exigidos por algumas concessionárias de energia quando se contrata ou modifica a demanda da instalação.

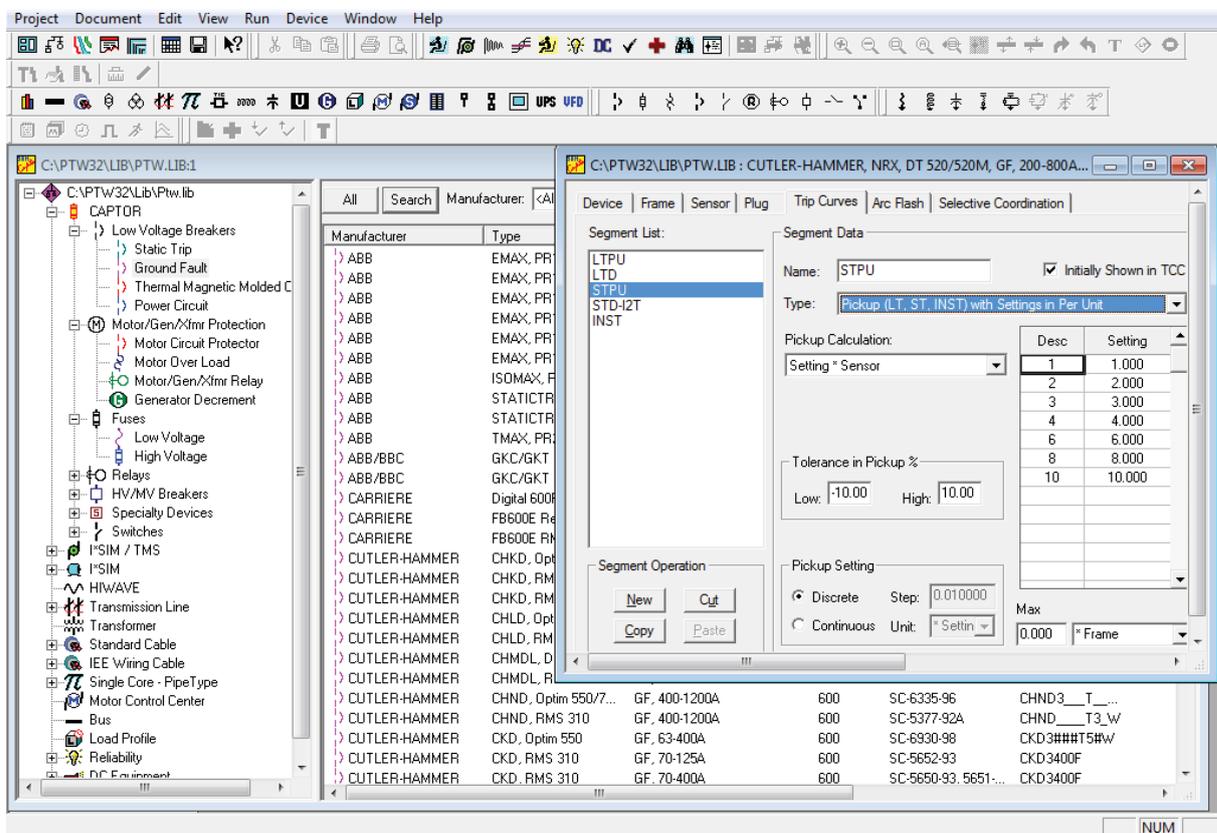


Figura 19: Interface da biblioteca com a edição de dispositivo (Fonte: PTW)

A biblioteca que o PTW disponibiliza é organizada e apresentada conforme Figura 19. Conforme se pode visualizar ela é organizada por dispositivos e equipamentos, bem como pelos seus tipos e variações, podendo ainda filtrar os dispositivos por fabricantes, organizar por características como tensão, função, isolamento, tipo, entre outros.

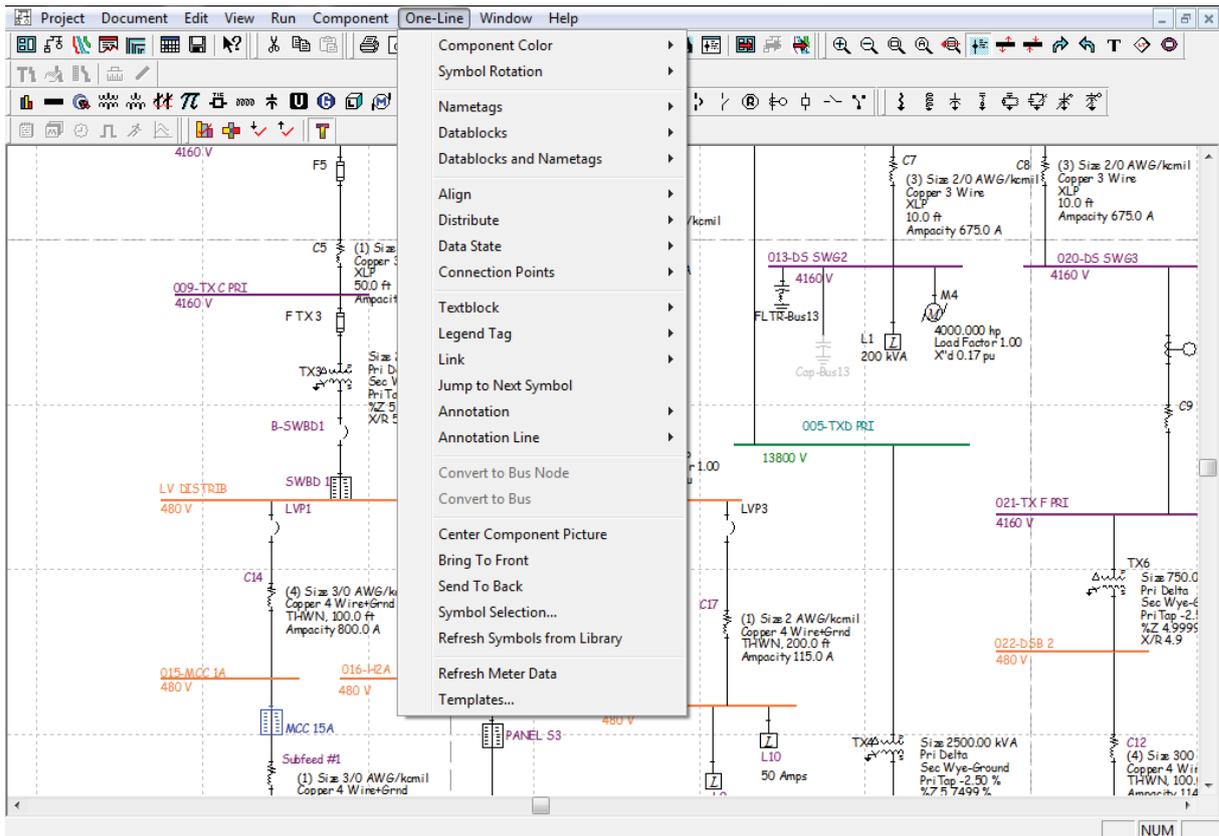


Figura 20: Interface geral do programa para criação e/ou edição de diagrama unifilar (Fonte: PTW)

O diagrama unifilar é a base de todo e qualquer estudo elétrico a ser gerado com o auxílio do PTW. Dentro do programa sua criação se dá de maneira simples e intuitiva devido as ferramentas e atalhos gráficos disponibilizados pelo mesmo, conforme visualização na Figura 20. O programa permite organizar níveis de tensão, tipos de dispositivos, entre outros, por cor e também disponibiliza diversas descrições pré-organizadas em sua base de dados que mostram as características de cada dispositivo ou equipamento envolvido no diagrama, com a possibilidade de edição dos mesmos conforme necessidade. O resultado é a possibilidade de um diagrama muito bem organizado visualmente, o que facilita os trabalhos posteriores utilizando o *software* PTW.

É possível exportar o diagrama unifilar criado em formatos diversos, inclusive em formato DXF, que pode ser editado em programas de edições do tipo CAD, que são as mais utilizadas nos projetos de instalações elétricas.

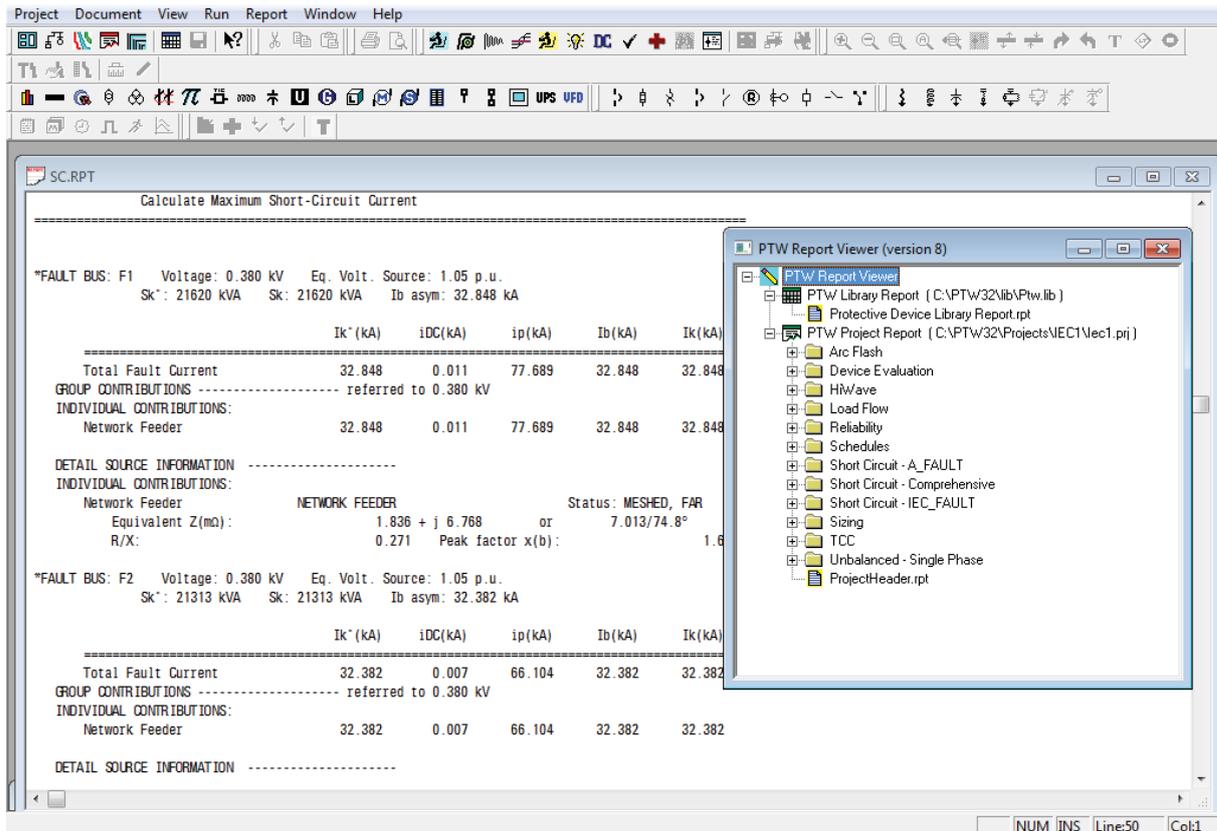


Figura 21: Exemplo de relatório gerado pelo *software* (Fonte: PTW)

Diversos relatórios podem ser gerados no PTW baseado no diagrama unifilar criado pelo usuário, dentre eles podemos citar: curto-circuito, fluxo de potência (ou carga), dimensionamento, entre outros. A Figura 21 mostra um exemplo de relatório gerado pelo programa, o qual é gerado de maneira detalhista sendo feito dispositivo a dispositivo envolvido no desejado relatório.

O PTW constitui uma poderosa ferramenta auxiliar para engenheiros eletricitistas que trabalham com projetos de instalações industriais e estudos e análises de sistemas elétricos. O *software* segue as mais importantes normas internacionais para sistemas elétricos, tais como IEEE, ANSI, IEC, constituindo uma ferramenta extremamente confiável, desde que o conhecimento do engenheiro que utiliza o programa não permita falhas de conceitos da engenharia elétrica e de suas especialidades, uma vez que o *software* fornecerá resultados baseados nos dados fornecidos pelo usuário, porém alguns erros simples de montagem de circuito são reportados pelo PTW tais como níveis de tensão diferentes, suportabilidade do equipamento em relação ao nível de curto-circuito, falta de dados, entre outros.

6 ESTUDO DE CASO DO SISTEMA ELÉTRICO

O sistema elétrico do presente trabalho constitui uma subestação secundária de um sistema elétrico típico de refinaria de petróleo. A unidade é alimentada pela concessionária de energia elétrica com dois pontos de entrada com tensão 138 kilovolts. A unidade possui uma subestação principal que reduz o nível de tensão de entrada para 13,8 kilovolts e 4,16 kilovolts e com esses níveis de tensão a energia elétrica é distribuída por toda extensão da planta, alimentando alguns equipamentos e outras subestações menores.

Para cada área ou unidade interna pré-determinada são construídas subestações secundárias, as quais reduzem o nível de tensão para 480 volts e posteriormente para 220/127 volts para alimentar os equipamentos, sistema de iluminação e tomadas. Uma dessas subestações secundárias é o foco da análise de coordenação e seletividade do presente trabalho.

A subestação em questão é composta de entrada com nível de tensão 4,16 kilovolts, a qual alimenta o transformador principal da subestação, cujo tipo de ligação é Dy30, com neutro do secundário solidamente aterrado. O secundário do transformador apresenta nível de tensão 480 volts, o qual alimenta diretamente um painel principal que distribui as cargas solicitadas dessa subestação, sendo motores, banco de capacitor, cargas não motóricas e outros transformadores abaixadores de tensão. O nível de tensão é reduzido novamente, desta vez para 220/127 volts que alimenta outros painéis e cargas do sistema em questão, assim como o transformador principal, os transformadores secundários são do grupo de ligação Dy30, com neutro solidamente aterrado. O nível de tensão final alimenta todo sistema de iluminação e tomadas de uso geral da planta, bem como alguns motores de processo e do sistema de condicionamento de ar.

A Figura 22 apresenta o Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico do presente trabalho. Normalmente em um sistema elétrico industrial o fabricante dos equipamentos é padronizado a fim de evitar incompatibilidades e estoque grande de peças sobressalentes para reposição, porém diversos fabricantes e modelos são utilizados no estudo a fim de apresentar melhor a funcionalidade do PTW.

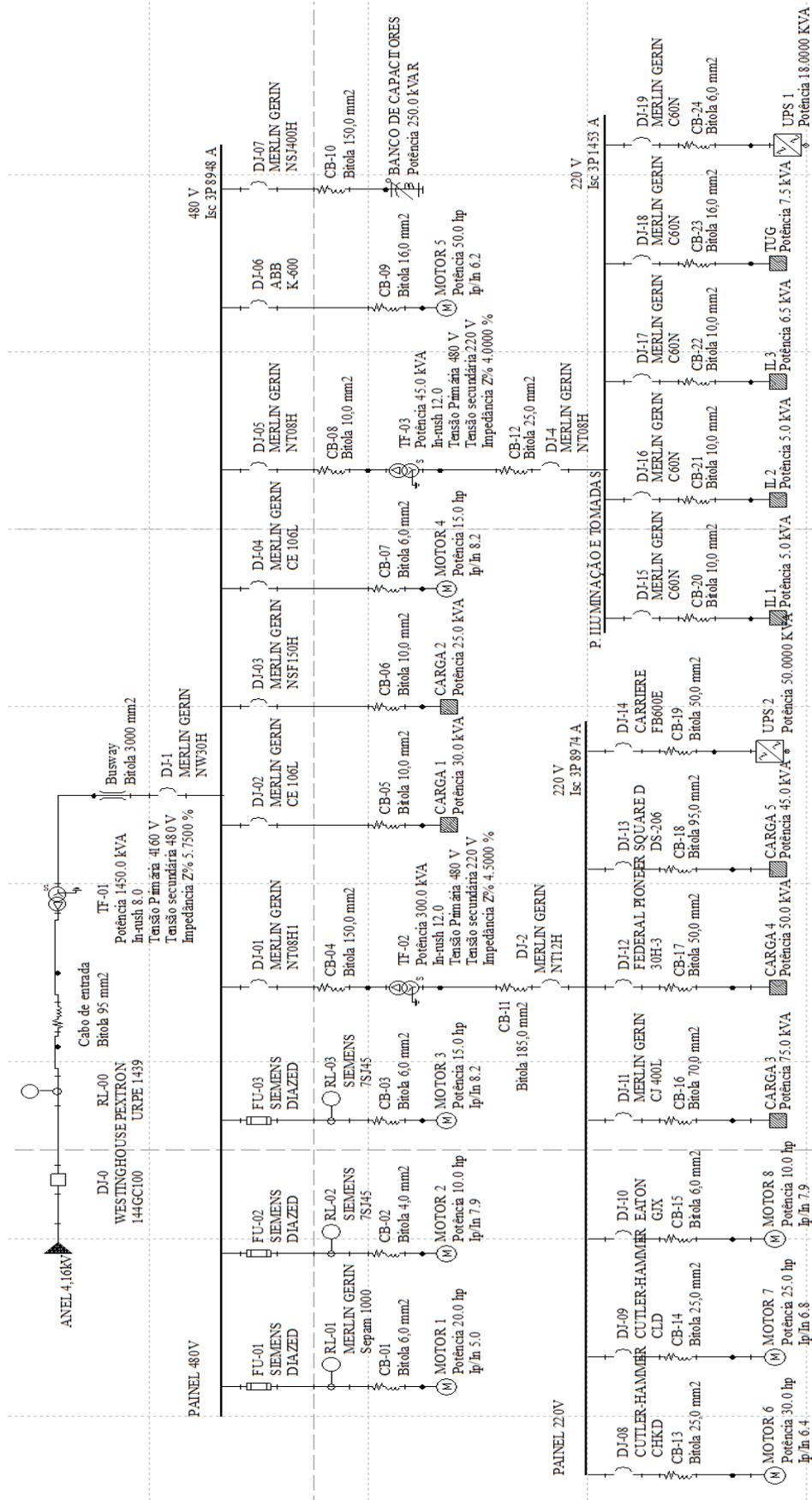


Figura 22: Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico

Nas tabelas 3, 4, 5 e 6 são apresentados os parâmetros dos equipamentos e cargas envolvidas no presente estudo, detalhando os equipamentos quanto às características elétricas de cada um, bem como nomeando e fornecendo um *tag* ao equipamento. O *tag* tem a finalidade de identificar o equipamento dentro do projeto a fim de reduzir o tamanho da identificação e deixar o projeto melhor organizado e limpo visualmente, bem como facilitar a identificação dos equipamentos e organizar o estoque de reposições.

