

**Universidade de São Paulo**

**Escola de Engenharia de São Carlos**

**Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação**

**Modelagem Computacional das  
Características dos Elementos Utilizados  
em Estudos de Coordenação da Proteção  
e Seletividade de Sistemas Elétricos**

**Bruno Toyoshima**

**São Carlos**

**2012**



**Bruno Toyoshima**

**Modelagem Computacional das  
Características dos Elementos Utilizados  
em Estudos de Coordenação da Proteção  
e Seletividade de Sistemas Elétricos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
Sistemas de Energia e Automação

Orientador: Prof. José Carlos de Melo Vieira Júnior

**São Carlos**

**2012**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

T756m Toyoshima, Bruno  
Modelagem Computacional das Características dos  
Elementos Utilizados em Estudos de Coordenação da  
Proteção e Seletividade de Sistemas Elétricos / Bruno  
Toyoshima; orientador José Carlos de Melo Vieira  
Júnior. São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2012.

1. proteção de sistemas elétricos. 2. coordenação  
da proteção e seletividade. 3. sistemas elétricos  
industriais. 4. fusíveis. 5. disjuntores de baixa  
tensão. 6. relés digitais. 7. curvas de atuação. I.  
Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Bruno Toyoshima

Título: “Modelagem Computacional das Características dos Elementos Utilizados em Estudos de Coordenação da Proteção e Seletividade de Sistemas Elétricos”

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 23/11/2012,*

*com NOTA 7,5 (sete, cinco), pela Comissão Julgadora:*

*Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Jr. (Orientador)*  
*SEL/EESC/USP*

*Prof. Dr. Mário Oleskovicz*  
*SEL/EESC/USP*

*Dr. Ulisses Chemin Netto*  
*SEL/EESC/USP*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel



## **Agradecimentos**

Agradeço a todos que me apoiaram nestes anos de curso, que estiveram presentes nos momentos de dificuldade e que foram motivo de muitos momentos de alegria.

A Deus, aos meus pais, meus irmãos, meus amigos e professores; meu sincero muito obrigado.





## Sumário

LISTA DE FIGURAS .....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	XIII
RESUMO.....	XV
ABSTRACT.....	XVII
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJETIVO .....	3
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
1.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
3 ESTUDO DA OPERAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS ELEMENTOS .....	11
3.1 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO.....	11
3.1.1 FUSÍVEL .....	11
3.1.2 DISJUNTOR DE BAIXA TENSÃO .....	13
3.1.3 RELÉ DIGITAL DE SOBRECORRENTE .....	15
3.2 EQUIPAMENTOS PROTEGIDOS .....	23
3.2.1 CABOS .....	23
3.2.2 MOTOR DE INDUÇÃO.....	26
3.2.3 TRANSFORMADOR DE DOIS ENROLAMENTOS.....	28
4 METODOLOGIA ADOTADA PARA LEVANTAMENTO DAS CURVAS .....	31
4.1 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO.....	32
4.1.1 FUSÍVEL .....	32
4.1.2 DISJUNTOR DE BAIXA TENSÃO .....	36
4.1.3 RELÉ DIGITAL DE SOBRECORRENTE .....	40
4.2 ELEMENTOS PROTEGIDOS.....	43
4.2.1 CABOS .....	43

4.2.2	MOTOR DE INDUÇÃO.....	45
4.2.3	TRANSFORMADOR DE DOIS ENROLAMENTOS.....	47
5	FERRAMENTA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDA .....	53
5.1	BIBLIOTECAS E SOFTWARES AUXILIARES .....	53
5.2	VISÃO GERAL .....	55
5.3	ADICIONANDO ELEMENTOS .....	56
5.4	DADOS DE CATÁLOGO.....	57
5.5	DADOS DE PROJETO.....	58
5.6	AJUDA E SAIR .....	62
6	CONCLUSÕES .....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
	ANEXO A – EXEMPLO DE SAÍDA DO <i>SOFTWARE</i> .....	69