A Tabela 3 apresenta os motores de indução trifásicos que constituem o sistema elétrico em questão, para tanto foram utilizados motores WEG de alto rendimento da linha W22 PLUS, com diversas finalidades e aplicações.

TABELA DE MOTORES								
MOTOR	POT.[HP]	POT. AT.[kW]	REND.	F. DE POT.	P. AP. [KVA]	TENSÃO [V]	In [A]	Ip/In
1	20,0	15,0	0,924	0,81	20,04	480	24,11	6,8
2	10,0	7,5	0,910	0,84	9,81	480	11,80	7,9
3	15,0	11,0	0,917	0,85	14,11	480	16,97	8,2
4	15,0	11,0	0,917	0,85	14,11	480	16,97	8,2
5	50,0	37,0	0,936	0,85	46,51	480	55,94	6,2
6	30,0	22,0	0,930	0,84	28,16	220	73,91	6,4
7	25,0	18,5	0,928	0,81	24,61	220	64,59	6,8
8	10,0	7,5	0,910	0,84	9,81	220	25,75	7,9

Tabela 3: Motores de Indução trifásico

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros dos transformadores de potência do sistema elétrico. Seus valores foram obtidos baseados nos catálogos técnicos da linha Resimold do fabricante Schneider Electric.

TABELA DE TRANSFORMADORES							
TRANSFORMADOR	TIPO	POTÊNCIA [kVA]	T. PRIM. [V]	T. SEC. [V]	Z%	In Prim. [A]	In Sec. [A]
TF-01	ÓLEO	1250/1450	4160	480	5,8	174/202	1504/1744
TF-02	SECO	300	480	220/127	4,5	361	787
TF-03	SECO	45	480	220/127	4,0	54	118

Tabela 4: Transformadores de potência

A lista de cabos apresentada na Tabela 5 informa as bitolas e comprimentos dos circuitos, bem como origem e destino. Esse padrão é normalmente utilizado nos projetos de instalações elétricas industriais.

LISTA DE CABOS				
De	Para	Fases	Bitola [mm ²]	Comp. [m]
Entrada	TF-01	3F	(3x95)	50,0
TF-01	Painel 480V	3F+T	Busway	15,0
Painel 480	Motor 1	3F+T	(3x6)+(1x6)	40,0
Painel 480	Motor 2	3F+T	(3x4)+(1x4)	70,0
Painel 480	Motor 3	3F+T	(3x6)+(1x6)	52,0
Painel 480	Motor 4	3F+T	(3x6)+(1x6)	21,0
Painel 480	Motor 5	3F+T	(3x16)+(1x16)	15,0
Painel 480	Carga 1	3F+T	(3x10)+(1x10)	20,0
Painel 480	Carga 2	3F+T	(3x10)+(1x10)	70,0
Painel 480	TF-02	3F+T	(3x150)+(1x95)	15,0
Painel 480	TF-03	3F+T	(3x10)+(1x10)	20,0
Painel 480	B. de Capac.	3F+T	(3x150)+(1x95)	10,0
TF-02	Painel 220V	3F+N+T	(3x(2x185))+(2x120)+(1x185)	20,0
Painel 220V	Motor 6	3F+T	(3x25)+(1x16)	22,0
Painel 220V	Motor 7	3F+T	(3x25)+(1x16)	31,0
Painel 220V	Motor 8	3F+T	(3x6)+(1x6)	43,0
Painel 220V	Carga 3	3F+T	(3x70)+(1x35)	50,0
Painel 220V	Carga 4	3F+T	(3x50)+(1x25)	50,0
Painel 220V	Carga 5	3F+T	(3x95)+(1x50)	100,0
Painel 220V	UPS 2	3F+T	(3x50)+(1x25)	32,0
TF-03	P. Ilum. e tom.	3F+N+T	(3x25)+(1x25)+(1x16)	30,0
P. Ilum. e tom.	IL 1	3F+T	(3x10)+(1x10)	80,0
P. Ilum. e tom.	IL 2	3F+T	(3x10)+(1x10)	75,0
P. Ilum. e tom.	IL 3	3F+T	(3x10)+(1x10)	93,0
P. Ilum. e tom.	TUG	3F+N+T	(3x16)+(1x16)+(1x16)	105,0
P. Ilum. e tom.	UPS 1	3F+T	(3x6)+(1x6)	55,0

Tabela 5: Lista de cabos

A Tabela 6 apresenta as características elétricas das demais cargas do sistema elétrico, as chamadas cargas não motóricas.

TABELA DE CARGAS NÃO MOTÓRICAS					
CARGA	P. APAR. [kVA]	F. DE POT.	POT. AT. [kW]	TENSÃO [V]	In
Carga 1	30,0	0,92	27,60	480	36,08
Carga 2	25,0	0,90	22,50	480	30,07
Carga 3	75,0	0,85	63,75	220	196,82
Carga 4	50,0	0,90	45,00	220	131,22
Carga 5	45,0	0,80	36,00	220	118,09
IL 1	5,0	0,92	4,60	220	13,12
IL 2	5,0	0,95	4,75	220	13,12
IL 3	6,5	0,92	5,98	220	17,06
TUG	7,5	0,92	6,90	220	19,68
UPS 1	18	0,90	16,20	480	21,65
UPS 2	50	0,90	45,00	220	131,22
B. CAP.	250 [kVAR]	-	-	480	300,70

Tabela 6: Cargas não motóricas

7 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO

O circuito elétrico industrial em questão é analisado ponto a ponto, ou seja, é feita uma análise em cada dispositivo de proteção juntamente com o equipamento e/ou cabo a ser protegido pelo mesmo, além disso, como o estudo de caso se trata de um estudo de seletividade e coordenação a análise é feita com o dispositivo á montante, a fim de garantir a coordenação dos dispositivos e também a seletividade do dispositivo em questão.

Os resultados são apresentados na forma de gráficos constando os equipamentos e dispositivos envolvidos, identificados nas respectivas curvas TCC. Além disso, foram habilitados no PTW os chamados *datablocks*, que são janelas constando as informações desejadas para cada tipo de item envolvido na geração das curvas, bem como os ajustes e valores de atuação ou disparo.

Inicialmente gera-se um relatório a fim de se obter as correntes de curto circuito que podem circular pelo sistema, com isso pode-se definir melhor os dispositivos de proteção a serem utilizados, uma vez que cada um deles possui um valor de corrente de curto circuito máximo que suportam. O relatório completo é bastante extenso e informa o nível de curto circuito em cada ponto do sistema, bem como valores de impedâncias, relações X/R nos diversos pontos e também ângulos das correntes, porém para o presente trabalho somente as informações de curto circuito nos barramentos dos painéis são levados em conta. Um resumo dos valores dessas correntes de curto circuito é apresentado na Tabela 7, sendo os mesmos obtidos na simulação do diagrama unifilar apresentado na Figura 14.

Barramento	Tensão [V]	CC assim. [A]		CC sim [A]	
		Trifásico	Fase-Terra	Trifásico	Fase-Terra
Painel IL. e tom	220	1468,4	1197,2	1453,2	1188,4
Painel 220V	220	10261,2	6745,9	8974,5	6574,4
Painel 480V	480	11188,9	14015,3	8947,5	11333,0

Tabela 7: Resumo dos níveis de curto circuito

Baseado nos valores da Tabela 7 os níveis de suportabilidade dos dispositivos de proteção foram definidos acima dos valores de corrente apresentados. Os níveis de curto circuito são relativamente baixos devido à contribuição na entrada do sistema elétrico em questão ser baixo também, com isso o nível no decorrer dos circuitos reduzem devido aos limites dos transformadores e cabos do sistema.

Os dispositivos de proteção são ajustados de acordo com as recomendações descritas no item 4 do presente trabalho, para tanto resume-se os valores calculados por tais critérios na Tabela 8, levando-se em conta os valores de *Long* e *Short Time* nos dispositivos de proteção que permitem essa funcionalidade.

AJUSTES DAS PROTEÇÕES				
Equipamento	In	Ipr	Ipart. / Imag	Iprs
Motor 1	24,11	25,31	163,92	270,47
Motor 2	11,80	12,39	93,23	153,83
Motor 3	16,97	17,82	139,19	229,67
Motor 4	16,97	17,82	139,19	229,67
Motor 5	55,94	58,73	346,81	572,24
Motor 6	73,91	77,60	473,00	780,44
Motor 7	64,59	67,82	439,20	724,68
Motor 8	25,75	27,04	203,42	335,64
TF-01 - Prim.	174/202	218/253	1392/1616	1670/1939
TF-02 - Prim.	361,00	454,86	5054,00	6064,80
TF-03 - Prim.	54,00	68,04	756,00	907,20
TF-01 - Sec.	1504/1744	1880/2180	-	-
TF-02 - Sec.	787,00	983,75	-	-
TF-03 - Sec.	118,00	147,50	-	-
Carga 1	36,08	41,50	-	-
Carga 2	30,07	34,58	-	-
Carga 3	196,82	226,35	-	-
Carga 4	131,22	150,90	-	-
Carga 5	118,09	135,81	-	-
IL 1	13,12	15,09	-	-
IL 2	13,12	15,09	-	-
IL 3	17,06	19,62	-	-
TUG	19,68	22,63	-	-
UPS 1	21,65	24,90	-	-
UPS 2	131,22	150,90	-	-
B. CAP.	300,70	360,84	370,00	407,00

Tabela 8: Resumo dos valores de ajustes de proteções dos equipamentos

As curvas geradas levam em conta o equipamento a ser protegido, com isso as curvas de seu respectivo dispositivo de proteção, respectivo cabo alimentador e proteção à montante na entrada do painel, quando for carga terminal, ou no primário do transformador, quando for entrada de painel, são apresentadas na mesma folha gráfica podendo-se visualizar a coordenação dos dispositivos e com isso validar a curva para tal finalidade, bem como garantir a seletividade.

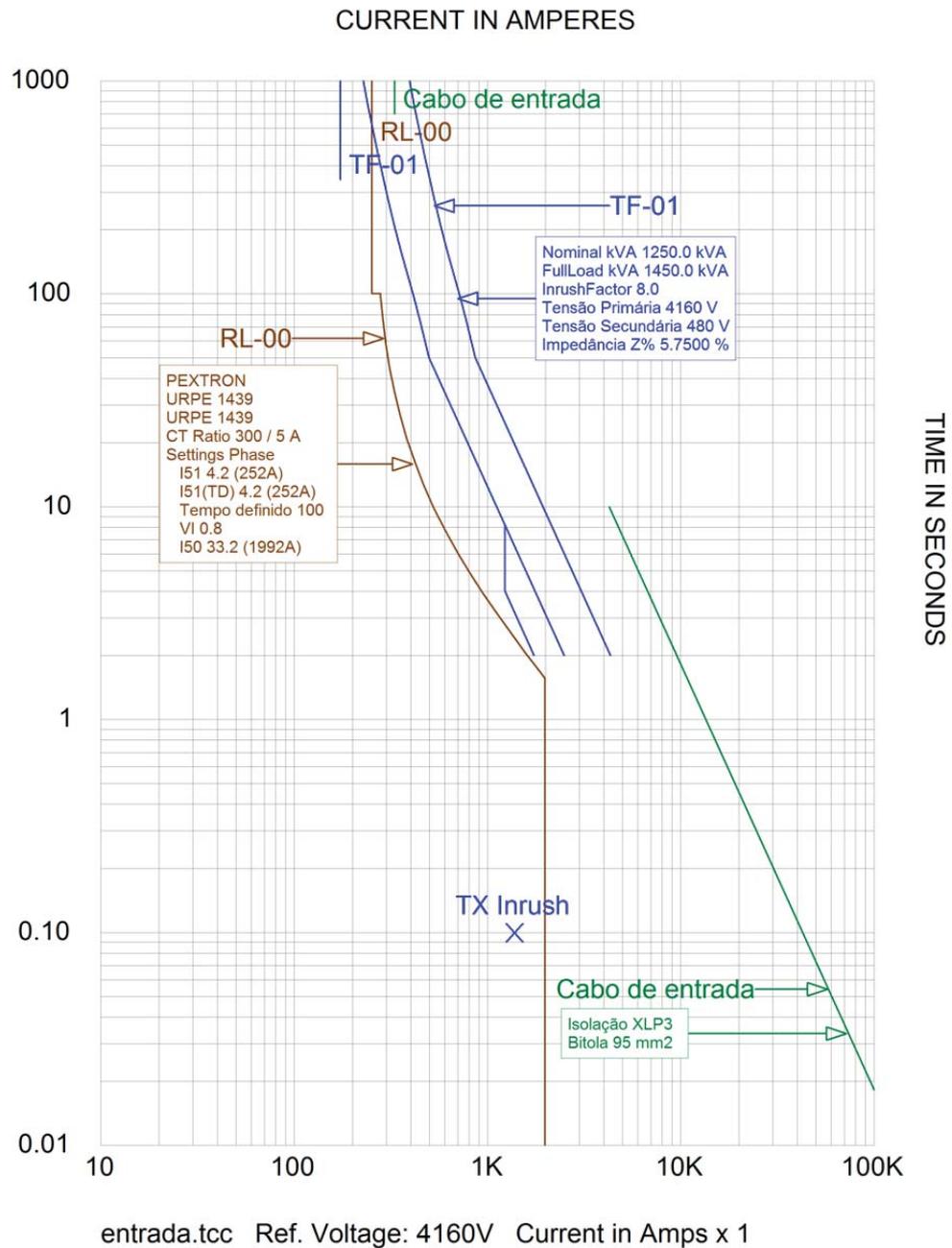


Figura 23: Proteção da entrada do sistema e primário do transformador de entrada

O transformador de entrada do sistema (TF-01), bem como o cabo de alimentação, são protegidos por relé digital com curva muito inversa e ajustes de acordo com a Tabela 8. Na Figura 23 visualizam-se as curvas do relé, do transformador e do cabo, devidamente coordenados uma vez que o transformador opera normalmente e nominalmente sem a proteção atuar e também o cabo está devidamente protegido.