## Lista de Figuras

Figura 1: Exemplo de coordenograma ou folha de seletividade.....	2
Figura 2: Curva de atuação do fusível.....	13
Figura 3: Curva de atuação dividida por região de proteção.....	14
Figura 4: Curva de atuação do disjuntor para proteção fase-terra.....	15
Figura 5: Diagrama funcional de blocos de um relé.....	16
Figura 6: Curva de atuação a tempo definido do relé.....	18
Figura 7: Curva de atuação a tempo dependente do relé.....	18
Figura 8: Curva do tipo moderadamente inversa padrão ANSI.....	20
Figura 9: Curva do tipo extremamente inversa pelo padrão ANSI.....	21
Figura 10: Curva do tipo inversa pelo padrão IEC.....	22
Figura 11: Curva do tipo inversa de tempo longo pelo padrão IEC.....	22
Figura 12: Curva limite de sobrecorrente do cabo.....	25
Figura 13: Curva de partida do motor.....	27
Figura 14: Curva representando os limites do transformador.....	30
Figura 15: Entrada de catálogo do fusível.....	33
Figura 16: Curva do fusível, utilizando método de interpolação por <i>spline cúbica</i> .....	34
Figura 17: Curva do fusível, realçando os pontos usados.....	35
Figura 18: Curva do fusível DIAZED, retirada do catálogo.....	36
Figura 19: Entrada de catálogo do disjuntor.....	37
Figura 20: Curva de atuação do disjuntor, realçando os pontos usados.....	38
Figura 21: Curva de atuação do disjuntor para proteção fase-terra, destacando-se os pontos.....	40
Figura 22: Entrada de catálogo do relé.....	41
Figura 23: Curva de atuação do relé.....	42
Figura 24: Curva de atuação do relé a tempo definido, com marcação dos pontos usados.....	42
Figura 25: Entrada de catálogo do cabo.....	44
Figura 26: Curva de suportabilidade do cabo, ressaltando os pontos usados.....	45
Figura 27: Entrada de catálogo do motor.....	46
Figura 28: Curva de operação do motor, seguindo abordagem conservadora.....	47
Figura 29: Entrada de catálogo do transformador.....	48
Figura 30: Curva de limite do transformador, marcando pontos usados.....	50
Figura 31: Fluxograma da estrutura do programa desenvolvido.....	54
Figura 32: Tela inicial.....	55
Figura 33: Adicionar equipamento.....	56

Figura 34: Adicionar dispositivo de proteção.....	56
Figura 35: Tela do catálogo. ....	57
Figura 36: Curva de um disjuntor de baixa tensão. ....	58
Figura 37: Tela de projeto.....	59
Figura 38: Visualização de um projeto.....	60
Figura 39: Adicionando um elemento.....	60
Figura 40: Adicionar corrente de curto circuito.....	61
Figura 41: Curvas de saída coordenadas. ....	62
Figura 42: Tela de ajuda.....	62

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Constantes $K_N$ para padrão ANSI.....	20
Tabela 2: Constantes $K_N$ para padrão IEC.....	21
Tabela 3: Valores de temperatura para diversas condições.....	24
Tabela 4: Categorias de potência nominal para transformadores. ....	29
Tabela 5: Dados para representação do limite térmico do transformador. ....	49
Tabela 6: Dados para representação do limite mecânico do transformador.....	50



## Lista de Siglas e Abreviaturas

ANSI – *American National Standards Institute*

ASP – Análise de Sistemas de Proteção

AT – Atraso de Terra

ATC – Atraso de Tempo Curto

ATL – Atraso de Tempo Longo

CADISP – Ferramenta de Coordenação Automática de Dispositivos de Proteção

CPU – *Central Processing Unit*

IDE – *Integrated Development Environment*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IEEE – *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*

MATLAB – *Matrix Laboratory*

$M_{Inst}$  – Multiplicador de Ajuste Instantâneo

MT – Multiplicador de Terra

MTC – Multiplicador de Tempo Curto

MTL – Multiplicador de Tempo Longo

SCADA – *Supervisory and Control Data Acquisition*

TC – Transformador de Corrente

TDS – Multiplicador do Ajuste de Tempo do Relé

TP – Transformador de Potencial





## Resumo

TOYOSHIMA, B. **Modelagem Computacional das Características dos Elementos Utilizados em Estudos de Coordenação da Proteção e Seletividade de Sistemas Elétricos**. 2012. 88p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Devido à crescente expansão do setor elétrico, e consequente aumento de sua complexidade, surge a necessidade constante de readequar seu sistema de proteção. Além de seu crescimento, o sistema elétrico está cada vez mais interligado, e essa interligação contribui também para o aumento de sua complexidade. Então surge a necessidade de ferramentas que auxiliem o engenheiro de proteção na modelagem e análise apurada do sistema de proteção, a fim de minimizar esforços matemáticos e imprecisões por parte do engenheiro, desgastando seu tempo. Estas ferramentas devem ser capazes de sugerir ao engenheiro a correta parametrização dos dispositivos de proteção, cabendo ao mesmo a tarefa de julgar se a coordenação dos dispositivos atende às premissas do projeto ou não. Neste contexto, este trabalho visa a modelagem computacional das características dos elementos de um sistema elétrico industrial voltado à proteção dos mesmos, bem como a modelagem dos dispositivos de proteção; e também a criação de uma interface gráfica para um programa computacional que considere esses modelos e seja um ambiente para a realização de estudos de coordenação da proteção e seletividade de sistemas elétricos industriais. A modelagem dos elementos do sistema elétrico é feita por meio de curvas de suportabilidade contra sobrecorrente, ao passo que a modelagem dos dispositivos de proteção é feita por meio de suas curvas de atuação. Foi possível obter curvas que retratam o comportamento real de suportabilidade ou de atuação dos elementos do sistema. Este trabalho foi conduzido em paralelo a outro projeto que visa definir estratégias para realização de estudos de coordenação da proteção de forma automática (Negrão, 2012). Todo o programa foi desenvolvido em linguagem C/C++, e os resultados que serão apresentados foram obtidos utilizando a ferramenta desenvolvida.

**Palavras-chave:** disjuntores de baixa tensão, coordenação da proteção e seletividade, fusíveis, proteção de sistemas elétricos, relés, sistemas elétricos industriais.



## Abstract

TOYOSHIMA, B. **Computational Modeling of Characteristics of Elements Used in Studies of Protection Coordination and Selectivity of Electrical Systems**. 2012. 88p. Course Final Report (Electrical Engineering with emphasis in Power Systems and Automation) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

With the increasing power system expansion, and consequent increase in their complexity, comes the constant need to readjust the protection system. Besides the increasing, electrical systems are becoming more and more interconnected, and this contributes to the increasing of the complexity. Then, there is a constant need of tools to assist the protection engineer in modeling and accurate analysis of the protection systems, in order to avoid inaccuracies and mathematical efforts of the engineer, wasting his time. Those tools should be able to suggest to the engineer the correct settings of the protection devices, so that he can focus his task in assessing whether the coordination of devices meets the assumptions of the project or not. Therefore, this work aims to modeling the curves of the system equipment and the protection devices, as well as to create a graphical interface for a computer program that considers these models and that is an environment for studies of coordination of protection and selectivity of industrial electrical systems. The modeling of the equipment was done by building current withstanding curves, whereas the modeling of the protection devices was done by using operation curves. Both curves are plotted in time versus current plan. It was possible to obtain curves that depict the actual behavior of supportability or performance of system elements. This project was conducted in parallel with other graduation project, which aims at defining strategies for automatic overcurrent coordination (Negrao, 2012). The program was developed in C/C++, and its results that will be presented were obtained using the developed tool.

**Keywords:** low voltage breakers, protection coordination and selectivity, fuses, electrical systems protection, relays, industrial electrical system.



## 1 Introdução

Os sistemas de energia elétrica estão sujeitos a faltas e perturbações a todo o momento devido a diversos fatores. Entre os mais comuns estão as falhas em equipamentos por mau funcionamento e consequente deterioração de suas funções, erro humano, ou ainda incidentes ambientais, como por exemplo as descargas elétricas. Portanto torna-se imprescindível a elaboração de um sistema de proteção capaz de evitar que esta falta se propague, e desta forma preservar a integridade física de todo sistema a fim de manter o fornecimento de energia, minimizar danos e manter a segurança de todos que utilizam da energia elétrica (Hewitson et al.,2004).