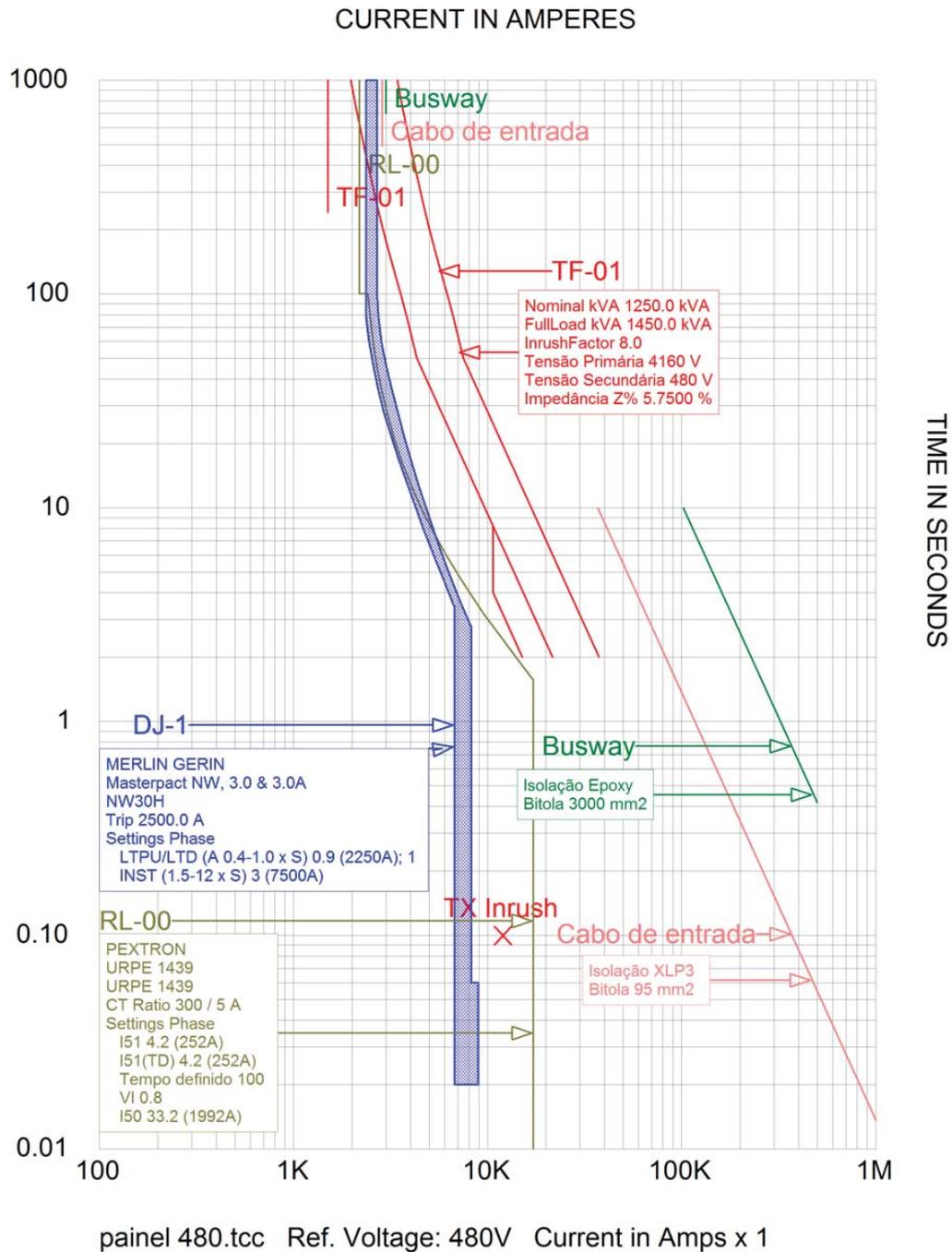


Figura 24: Proteção do secundário do transformador de entrada (TF-01)

A Figura 24 apresenta a curva de proteção do secundário do transformador de entrada do sistema (TF-01) e conseqüentemente do painel de 480V. A proteção é feita com disjuntor tipo *Power* com atuador eletrônico, do fabricante Merlin Gerin representado no Brasil pela Schneider Electric, disjuntores Masterpact NW com atuador Micrologic 3.0. A proteção principal é para sobrecarga baseada nos limites do transformador, além disso, a proteção do *Busway* também é efetiva com esse dispositivo.

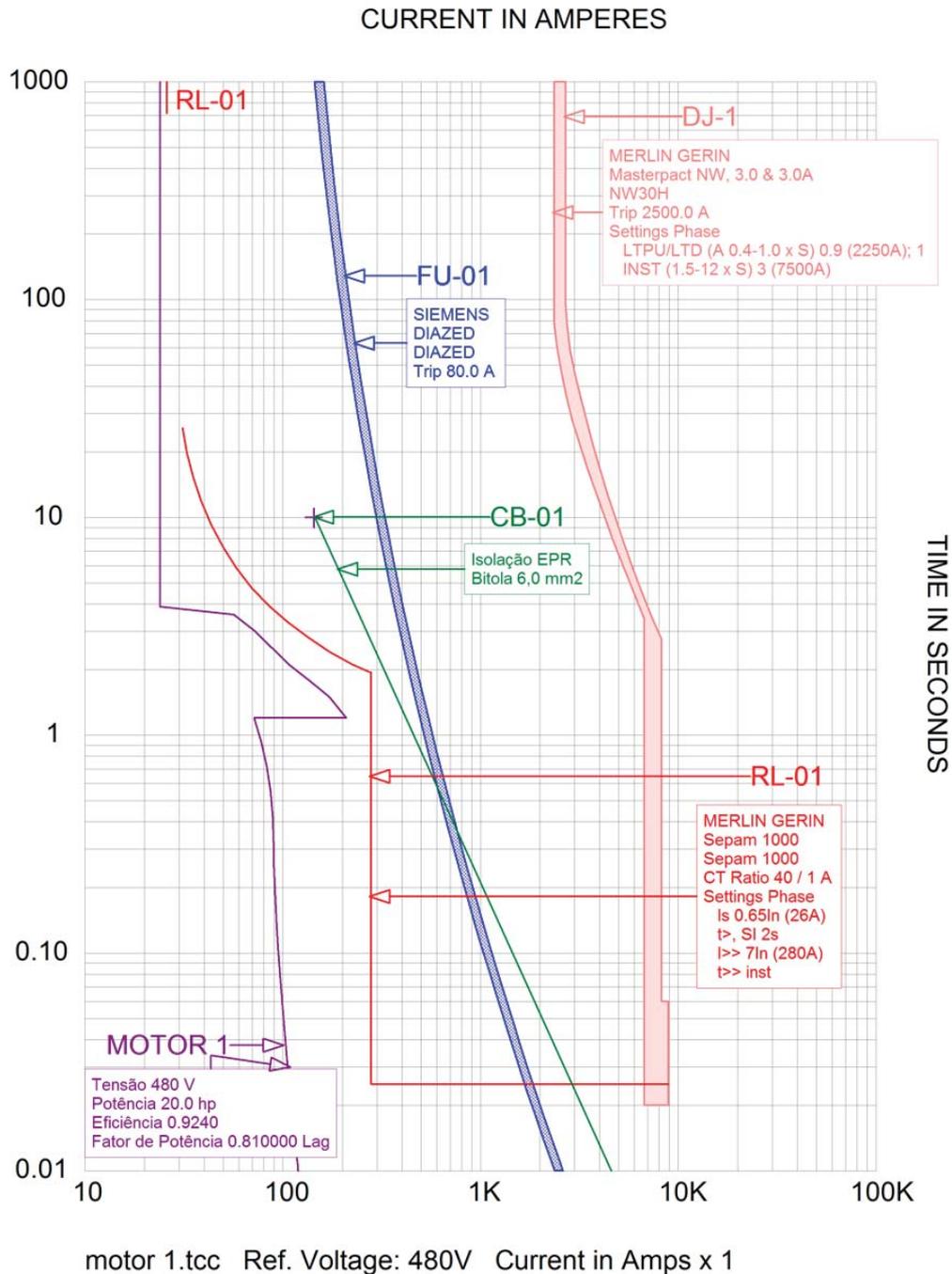


Figura 25: Curva de proteção do Motor 1

O Motor 1 do sistema possui partida do tipo Estrela-Triângulo e sua proteção é feita com fusível retardado e relé digital. O TC auxiliar do relé possui relação de transformação de 40 para 1. Como pode ser visto na Figura 25 o motor está devidamente protegido, inclusive durante a partida, o mesmo vale para o cabo alimentador do mesmo, cuja curva térmica situa-se à direita da curva do relé. Além disso, a coordenação entre o disjuntor de entrada do painel, o fusível e o relé do motor está garantida.

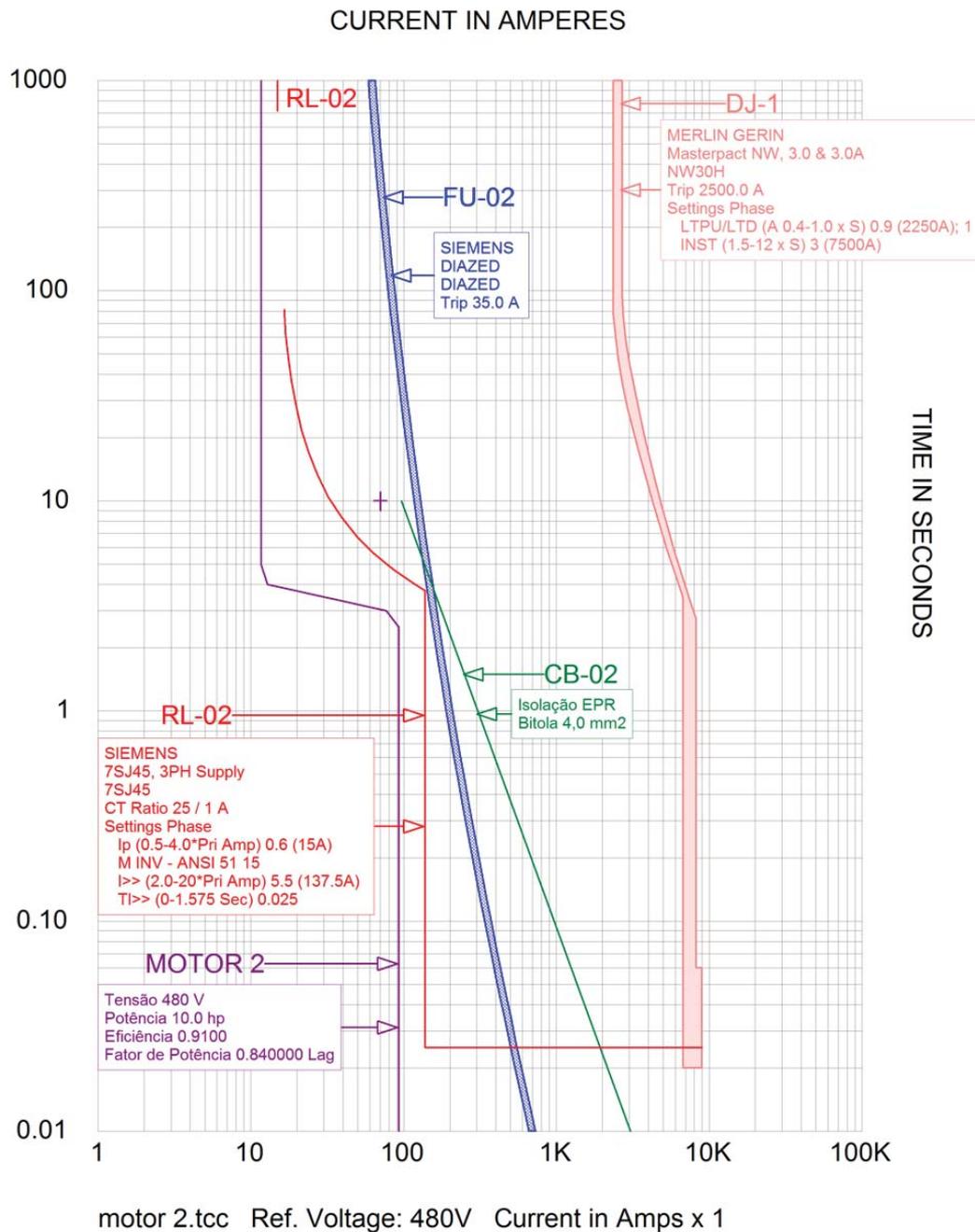


Figura 26: Proteção do Motor 2

A Figura 26 apresenta as curvas de coordenação para a proteção do Motor 2, nela estão presentes as curvas do fusível e relé digital que protegem o motor, bem como o disjuntor de entrada do painel que o alimenta. Pode-se visualizar ainda a curva térmica do cabo alimentador do Motor 2, sendo que o mesmo encontra-se protegido pelo relé do motor e também suporta a partida direta do mesmo.

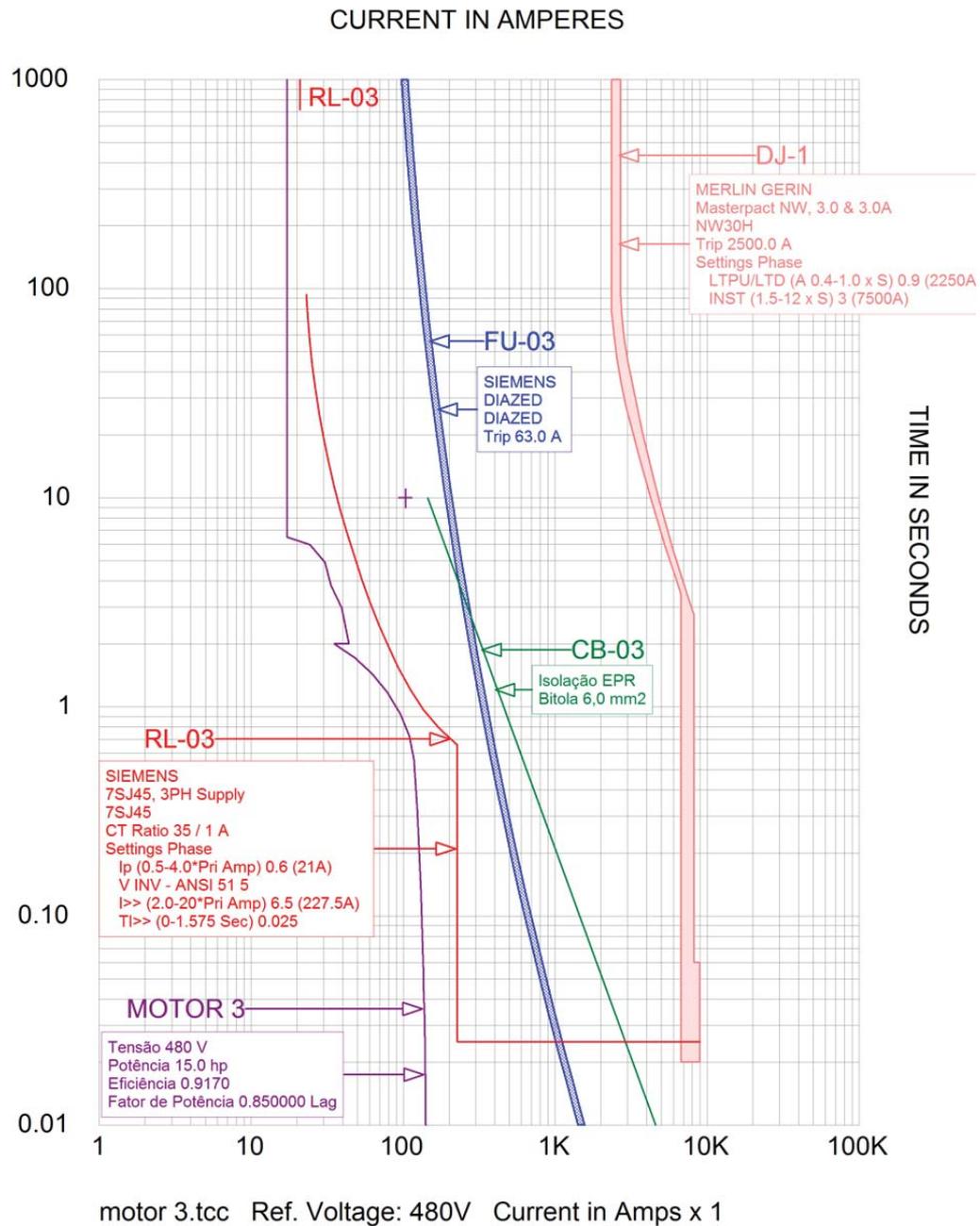


Figura 27: Motor 3 e sua proteção

O Motor 3 apresenta um método de partida não usual no país, o chamado resistência em série (*serie resistance*) o qual o motor parte inicialmente com resistências em série acopladas em seus terminais e posteriormente retiram-se as resistências, limitando assim a corrente de partida. O fusível e o relé protegem o motor durante sua operação, conforme Figura 27, sendo os dois devidamente coordenados, além disso o cabo alimentador está protegido pelo relé digital e a seletividade é garantida uma vez que a curva do disjuntor do painel situa-se à direita das curvas do relé e fusível.

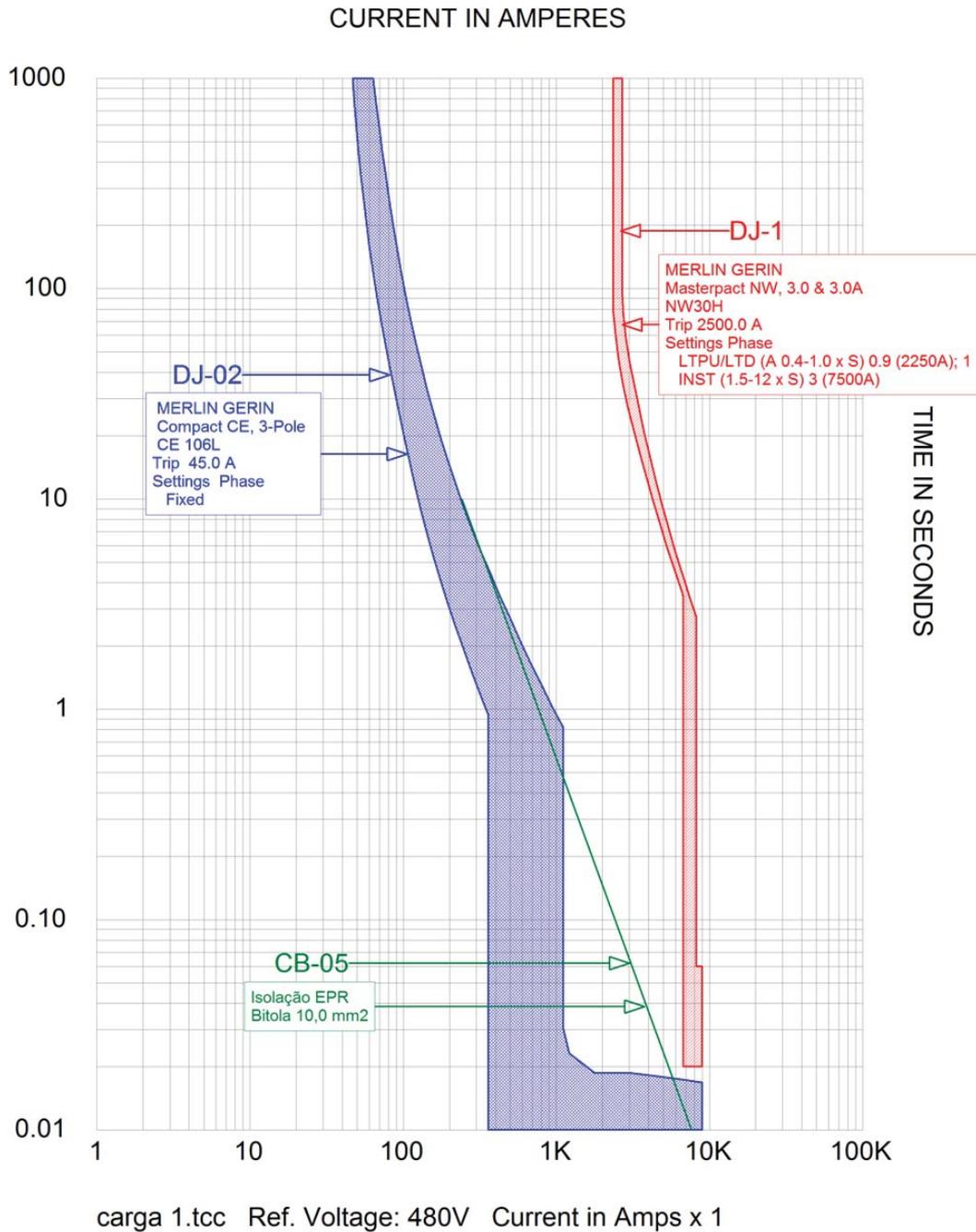


Figura 28: Proteção para a Carga 1

A Carga 1 é protegida por um disjuntor em caixa moldada com curva característica visível na Figura 28, além da proteção da carga, a proteção é feita no cabo alimentador da mesma pelo mesmo disjuntor. A coordenação é garantida, pois o disjuntor à montante da proteção da carga possui curva característica situada à direita na folha TCC. É possível visualizar a incerteza do disjuntor fixo, uma vez que a atuação se dá dentro da faixa de atuação tendo uma precisão menor que o relé.

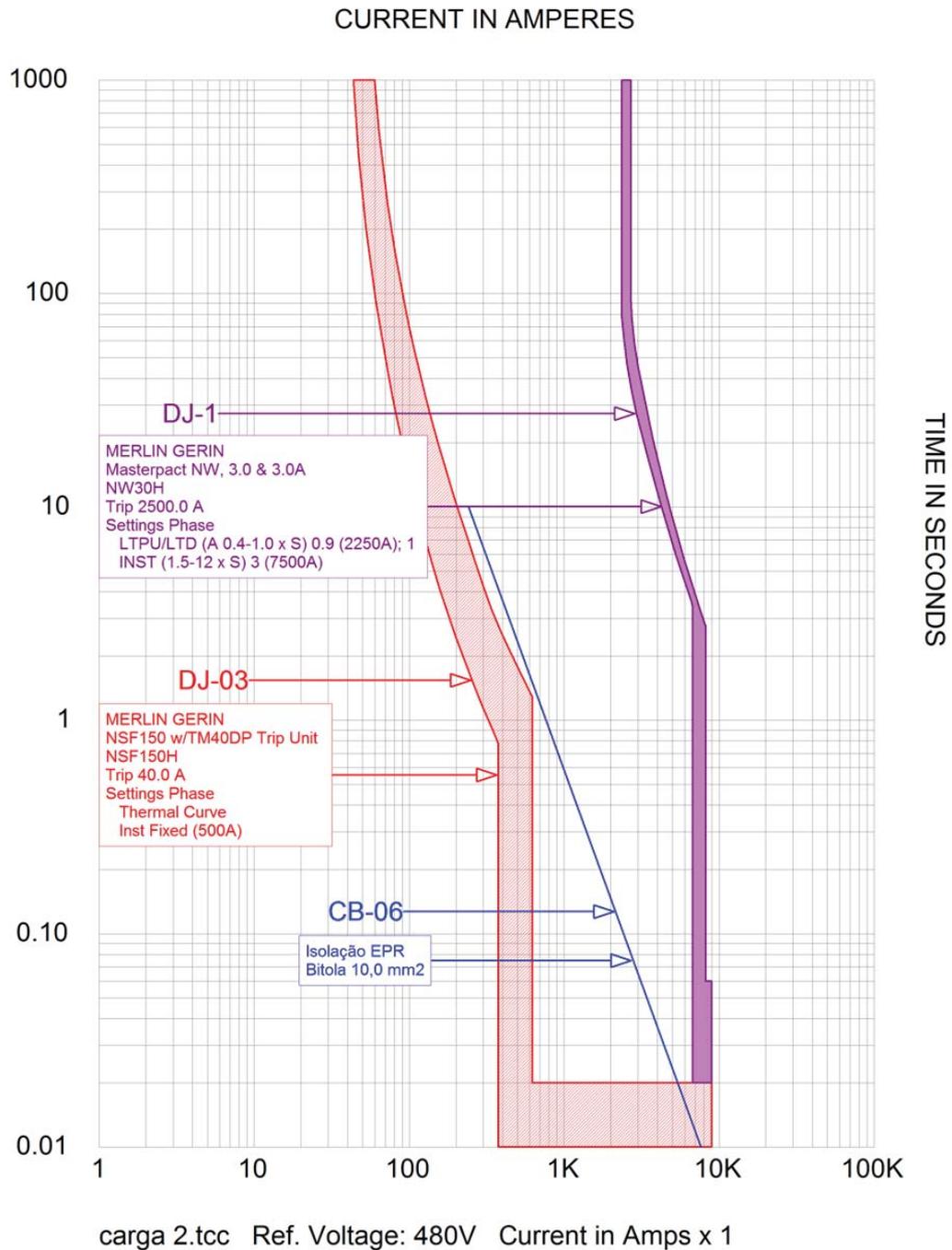


Figura 29: Curva de atuação da proteção da Carga 2

A coordenação da proteção da Carga 2 e da proteção à montante é mostrada na Figura 29, sendo que a proteção do painel atua posteriormente à proteção da carga no caso desta falhar. A proteção se dá através de um disjuntor termomagnético que, além de proteger a carga, garante a integridade do cabo alimentador, além disso, o sistema tem a garantia da seletividade, uma vez que o disjuntor da Carga 2 atua e isola a possível falha sem que a proteção do painel atue.

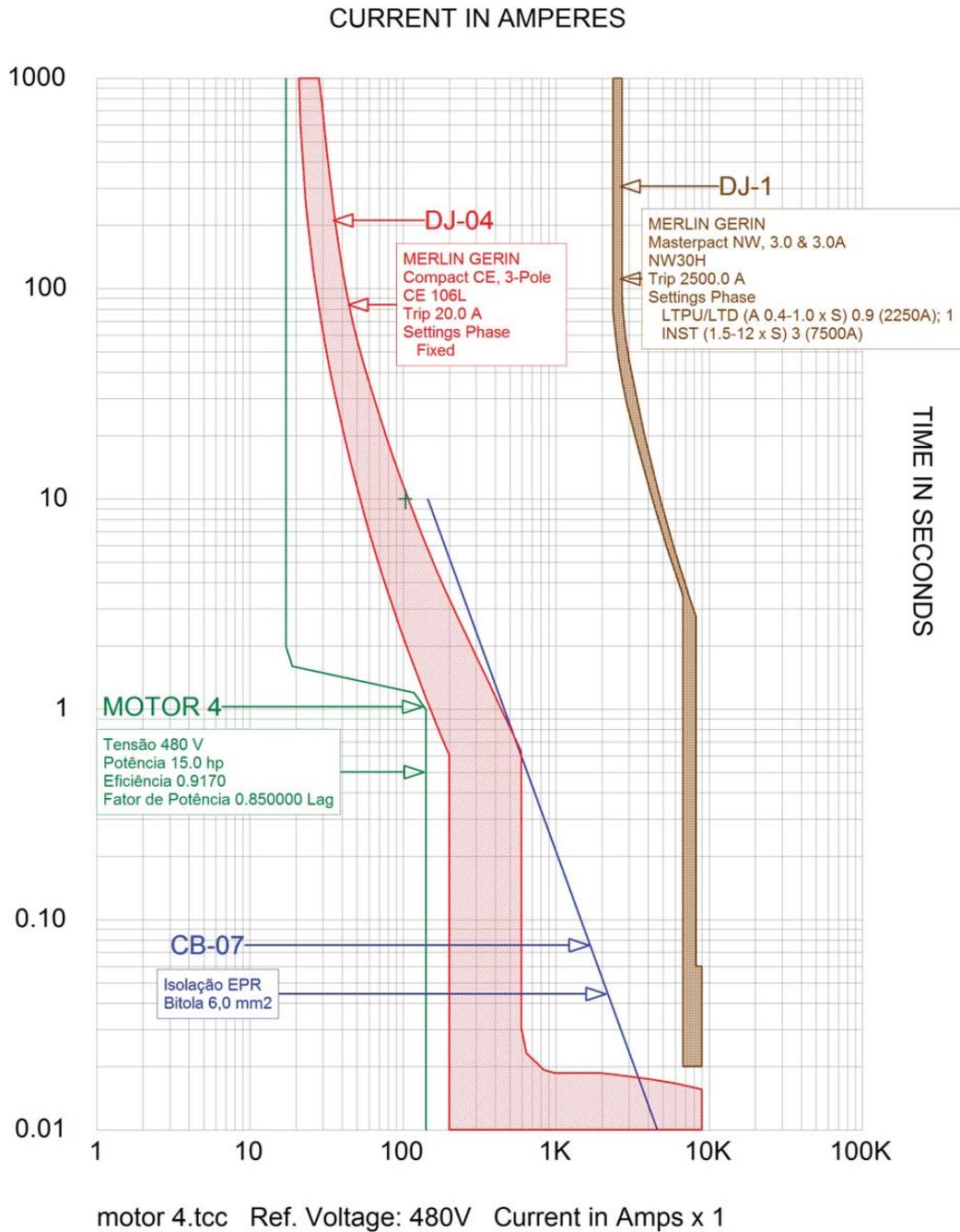


Figura 30: Proteção para o Motor 4

O Motor 4 é protegido por um disjuntor termomagnético normal, diferentemente dos Motores 1, 2 e 3, porém a garantia de proteção é a mesma tendo apenas uma imprecisão em relação ao relé. Na Figura 30 é possível visualizar a curva do motor com partida direta, a curva da proteção do mesmo mais à direita, a curva térmica do cabo e por último a proteção do painel, ou seja, o sistema está devidamente coordenado e também seletivo, com todos os equipamentos protegidos.

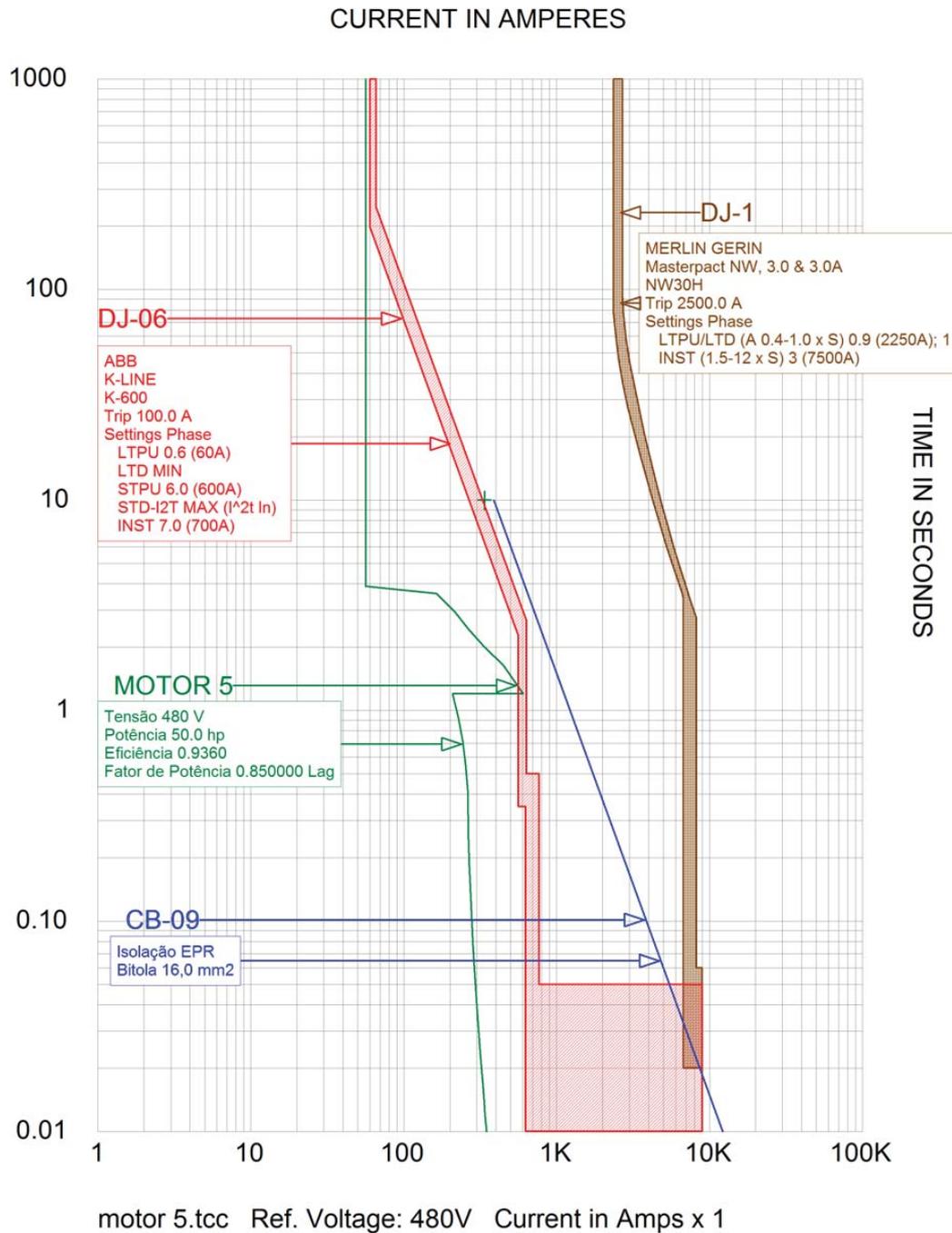


Figura 31: Proteção do Motor 5

O Motor 5 parte através de chaveamento Estrela-Triângulo e sua proteção é feita através de disjuntor com ajustes nos disparos. A Figura 31 mostra as curvas de atuações das proteções bem como as curvas do motor e cabo alimentador sendo que a coordenação e a seletividade são garantidas pelas características e ajustes dos dispositivos de proteção. Outro ponto importante é o ponto de rotor bloqueado marcado por uma cruz verde, esse ponto não é atingido, pois a proteção atua antes e garante a integridade do motor.

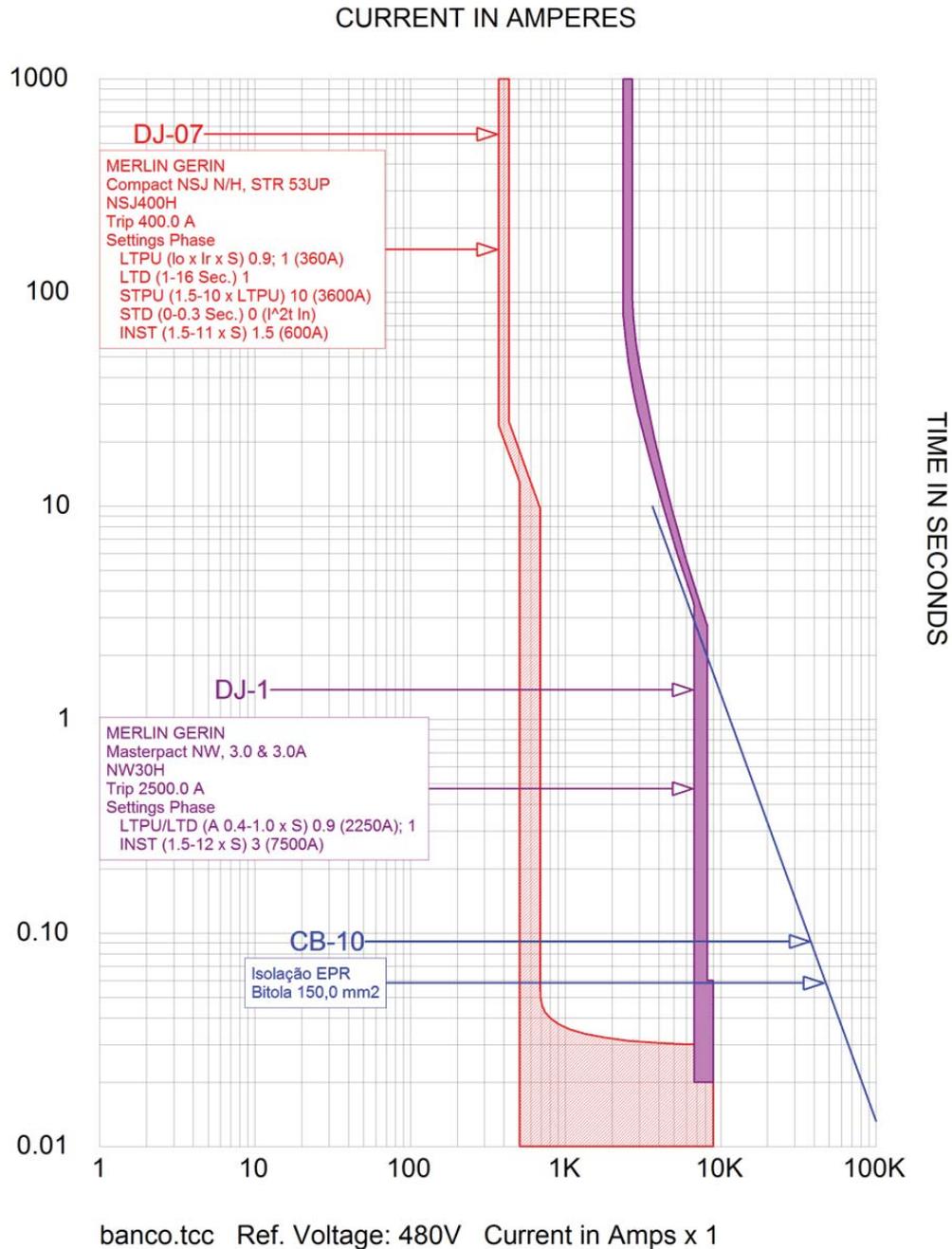


Figura 32: Curva de atuação da proteção do Banco de Capacitores

O Banco de Capacitores é protegido por um disjuntor com disparador eletrônico, permitindo assim uma flexibilidade maior, sendo os ajustes feitos conforme Tabela 8. Tanto a operação normal quanto a corrente inicial de alimentação são garantidas sem a atuação do dispositivo. A Figura 32 apresenta as curvas do disjuntor, cabo e disjuntor de entrada do painel, sendo visível a coordenação e a seletividade. Garantindo assim a integridade do banco de capacitores e também do cabo alimentador.