Um sistema de proteção deve ser projetado de modo a ter as seguintes características (Caminha, 2004):

- Seletividade, isolando apenas a parte defeituosa do sistema elétrico, mantendo as demais partes em operação;
- Rapidez, com a atuação dos dispositivos no menor intervalo de tempo possível depois da ocorrência da falta, evitando a propagação da mesma para outras partes do sistema a fim de minimizar a desativação e danos de partes sadias do sistema;
- Sensibilidade, capaz de perceber os distúrbios que venham a ocorrer no sistema elétrico;
- Segurança, diferenciando as inúmeras condições de defeito das condições de operação normal do sistema para que não opere de forma incorreta e cause desligamentos indevidos;
- Economia, sendo financeiramente viável e consiga atender os itens anteriores.

Para que possa ser possível atender a todas as características supracitadas, um sistema elétrico deve ser equipado com dispositivos de proteção devidamente posicionados e dimensionados para uma proteção efetiva contra qualquer anormalidade do sistema. Deve-se realizar então a coordenação destes dispositivos de proteção. Dois ou mais dispositivos de proteção contra sobrecorrente estão coordenados se aquele mais próximo da falta atuar mais rapidamente que os demais, os quais somente podem atuar se houver a falha do primeiro (ABNT/NBR 5459, 1987).

Realizar a coordenação de dispositivos de proteção exige uma série de estudos para os quais são necessários os dados de operação dos equipamentos do sistema que retratem seus limites, bem como as curvas de atuação dos dispositivos de proteção, e as correntes

de curto-circuito possíveis de acontecer no sistema elétrico. A partir destes dados é feita a escolha do dispositivo que realizará a proteção, com seu posterior dimensionamento. Estes estudos são executados com o auxílio de coordenogramas (também conhecidos como folhas de seletividade), que são representações gráficas, em um plano bi logarítmico de tempo (ordenadas) *versus* corrente (abscissas) das curvas de atuação dos dispositivos de proteção juntamente com as curvas que representam as características nominais e de suportabilidade dos equipamentos protegidos. Na figura 1 está um exemplo de coordenograma.

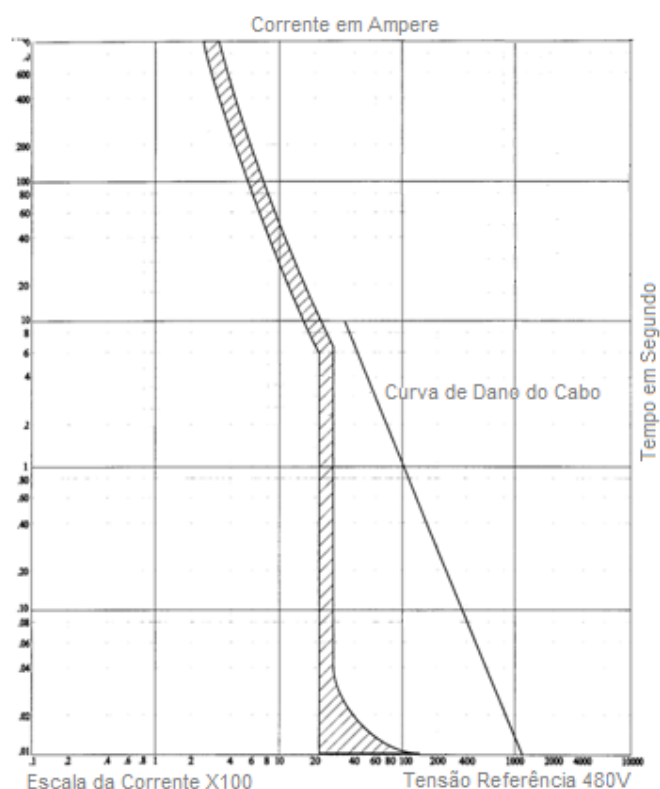


Figura 1: Exemplo de coordenograma ou folha de seletividade.  
Fonte: (IEEE, Std. 242, 2001).

As curvas citadas acima variam conforme o tipo do dispositivo de proteção utilizado, e dentre um mesmo tipo, ainda podem ocorrer variações em função dos dados nominais e parametrizações de ajustes, compreendendo em uma vasta gama de possibilidades. Além das curvas dos dispositivos, ainda existem as curvas que caracterizam os equipamentos do sistema, que são importantes para a escolha dos ajustes dos dispositivos de proteção.

Um correto estudo da coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção em sistemas elétricos, com um elevado número de dispositivos de proteção, envolve o

conhecimento de todos os critérios de coordenação e de proteção individual dos equipamentos, bem como o entendimento das características dos dispositivos de proteção. Portanto, nota-se que estes estudos são trabalhosos e que demandam tempo, conforme aumenta a complexidade dos sistemas elétricos.

Neste contexto, surge a necessidade de utilizar ferramentas capazes de auxiliar o engenheiro de proteção na tarefa de parametrizar os ajustes dos dispositivos de proteção presentes no sistema elétrico. Estas ferramentas devem conter as curvas de atuação dos dispositivos e curvas das características nominais e de suportabilidade dos equipamentos, que devem ser geradas automaticamente e por métodos confiáveis, visando traduzir o mais próximo possível o comportamento real das características dos elementos.

## **1.1 Objetivo**

Compreendida a importância fundamental de um sistema de proteção eficiente, bem como as dificuldades encontradas pelo engenheiro nesse estudo, a proposta deste trabalho é o desenvolvimento de métodos de modelagem das curvas de atuação dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente em sistemas industriais radiais. Paralelamente, será desenvolvido métodos para a geração automática das curvas que representam as características nominais e de suportabilidade contra sobrecorrente dos equipamentos a serem protegidos.

Para analisar as curvas dos elementos, citadas acima, foi desenvolvida a interface gráfica de uma ferramenta que realiza a coordenação automática dos dispositivos de proteção. O desenvolvimento do algoritmo de coordenação foi objeto de estudo de outro trabalho de conclusão de curso e está detalhadamente descrito em Negrão (2012).

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, foi inicialmente realizado um estudo a fim de entender os critérios de coordenação e verificar as técnicas comumente empregadas na modelagem computacional das características dos elementos do sistema. Este estudo visou identificar quais são os parâmetros que devem ser considerados para a modelagem das curvas.

Devido ao foco deste trabalho estar voltado para sistemas industriais e proteção contra sobrecorrente, são contemplados os elementos mais presentes neste tipo de sistema. Os equipamentos são os cabos, motores de indução de baixa e média tensão com gaiola de esquilo e transformadores de dois enrolamentos. Os dispositivos de proteção são fusíveis, disjuntores de baixa tensão e relés digitais de sobrecorrente.

Este trabalho baseia-se no trabalho de Soares (2009). A proposta é, utilizando uma programação em C/C++, levantar as curvas de atuação dos dispositivos de proteção, bem como as curvas características dos equipamentos e componentes a serem protegidos. As definições das características relevantes para levantamento das curvas obedecem à norma IEEE Std. 242 (2001).

## **1.2 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho foi estruturado em seis partes sendo que a primeira foi a introdução ao problema abordado.

O segundo capítulo trata de uma revisão bibliográfica, demonstrando toda a evolução relativa ao tema deste trabalho, bem como o cenário atual. A partir disto, pôde-se trabalhar o tema usando como subsídio os trabalhos anteriores.

O terceiro capítulo aborda todas as características e utilizações dos componentes presentes neste trabalho. Esse capítulo é fruto dos estudos iniciais propostos, sendo muito importante não só para a modelagem, também como para a posterior coordenação.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia utilizada para obtenção das curvas características dos elementos do sistema, bem como os resultados obtidos. Neste são explicadas as entradas que devem ser fornecidas para que o programa possa construir as curvas características dos dispositivos de proteção e dos equipamentos protegidos.

No quinto capítulo, é também apresentado o ambiente gráfico da ferramenta de coordenação automática.

Por fim, no capítulo seis são apresentadas as principais conclusões a respeito do trabalho desenvolvido.