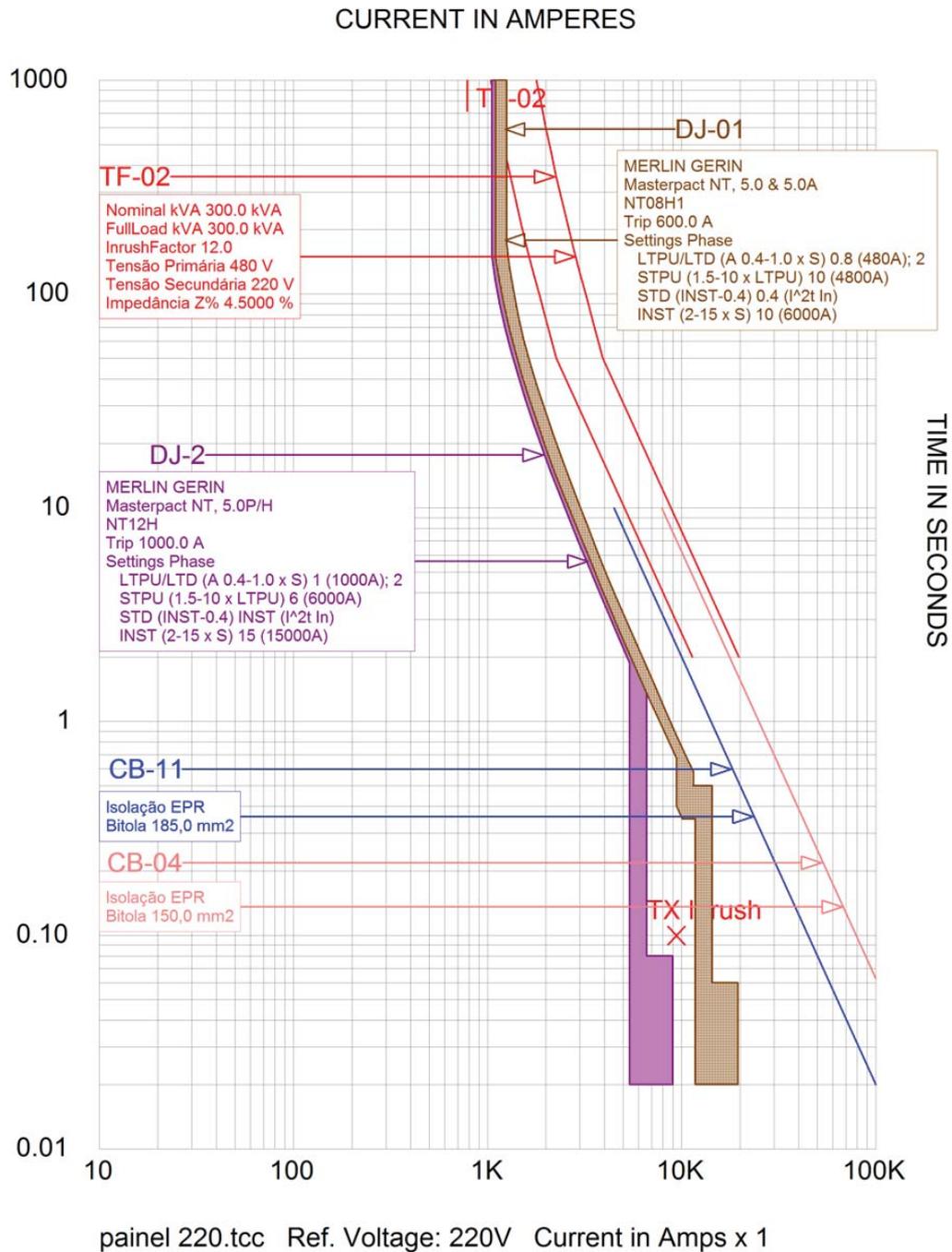


Figura 33: Proteção da entrada do Painel de 220V

A alimentação do transformador TF-02 e também a saída que alimenta o painel de 220V são protegidos por disjuntores abertos (tipo *Power*) com disparadores eletrônicos permitindo uma grande faixa de ajustes. Na Figura 33 é possível visualizar as curvas de proteções, bem como o ponto de magnetização do transformador que é garantido pela proteção primária. Além disso os cabos alimentadores de ambos os lados do transformador estão devidamente protegidos no caso de uma falta.

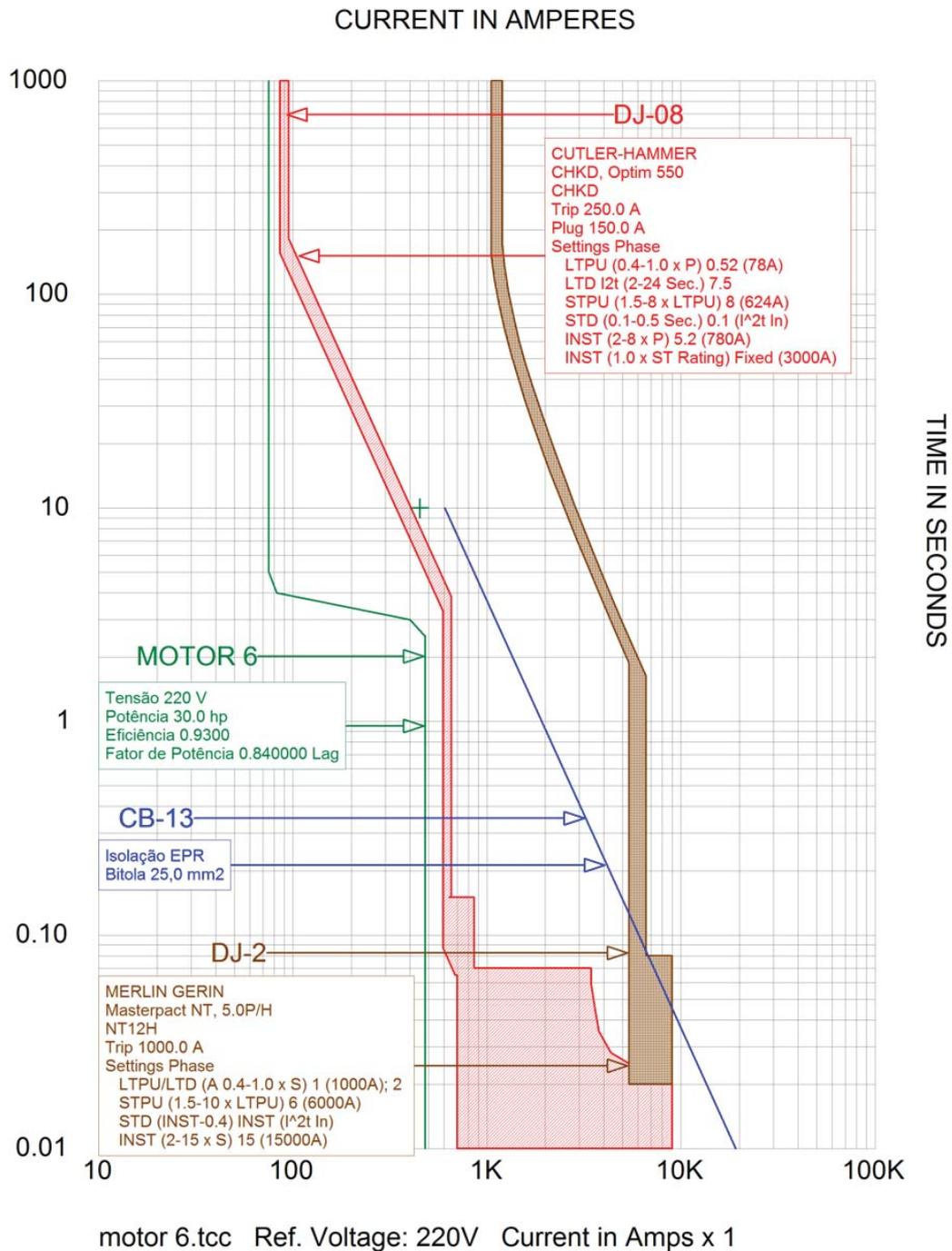


Figura 34: Proteção do Motor 6

O Motor 6 é devidamente protegido por um disjuntor termomagnético ajustado conforme Tabela 8, garantindo assim sua devida proteção, inclusive durante sua partida direta. As curvas características dos dispositivos e equipamentos envolvidos podem ser visualizadas na Figura 34, tendo a garantia de coordenação dos dispositivos de proteção e também a seletividade da proteção do motor.

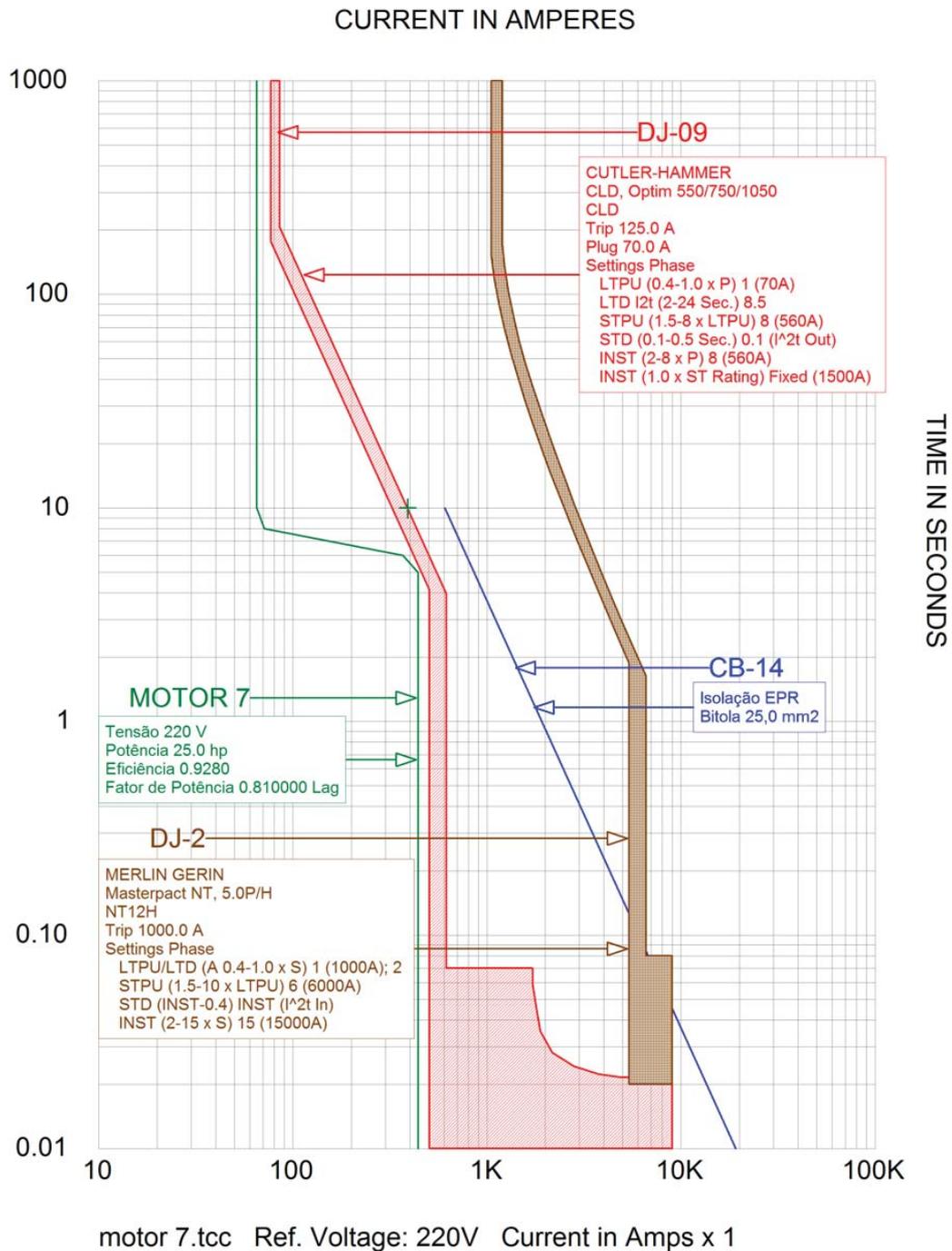


Figura 35: Curva da proteção do Motor 7

A Figura 35 mostra as curvas do motor, cabo e dos dispositivos de proteção envolvidos no caso. O Motor 7 está devidamente protegido através de disjuntor termomagnético com ajuste, bem como seu cabo alimentador. Além disso, os dispositivos estão corretamente coordenados e a proteção do motor está seletiva, garantindo assim que somente o motor seja retirado do sistema no caso de uma falha ou falta neste ponto.

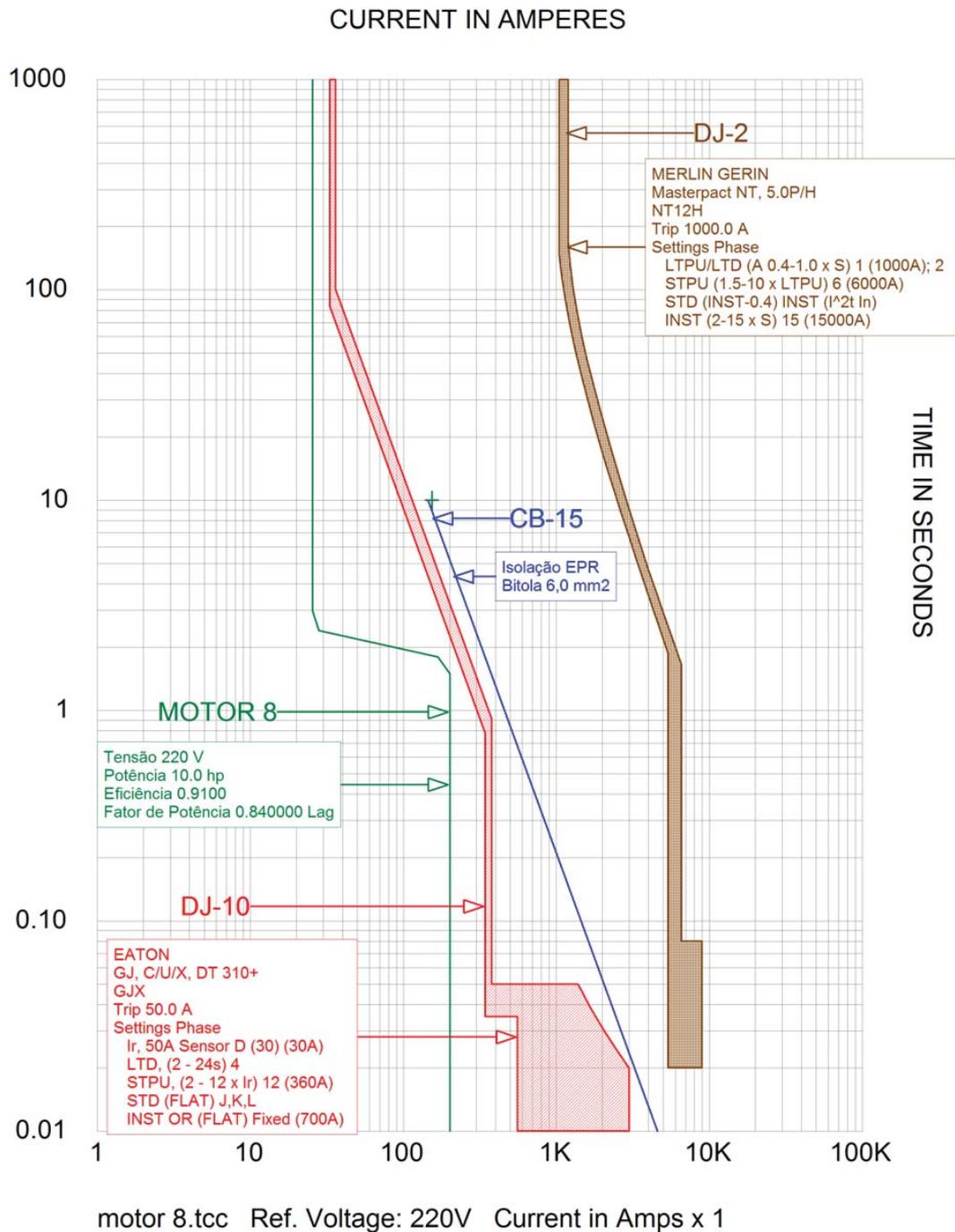


Figura 36: Proteção do Motor 8

A coordenação dos dispositivos de proteção do Motor 8 é garantido, conforme a Figura 36. O motor parte de maneira direta e é protegido por disjuntor temomagnético com ajustes. O mesmo dispositivo garante a integridade do cabo alimentador do motor e também o ponto de rotor bloqueado do motor.