## **1.3 Considerações Finais**

Ressalta-se que este trabalho é parte integrante de um trabalho mais amplo que envolve o desenvolvimento de um programa para coordenação automática de proteção de sobrecorrente em sistemas elétricos industriais. Este trabalho objetiva a modelagem das curvas dos dispositivos de proteção e de suportabilidade dos equipamentos protegidos, bem como o desenvolvimento de uma interface amigável com o usuário. A outra parte do trabalho, que foi responsabilidade de outro aluno de graduação, implicou em desenvolver o método de ajuste automático (Negrão, 2012).



## 2 Revisão Bibliográfica

Com o surgimento dos microcomputadores ocorreram importantes avanços na área do desenvolvimento de metodologias de coordenação da proteção, permitindo a definição de ajustes dos dispositivos de proteção de uma maneira mais rápida e precisa, quando comparados com os processos em que não envolviam o auxílio de ferramentas computacionais. Os processos que antes eram realizados foram sintetizados e realizados com maior precisão e agilidade por sistemas computadorizados, para auxiliar o engenheiro na tarefa de estudo de coordenação e seletividade. A partir disto foram desenvolvidas várias abordagens para solucionar o problema de coordenação e seletividade, sempre tentando atender os requisitos de rapidez, segurança e sensibilidade. Pode-se dividir estas abordagens em dois principais grupos (Flores e Pereira, 1995), no qual o primeiro tem um enfoque voltado para a modelagem computacional gráfica dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente e suas curvas de atuação, e o segundo voltado suas atenções para os algoritmos responsáveis pelo processo de definição automática dos ajustes dos dispositivos de proteção, com intuito de aumentar a agilidade e exatidão do processo.

A seguir serão discutidas as mais importantes abordagens computacionais presentes na literatura para a coordenação dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente.

Em Albrecht et al. (1964) é descrito um programa para realizar a verificação da coordenação e seletividade entre relés direcionais e de sobrecorrente, fusíveis e religadores, para proteção contra curtos entre fases, sejam trifásicos ou bifásicos. A ideia era, a partir de um sistema elétrico já definido, realizar os cálculos para ajustar e verificar a coordenação entre dois dispositivos, bem como verificar os tempos de atuação em diferentes valores de corrente de falta. Baseando-se nas curvas de atuação (na época os relés eram todos do tipo eletromecânico, apresentando apenas um tipo de curva de atuação), o programa oferece a possibilidade de realizar a escolha do relé mais adequado para a proteção de determinado trecho do circuito. Outra funcionalidade do programa é realizar a coordenação automática dos ajustes, ou fixar um ajuste de um dispositivo e coordenar os demais partindo deste.

Langhans e Ronat (1980) propõem um programa que executa a coordenação automática de dispositivos de proteção contra curto-circuito bifásico ou trifásico através da utilização de coordenogramas. Definido os critérios de coordenação de proteção entre relés de sobrecorrente, disjuntores e fusíveis, primeiramente faz-se a seleção do ajuste com o dispositivo de proteção com a carga. Em seguida, faz-se o ajuste do dispositivo de proteção a montante. Importante salientar que este programa não soluciona os problemas de coordenação, apenas os expõe para o usuário, para que ele tome as medidas necessárias.

O programa desenvolvido em Flores e Pereira (1995) merece destaque devido à interatividade existente entre o usuário e o programa em tempo de execução. Permitindo calcular os ajustes instantâneos e temporizados dos relés de sobrecorrente, a modelagem de suas curvas de atuação não padronizadas pode ser aproximada por polinômios de terceiro grau. Utilizando menus e janelas, o programa permite calcular a relação do transformador de corrente, realizar a modelagem gráfica das curvas de atuação dos relés, calcular o ajuste de corrente e do multiplicador de tempo dos relés e verificar a sensibilidade dos mesmos para diversos níveis de curto-circuito. Ao contrário dos anteriores, neste programa é possível incorporar a experiência do usuário durante o processo de coordenação, no qual os ajustes ficavam a cargo apenas dos critérios previamente definidos. Os ajustes são feitos separadamente para cada relé, não analisando a coordenação de todos os relés em um mesmo circuito automaticamente. Para coordenar um relé com outro dispositivo a jusante é necessário que este tenha sido anteriormente ajustado. Então o usuário fornece o intervalo de coordenação e é feito o ajuste do relé de interesse.

Em Brown e Parker (1988) foi desenvolvido um programa que executa a coordenação da proteção e seletividade em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais. Seu diferencial foi a adoção de um banco de dados que armazena as características de diversos dispositivos de proteção (curvas de atuação) e o desenvolvimento de rotinas que permitiam a manipulação destas curvas, podendo o usuário ter acesso a elas, selecionar e testar curvas de qualquer dispositivo presente no banco de dados.

Em Yinhong et al. (2001) foram descritas sucintamente as características de um programa computacional capaz de realizar a coordenação dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente automaticamente. Sua grande contribuição foi sugerir uma estrutura de programa integrado para a coordenação entre dispositivos de proteção contra sobrecorrente, porém não oferece muito detalhamento sobre como deve ser feita a modelagem destes dispositivos, e sobre os critérios de coordenação e seletividade adotados. A estrutura do programa é composta por cinco módulos:

- Módulo de coordenação dos relés;
- Módulo de cálculo de curto-circuito;
- Módulo de gerenciamento das funções gráficas;
- Módulo de gerenciamento de dados e
- Módulo de funções adicionais.

O primeiro módulo é responsável por funções que identificam os dispositivos que devem ser coordenados e executa automaticamente a coordenação entre os dispositivos de

proteção. O segundo módulo realiza o cálculo das correntes de curto circuito para diferentes tipos de falta. O terceiro módulo oferece a possibilidade de confecção do diagrama unifilar e construção de coordenogramas. O módulo de gerenciamento de dados armazena os dados do sistema elétrico e dos dispositivos de proteção em um banco de dados utilizando estruturas orientadas a objetos. Por fim, o último módulo trata de funções como a impressão dos resultados e conversão de formato, entre outras.

Com uma abordagem voltada para a verificação da coordenação da proteção de relés direcionais de sobrecorrente de neutro de linhas de transmissão de energia elétrica, Klock Jr. (2002) propõe um programa computacional cuja metodologia trata da coordenação de proteção e seletividade apenas entre um par de relés de proteção primária/retaguarda definido pelo usuário, e não para o sistema inteiro. Os cálculos dos ajustes de corrente e tempo do relé de retaguarda são feitos automaticamente por uma rotina do programa, porém estes podem ser alterados pelo usuário, caso julgue necessário. Estão presentes nesse programa funções que realizam o cálculo da corrente de curto-circuito, fornecendo a corrente que circula por cada relé para diferentes tipos de faltas determinadas pelo usuário. Além disso, o foco é utilizar-se da experiência do engenheiro de proteção, aumentando assim a interação entre o usuário e o programa.

Em Yang et al. (2007), utilizou-se da estrutura modulada do programa de coordenação proposto por Yinhong et. al. (2001). Os autores propuseram um algoritmo flexível para a coordenação automática de dispositivos de proteção contra sobrecorrente utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica. A flexibilidade deste algoritmo reside no fato de que este permite que o usuário defina fatores de segurança e sensibilidade em diversos dispositivos de proteção, possibilite a criação de novos critérios de proteção e realize a análise em diferentes condições operativas que resultem alteração topológica do mesmo.

Comasseto et al. (2008) desenvolveram uma ferramenta computacional denominada Análise de Sistemas de Proteção (ASP) para determinar automaticamente os ajustes dos dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores propuseram a execução de um programa de fluxo de carga em condição de máximo carregamento do sistema de distribuição para determinar os valores mínimos dos fusíveis e ajustes de corrente de relés e religadores. Então, utilizando-se de tabelas de seletividade, é feita a seleção dos fusíveis nos trechos analisados, com a corrente nominal superior à máxima corrente determinada pela execução do fluxo de carga. Por fim se faz a definição dos ajustes de religadores e relés. Uma vez em posse da corrente mínima de ajuste, varia-se o ajuste de tempo das curvas até que esteja dentro do intervalo de coordenação. Caso não encontre um ponto em que a seletividade é respeitada, aumenta-se o valor da corrente

de ajuste, e repete-se o processo até encontrar estes ajustes. Este processo é feito para todos os trechos, e por fim utiliza-se um algoritmo de otimização, baseado na minimização da potência não suprida devido à atuação do dispositivo de proteção. Esse algoritmo é utilizado para evitar a existência de muitos fusíveis em série, retirando ou realocando alguns deles, garantindo a seletividade e coordenação em todos os trechos.