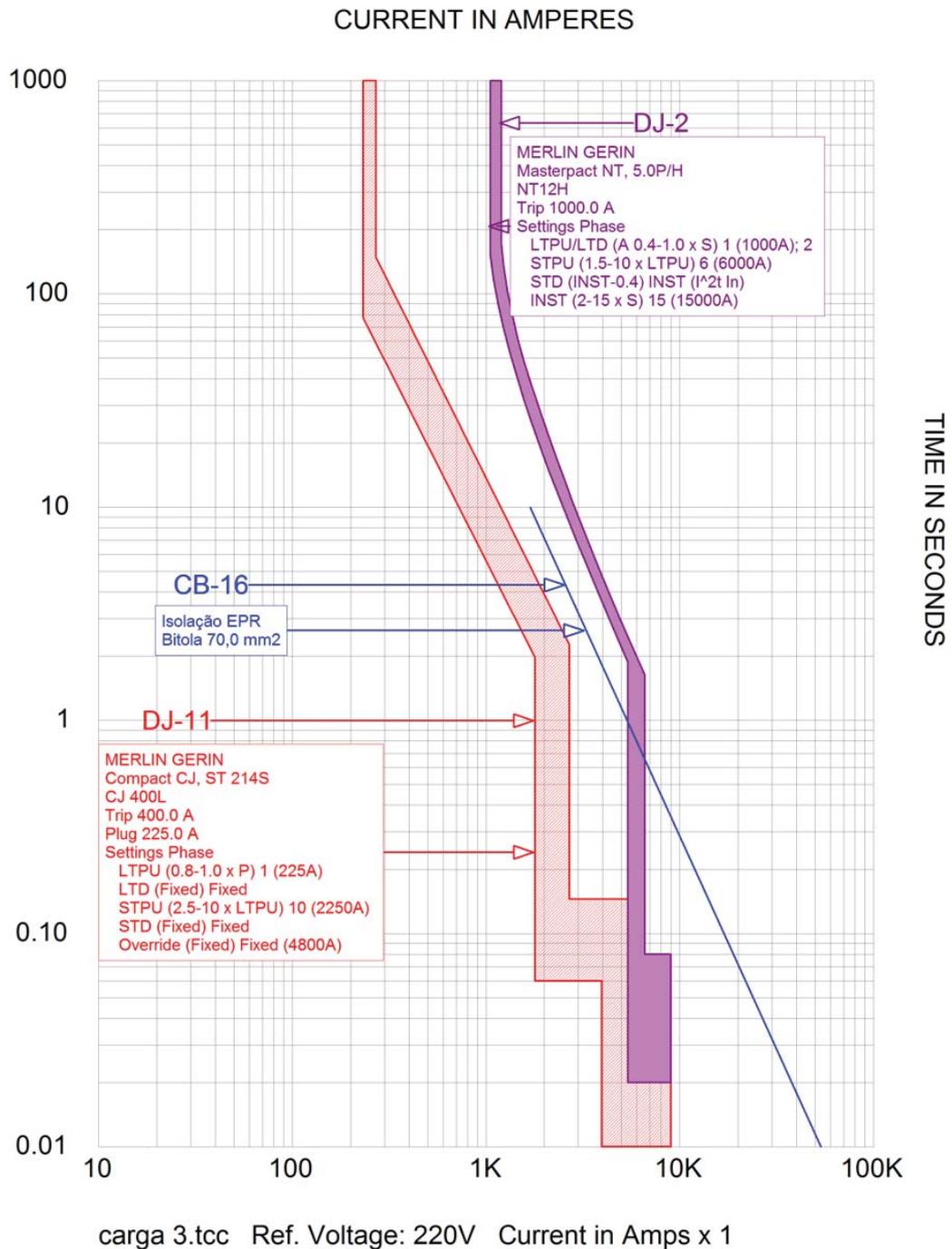


Figura 37: Proteção da Carga 3

A Figura 37 mostra as curvas de proteção da Carga 3, bem como a curva térmica de seu cabo alimentador e também a curva de atuação do dispositivo de proteção painel. A coordenação dos dispositivos é garantida pois a proteção da carga atua antes da proteção do painel, garantindo também a seletividade no caso de uma possível falta ou falha no ponto de alimentação da Carga 3.

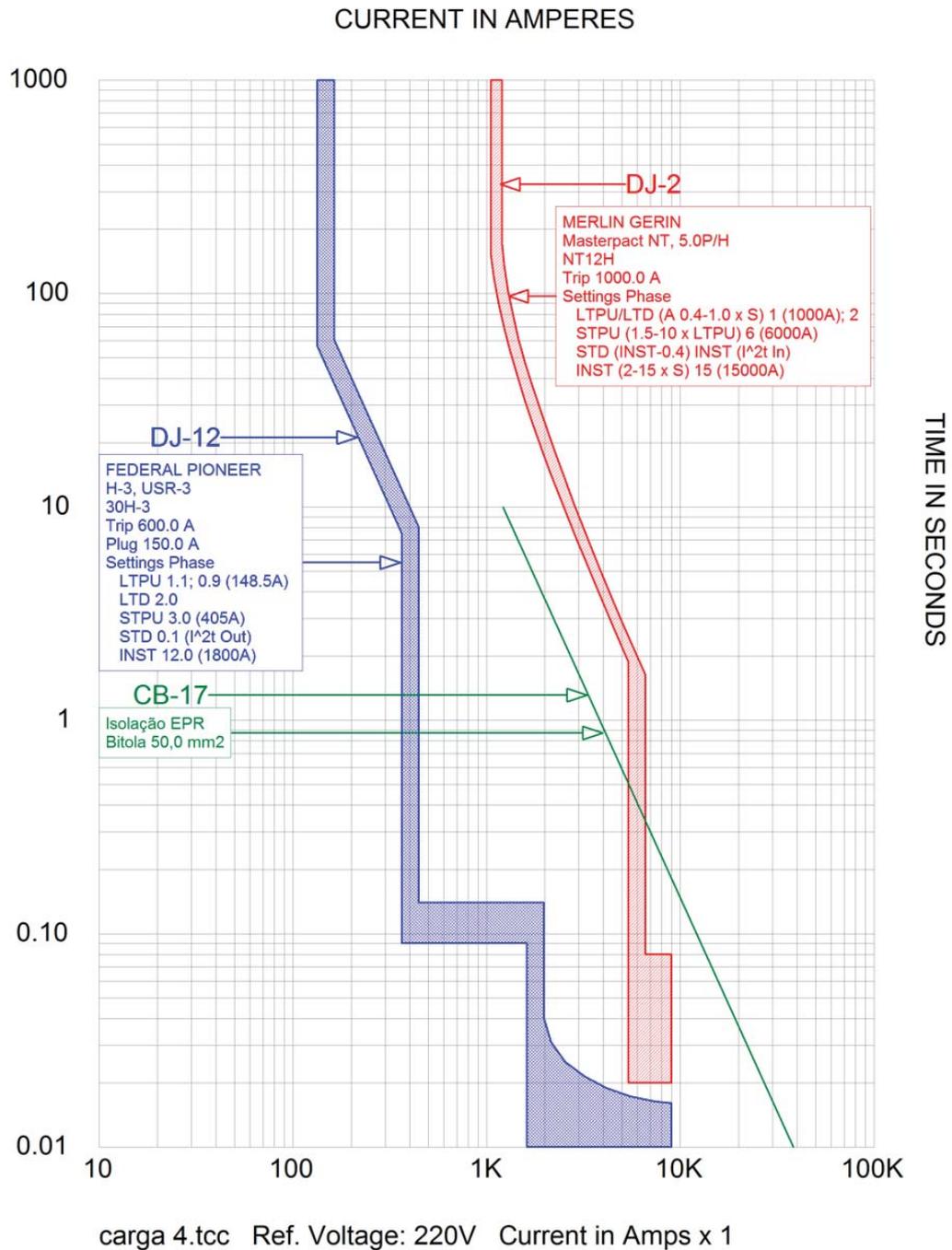


Figura 38: Curvas de proteção da Carga 4

A proteção da Carga 4 é feita através de disjuntor em caixa moldada com disparador eletrônico que além de garantir a proteção da carga em si, garante a proteção do cabo alimentador da mesma, como pode ser visto na Figura 38. Através da mesma figura pode-se dizer que esse ponto do sistema está devidamente coordenado e seletivo, garantindo que uma possível falha ou falta no ponto seja eliminada sem afetar outro ponto do sistema.

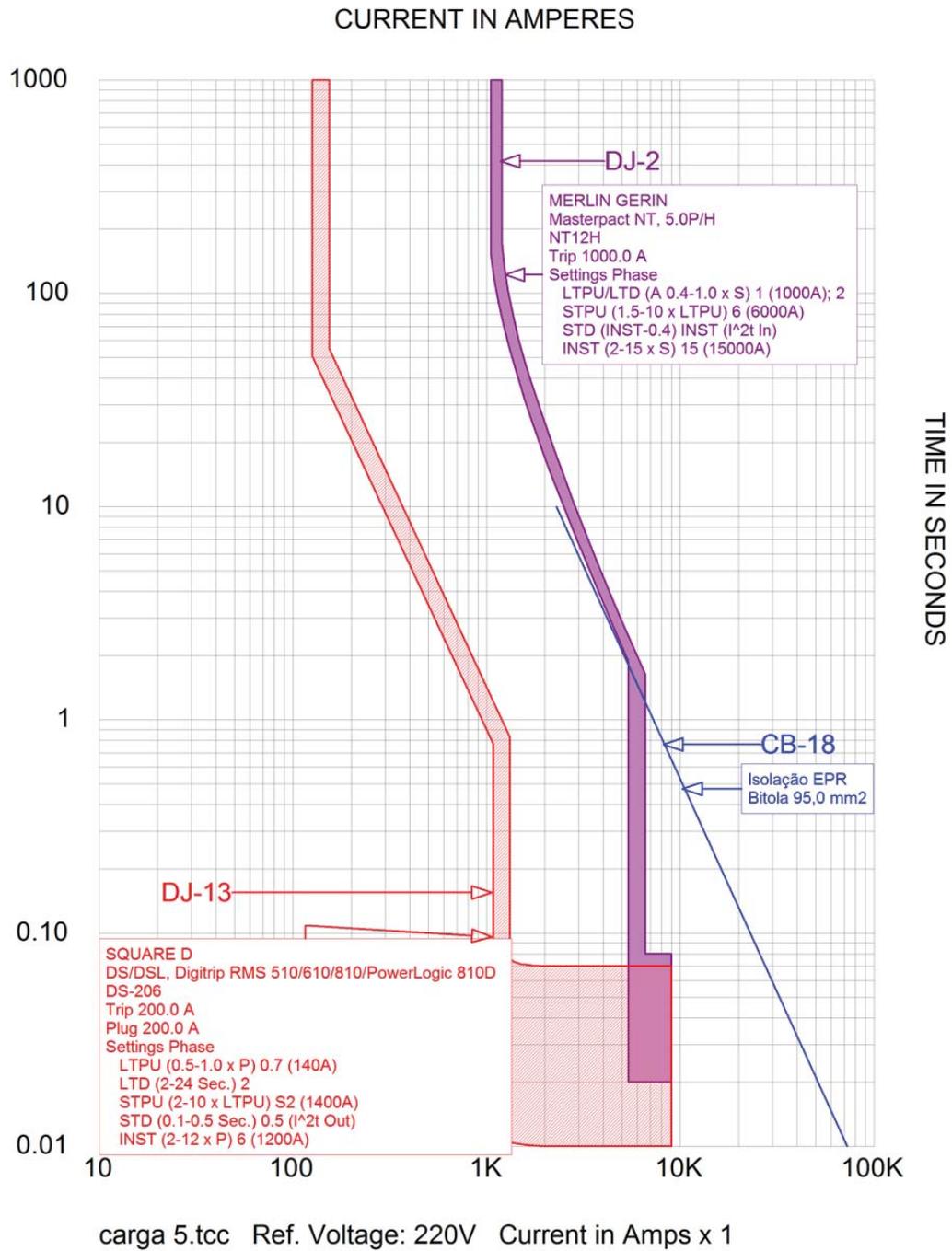


Figura 39: TCC da Carga 5 e suas proteções

A Figura 39 mostra as curvas de atuação dos dispositivos envolvidos na proteção da Carga 5. A coordenação e a seletividade são garantidas uma vez que as curvas estão ordenadas corretamente, respeitando os ajustes e limites dos equipamentos, além de garantir a integridade do cabo alimentador e a proteção da carga.

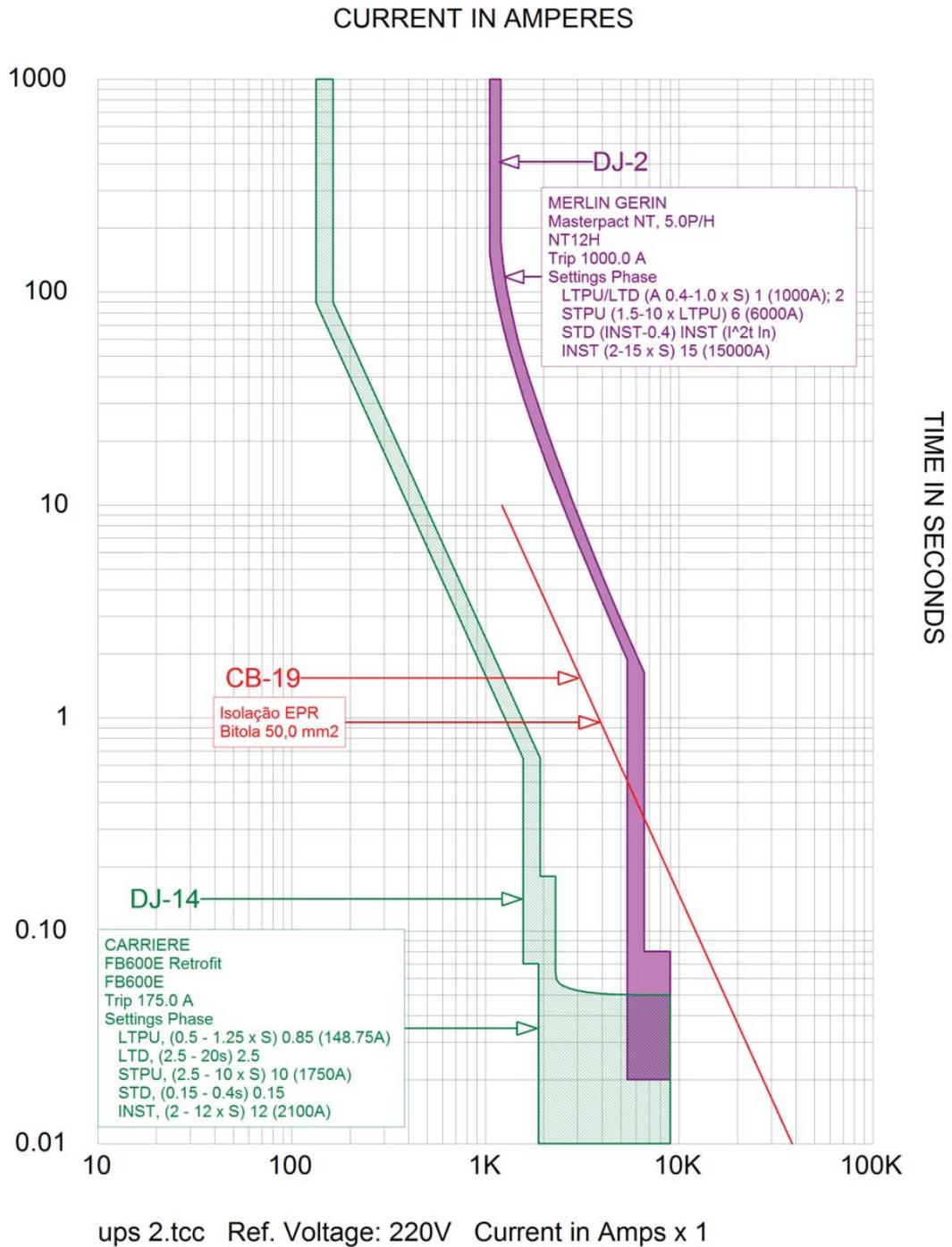
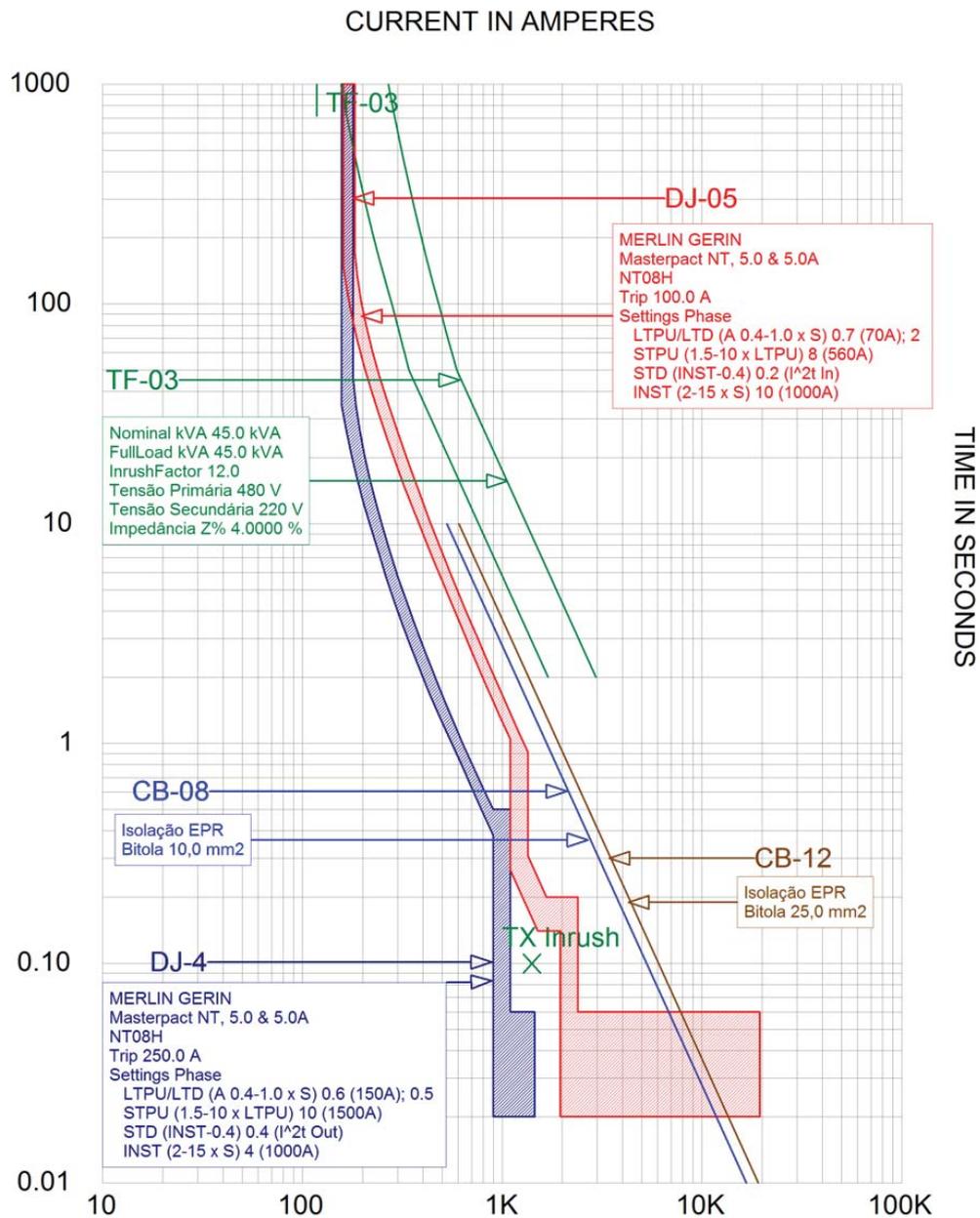


Figura 40: Proteção do UPS 2

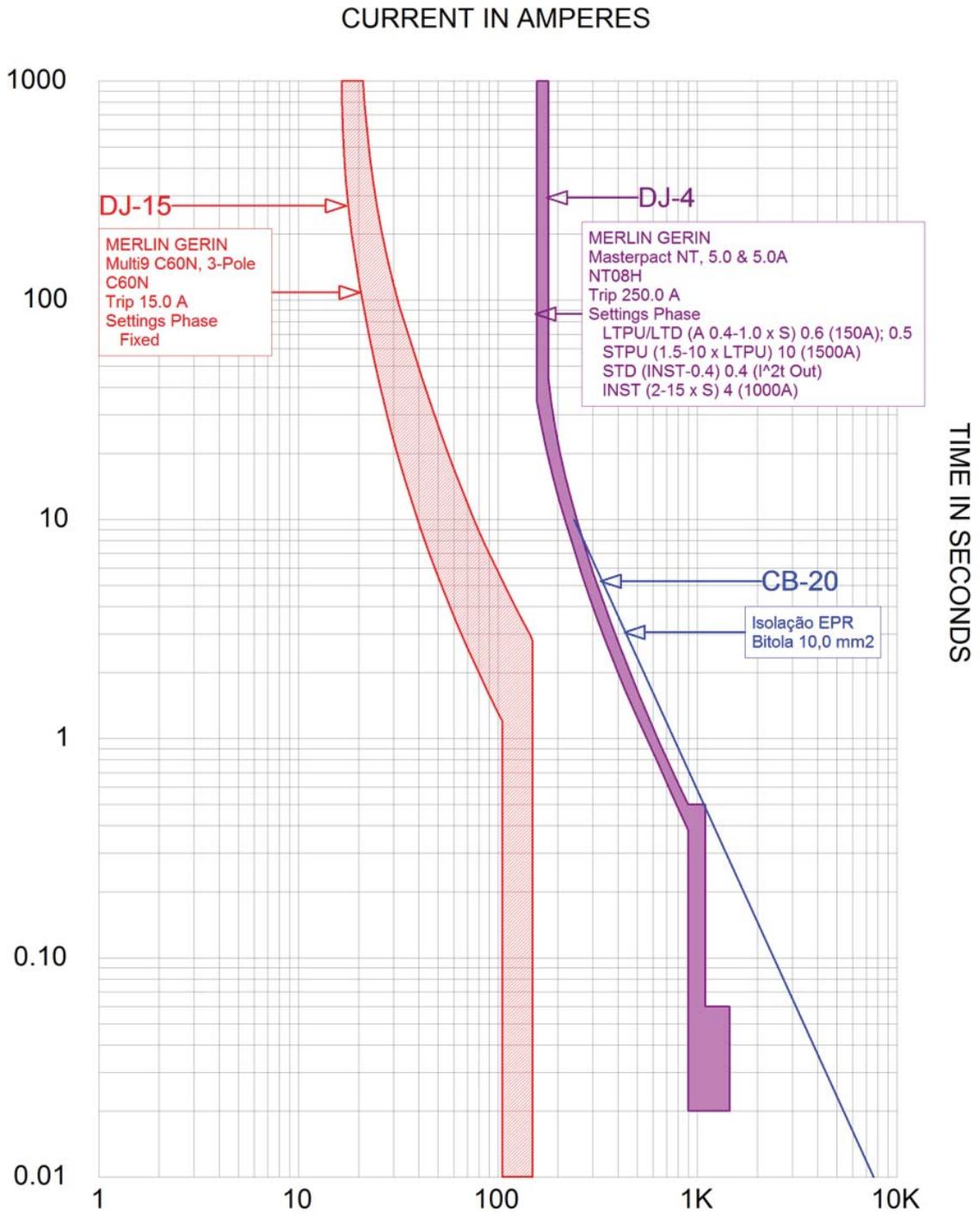
A proteção do UPS 2 é feita através de disjuntor em caixa moldada com disparador eletrônico, garantindo assim um ajuste mais preciso. Além de proteger o UPS o dispositivo protege também o cabo alimentador do mesmo, conforme Figura 40. Além disso a coordenação está garantida uma vez que a proteção do UPS atua antes da proteção do painel, garantindo também a seletividade no ponto.



painel il.tcc Ref. Voltage: 220V Current in Amps x 1

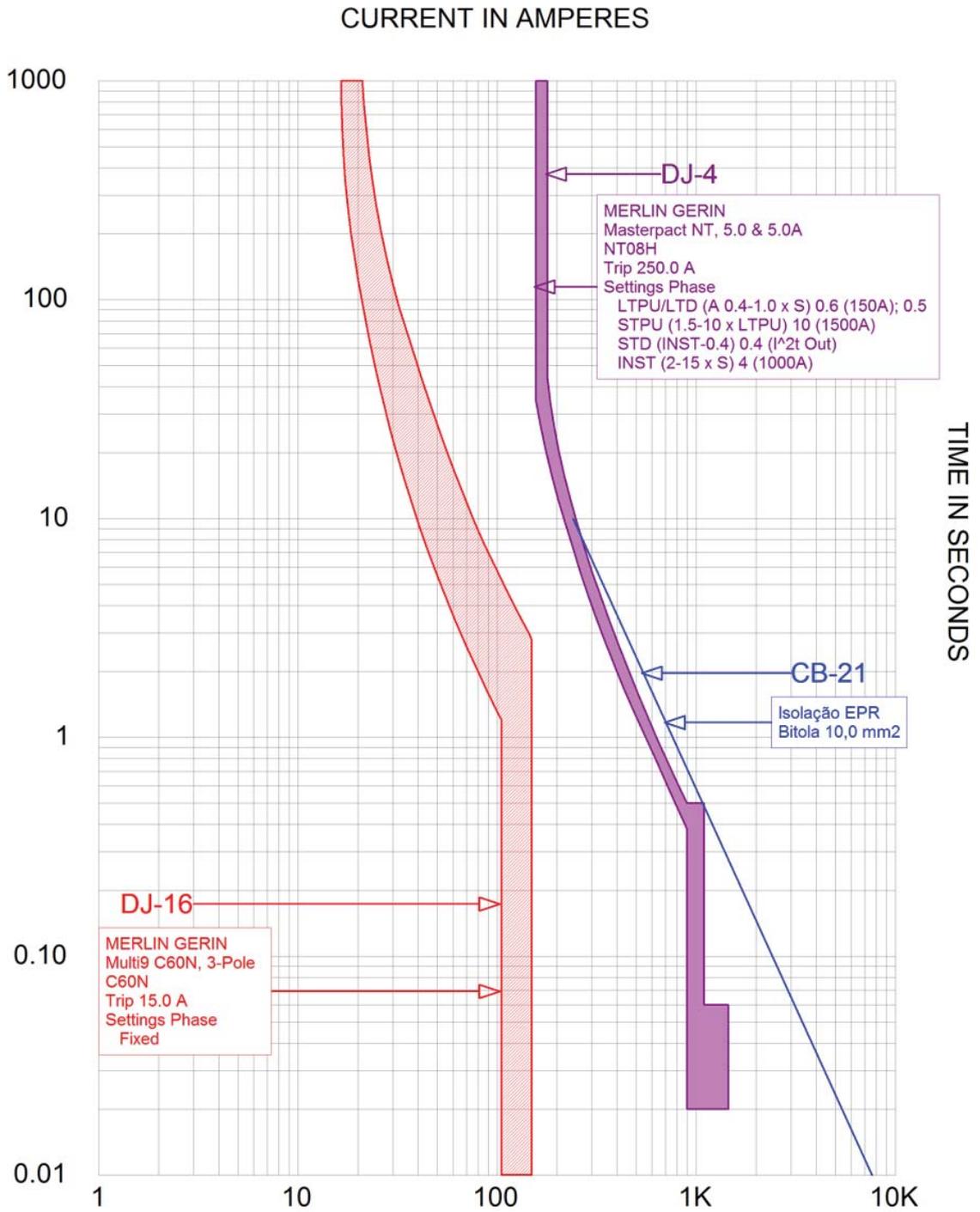
Figura 41: Proteção do painel de iluminação e tomada

A Figura 41 mostra a proteção feita no primário do transformador TF-03, bem como a proteção do painel de iluminação e tomada ligado ao secundário do transformador. Além de proteger os equipamentos, as proteções asseguram a integridade dos cabos alimentadores, além de estarem corretamente coordenados, garantindo assim que o sistema elétrico opere de maneira segura. Ambas as proteções são feitas com disjuntores tipo *Power* com disparadores eletrônicos, permitindo uma grande gama de ajustes.



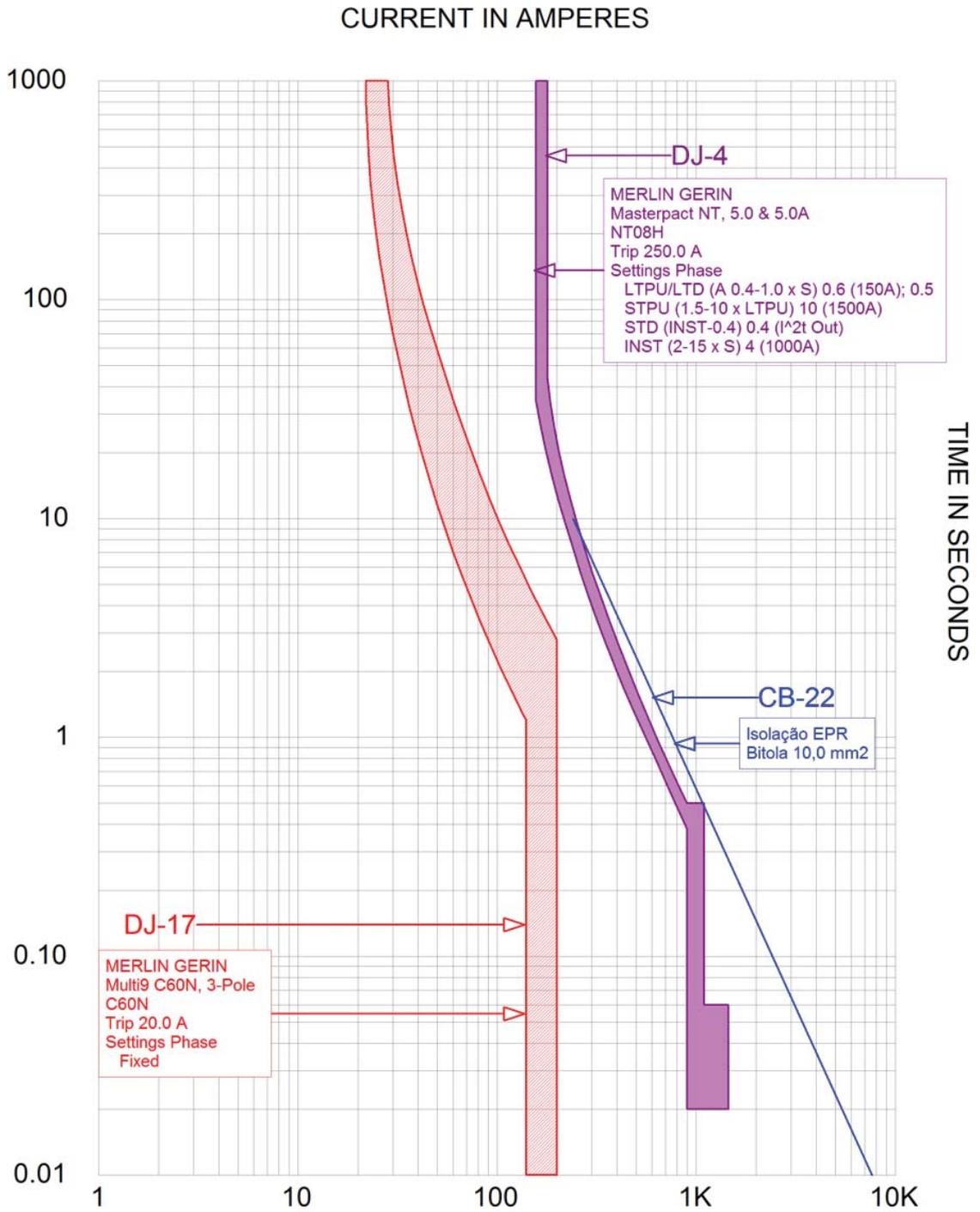
il 1.tcc Ref. Voltage: 220V Current in Amps x 1

Figura 42: Proteção do circuito de iluminação IL 1



il 2.tcc Ref. Voltage: 220V Current in Amps x 1

Figura 43: Proteção do circuito de iluminação IL 2



il 3.tcc Ref. Voltage: 220V Current in Amps x 1

Figura 44: Proteção do circuito de iluminação IL 3

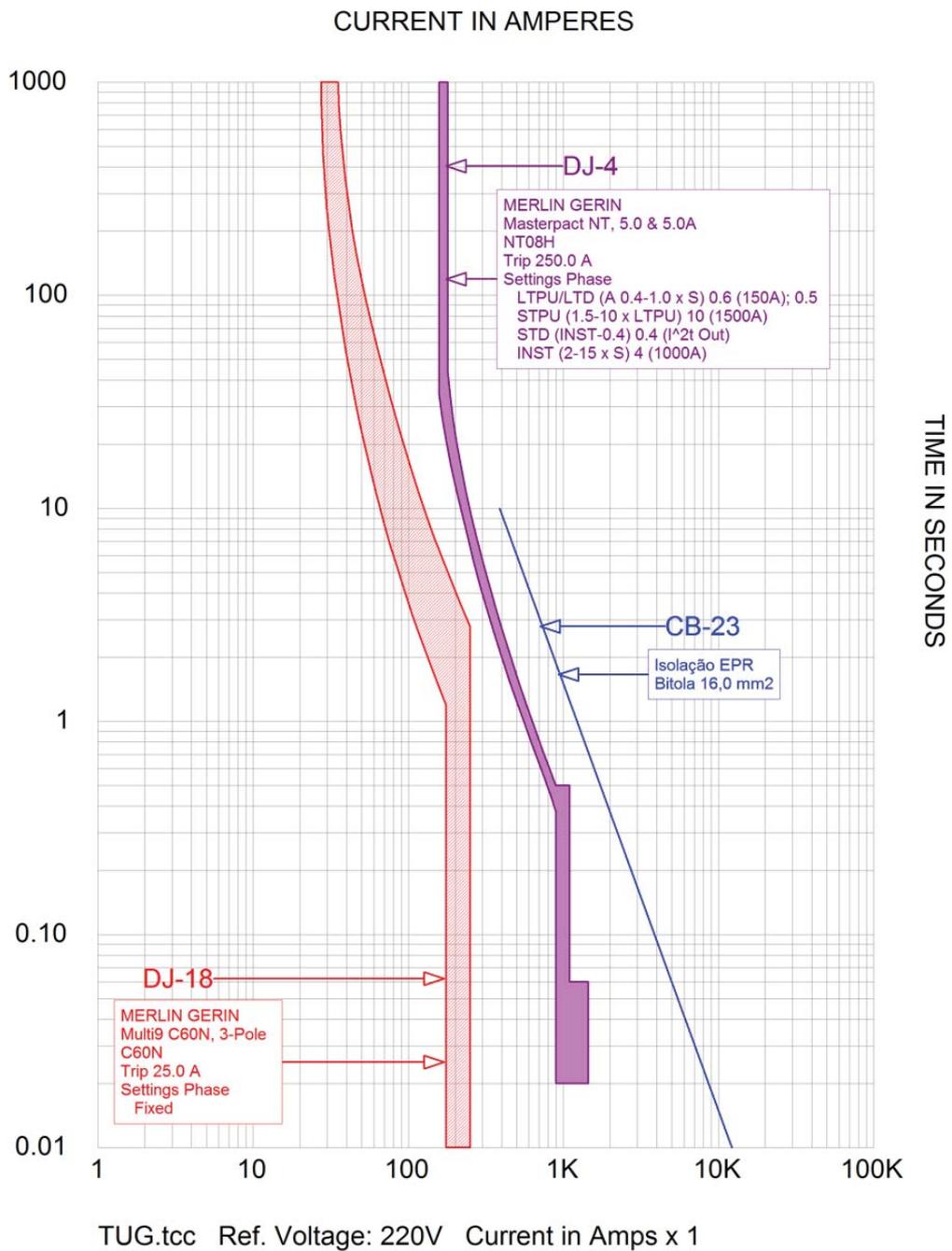


Figura 45: Proteção do circuito tomadas de uso geral TUG

As Figuras 42, 43, 44 e 45 apresentam as curvas das proteções do sistema de iluminação e tomadas de uso geral da instalação. Todos os dispositivos de proteção são mini disjuntores com curva tipo C. Em todos os casos a proteção da carga é garantida, bem como a proteção dos cabos alimentadores dos respectivos circuitos elétricos. A coordenação dos dispositivos e a seletividade dos circuitos podem ser garantidas também para os circuitos em questão.

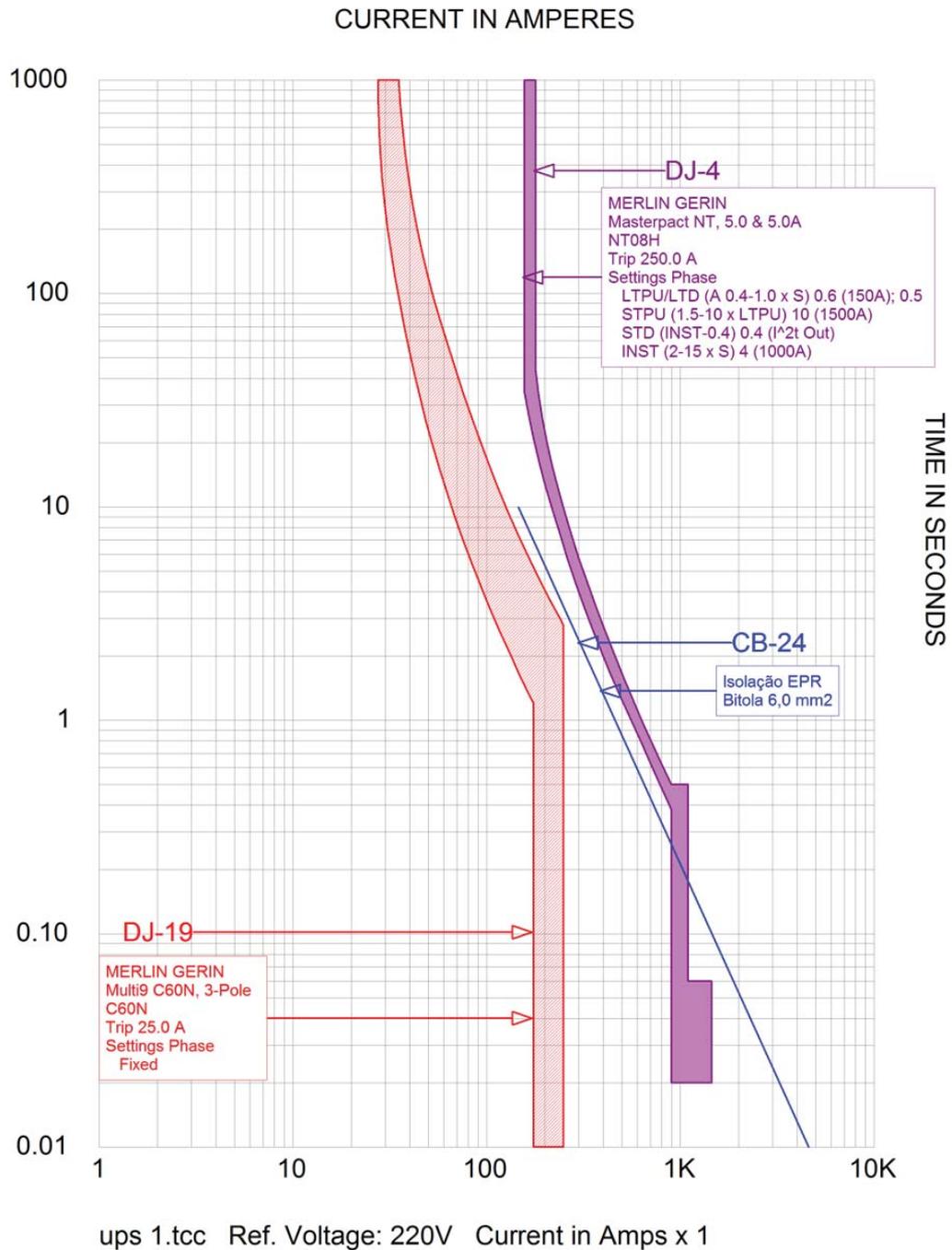


Figura 46: Proteção do UPS 1

O UPS 1 é protegido por mini disjuntor com curva característica tipo C e também garante a proteção do cabo alimentador do UPS. Como pode ser visto na Figura 46 A coordenação dos dispositivos envolvidos é garantida, bem como a seletividade no ponto de fornecimento do UPS.

A tabela 9 resume de maneira sucinta as cargas e equipamentos envolvidos, bem como os respectivos dispositivos de proteção da carga, cabos e proteções a montante, partindo da carga em sentido à fonte, com os respectivos Tags previamente dado a cada dispositivo do circuito. Para cada carga envolvida no estudo foi gerada uma curva de tempo por corrente identificada na última coluna da tabela.

Carga Protegida	Dispositivos de proteção e cabo (carga -> fonte)	Curva
TF-01	Cabo de entrada, RL-00 (URPE 1439)	Figura 23
Painel 480V	DJ-1 (NW30H), Busway, Cabo de entrada, RL-00 (URPE 1439)	Figura 24
Motor 1	CB-01, RL-01 (SEPAM 1000), FU-01, DJ-1 (NW30H)	Figura 25
Motor 2	CB-02, RL-02 (7SJ45), FU-02, DJ-1 (NW30H)	Figura 26
Motor 3	CB-03, RL-03 (7SJ45), FU-03, DJ-1 (NW30H)	Figura 27
Carga 1	CB-05, DJ-02 (CE 106L), DJ-1 (NW30H)	Figura 28
Carga 2	CB-06, DJ-03 (NSF150H), DJ-1 (NW30H)	Figura 29
Motor 4	CB-07, DJ-04 (CE 106L), DJ-1 (NW30H)	Figura 30
Motor 5	CB-09, DJ-06 (K-600), DJ-1 (NW30H)	Figura 31
B. De Capacitores	CB-10, DJ-07 (NSJ400H), DJ-1 (NW30H)	Figura 32
Painel 220V	DJ-2 (NT12H), CB-11, CB-04, DJ-01 (NT08H1)	Figura 33
Motor 6	CB-13, DJ-08 (CHKD), DJ-2 (NT12H)	Figura 34
Motor 7	CB-14, DJ-09 (CLD), DJ-2 (NT12H)	Figura 35
Motor 8	CB-15, DJ-10 (GJX), DJ-2 (NT12H)	Figura 36
Carga 3	CB-16, DJ-11 (CJ400L), DJ-2 (NT12H)	Figura 37
Carga 4	CB-17, DJ-12 (30H-3), DJ-2 (NT12H)	Figura 38
Carga 5	CB-18, DJ-13 (DS-206), DJ-2 (NT12H)	Figura 39
UPS 2	CB-19, DJ-14 (FB600E), DJ-2 (NT12H)	Figura 40
P. Ilum. e tom.	DJ-4 (NT08H), CB-12, CB-08, DJ-05 (NT08H)	Figura 41
IL 1	CB-20, DJ-15 (C60N), DJ-4 (NT09H)	Figura 42
IL 2	CB-21, DJ-16 (C60N), DJ-4 (NT09H)	Figura 43
IL 3	CB-22, DJ-17 (C60N), DJ-4 (NT09H)	Figura 44
TUG	CB-23, DJ-18 (C60N), DJ-4 (NT09H)	Figura 45
UPS 1	CB-24, DJ-19 (C60N), DJ-4 (NT09H)	Figura 46

Tabela 9: Resumo de cargas e proteções

8 CONCLUSÕES E DISCUSSÕES DO TEMA ABORDADO

O estudo de coordenação e seletividade é atualmente um dos estudos mais importantes de um projeto de instalação elétrica industrial. Com ele muitos problemas podem ser evitados uma vez que através desse tipo de estudo se tem um melhor dimensionamento não apenas dos dispositivos de proteção, mas também do cabeamento, necessário para alimentar os equipamentos da unidade, e conseqüentemente de toda infraestrutura necessária para a correta instalação elétrica.

Se executado corretamente, o estudo fornece todas as informações necessárias para o sistema de proteção, desde o nível de curto circuito que os dispositivos devem suportar em diversos pontos da instalação, até o ajuste fino necessário em cada um dos dispositivos de proteção e o mais importante é que o estudo pode ser gerado ainda na fase de projeto, sendo uma importante ferramenta para execução de uma instalação robusta, além de evitar futuras trocas de equipamentos mal dimensionados, falhas no sistema elétrico devido a aquecimento de cabos, atuações desnecessárias devido à falta de coordenação e seletividade, entre outros.

Com a grande demanda de projetos e a falta de mão de obra qualificada para a execução de estudo de coordenação e seletividade, qualquer ferramenta que auxilie, facilite ou agilize a execução dos mesmos, é de extrema importância. O *software* PTW apresentado e utilizado na elaboração do presente trabalho é uma excelente ferramenta a qual gera curvas precisas e com todas as informações necessárias para o seu correto entendimento e interpretação.

Além de auxiliar na elaboração do estudo de coordenação e seletividade, o *software* é bastante confiável para validar um projeto de instalação elétrica, pois é possível visualizar as curvas térmicas dos equipamentos e cabos, podendo-se efetuar correções de projeto, como foi no caso dos Motores 1 e 2 que tiveram seus cabos aumentados para respeitar a curva de partida dos motores e garantir a integridade física dos mesmos.

O presente trabalho realiza um estudo de seletividade e coordenação de apenas uma parcela de uma subestação secundária de refinaria de petróleo, porém diversos dispositivos de proteção podem ser trocados por equivalentes, uma vez que normalmente num projeto o fabricante das proteções é padronizado a fim de garantir compatibilidade de dispositivos e arquiteturas. Podem ser utilizados diversos dispositivos de diferentes fabricantes a fim de exemplificar e demonstrar a capacidade e versatilidade que o PTW possui.

Toda biblioteca do *software* foi montada baseada em dados de fabricantes, sendo a mesma tida como fiel à realidade. Além disso os dispositivos adicionados para a elaboração

do trabalho (Relé PEXTRON, por exemplo) são dispositivos encontrados no mercado e sua adição dentro da biblioteca do programa foi feita de maneira detalhista com acompanhamento de especialistas na área de proteções elétricas, que validaram as informações e o uso das mesmas nas simulações.

A ênfase dada aos equipamentos apresentados se deve ao fato de serem os mais importantes e utilizados em uma unidade industrial, porém muito outros tipos de equipamentos são utilizados, tais como máquinas de condicionamento de ar e equipamentos de geração auxiliar. Outro item bastante utilizado que não foi considerado no trabalho são os inversores de frequência e *softstarters*, que garantem uma partida suave de motores (corrente de partida não ultrapassa o dobro da corrente nominal do equipamento), mas que necessitam de proteções que atuem rapidamente uma vez que são itens extremamente sensíveis.

Deve-se levar em conta também a influência de harmônicos em uma instalação, uma vez que, quanto maior a quantidade de equipamentos eletrônicos na unidade, maior será a quantidade de distorções harmônicas tanto na tensão como na corrente, fazendo com que proteções atuem indevidamente, uma vez que a corrente derivada dos harmônicos pode ultrapassar o valor de 30% da corrente nominal da instalação, porém um estudo muito mais detalhado deve ser elaborado.

O presente trabalho dá ênfase apenas aos principais dispositivos de proteção de baixa tensão que atuam isoladamente. Atualmente é muito comum utilizar Controladores Lógicos Programáveis (CLP) para monitorar e coordenar as proteções, possibilitando ainda o envio de dados em diferentes protocolos de rede de dispositivos e com isso a monitoração e controle remoto de toda rede de dispositivos de proteção de uma instalação industrial.

Não só a baixa tensão deve ser levada em conta, mas também e principalmente a alta tensão, uma vez que o risco de vida na operação em níveis elevados de tensão é bastante alto e o as proteções para alta tensão são bastante desenvolvidas e estudadas a cada dia.

O uso do *software* para a elaboração de estudos de coordenação e seletividade é válido e de extrema importância, uma vez que torna o estudo final extremamente confiável e de fácil compreensão devido às curvas geradas, porém é muito mais importante que o engenheiro responsável por simular e gerar as curvas no *software* seja qualificado na área de proteções a fim de tornar o estudo confiável e a instalação elétrica muito mais segura e robusta.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6856**: Transformadores de corrente. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356**: Transformadores de potência. Rio de Janeiro, 1993.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. 1. ed. São Carlos: EESC – Escola de Engenharia de São Carlos, 2011. 378 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 100 The authoritative dictionary of IEEE standards terms Seventh Edition, 2000**.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS **IEEE Std. 242. IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems**, 2001.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 778 p.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 753 p.

MARDEGAN, C. **Proteção e seletividade em sistemas elétricos industriais**. 1 ed. São Paulo, 2012. 399 p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

GRUPO SMARTTECH. **Smarttech Elétrica**. Disponível em:

<<http://www.smarttech.com.br>>. Acesso em: 05 dez. 2012.

OKW Eletronics. **Ceramics Fuses**. Disponível em:

<http://www.okwelectronics.com/products/camden/fuses/gG_powerfuse.html>. Acesso em: 20 nov. 2012.

PEREIRA, D. R. **Um sistema de software para execução de estudos de coordenação e seletividade em sistemas de distribuição**. 2007. 222f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2007.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Transformadores de Baixa Tensão**. Disponível em:

<http://www.schneider-electric.com.br/brasil/pt/produtos-servicos/distribuicao-electrica/distribuicao-electrica-intermediario.page?f=F13%3ADistribui%C3%A7%C3%A3o%20EI%C3%A9trica~!NNM1:Transformadores+e+Autotransformadores+de+Baixa+Tens%C3%A3o&p_function_id=61124> . Acesso em: 15 jan. 2013

SCHNEIDER ELECTRIC. **Disjuntores e Interruptores-Seccionadores**. Disponível em:

<http://www.schneider-electric.com.br/brasil/pt/produtos-servicos/distribuicao-electrica/distribuicao-electrica-intermediario.page?f=F13%3ADistribui%C3%A7%C3%A3o%20EI%C3%A9trica~!NNM1:Disjuntores+e+Interruptores-seccionadores&p_function_id=17> . Acesso em: 01 jan. 2013.

SIEMENS. **BETA Low voltage circuit protection characteristics curves for catalog ET B1**. Disponível em:

<<http://www.industry.siemens.com.br/buildingtechnologies/br/pt/produtos-baixa-tensao/protecao-eletrica/Fusiveis/Documents/Fusiveis-Curvas-Characteristicas.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2012.

SILVEIRA PRIMO, P. V. **A utilização de programa computacional para ajuste e coordenação da proteção de sobrecorrente**. 2009. 133f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SKM SYSTEMS ANALYSIS, INC. **CAPTOR Study Module**. Disponível em:
<<http://www.skm.com/captor.html>>. Acesso em: 01 jan. 2013.

WEG S. A. **Motores Elétrico Industriais – W22 Premium**. Disponível em:
<<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Motores-Eletricos/Industriais/W22-Premium>>.
Acesso em: 20 dez. 2012.