Soares (2009) descreve o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que realiza a coordenação automática e seletividade de dispositivos de proteção contra sobrecorrente em sistemas elétricos industriais radiais, utilizando para isto o ambiente MATLAB. No trabalho utilizam-se os critérios de proteção para diversos tipos de componentes, como cabo, motor e transformador, utilizando como dispositivos de proteção fusíveis, disjuntores de baixa tensão e relés digitais de sobrecorrente. A metodologia contempla tanto a proteção individual de cada equipamento como também realiza a coordenação da proteção dos dispositivos presentes no sistema elétrico em estudo. Não existe um módulo de funções que faça o cálculo da corrente de curto-circuito, bem como não é feita a proteção de geradores.

Existem também alguns programas comerciais que realizam o estudo da coordenação e seletividade de dispositivos de proteção contra sobrecorrente. Dentre eles, podemos citar:

*DlgSILENT PowerFactory* (DIGSILENT, 2012): desenvolvido pela empresa alemã DlgSILENT GmbH. Além de uma consistente biblioteca de modelos definidos, este programa permite a criação de modelos de diversos tipos de dispositivos de proteção, representando as curvas de atuação em coordenogramas. Este programa também realiza o cálculo da corrente de curto-circuito. A coordenação dos dispositivos de proteção não é automática, sendo os ajustes feitos manualmente pela manipulação das curvas de atuação;

*CAPTOR* (SKM, 2012): desenvolvido pela *SKM System Analysis Inc.*. Possui funções similares com a do programa anterior, como o cálculo de curto-circuito e verificação gráfica da coordenação e seletividade, não dispondo de procedimentos automáticos para efetuar a coordenação;

*ASPEN* (ASPENINC, 2012): desenvolvido pela empresa *Advanced Systems for Power Engineering Inc.*. Com funções iguais as dos programas anteriores, este difere pelo fato de verificar automaticamente se os ajustes dos dispositivos de proteção determinados pelo usuário estão corretamente coordenados;

*NEPLAN* (NEPLAN, 2012): desenvolvido pela *BCP Switzerland*. Possui as mesmas funcionalidades dos programas anteriores, sendo que as definições de ajustes automáticos se restringem apenas a relés de distância;

EASYPower (EASYPower, 2012): desenvolvido pela empresa ESA Inc.. Com funções similares a dos programas anteriores, este conta com ajuste automático dos dispositivos de proteção. Ao usuário cabe a entrada com os intervalos de coordenação e as características de suportabilidade contra altas correntes nos equipamentos protegidos e componentes. O programa fornece automaticamente os ajustes dos relés de fase e de neutro. Este programa não soluciona casos em que não há coordenação entre dois dispositivos, apenas adverte o usuário sobre o problema. Também não faz a seleção automática da curva de atuação mais adequada no caso de relés de sobrecorrente que possuem diversas curvas, realizando apenas a coordenação a partir de um tipo de curva selecionado pelo usuário.

Todos os trabalhos apresentados anteriormente visam atender os requisitos de proteção dos sistemas citados na introdução deste trabalho. Alguns dos trabalhos restringem sua aplicação a sistemas de energia elétrica específicos, visando a coordenação automática. Como exemplo, podemos citar Klock Jr. (2002) e Comasseto (2008), no qual focam em sistemas de transmissão e distribuição, respectivamente. No entanto há outros como Albrecht (1964), Langhans e Ronat (1980), Brown e Parker (1988), e o programa EASYPower (EASYPower, 2012), que não restringem sua aplicação, podendo analisar diferentes tipos de sistemas elétricos.

A ferramenta proposta neste trabalho se restringe a sistemas industriais radiais e promove a coordenação automática dos dispositivos de proteção de um sistema a ser definido pelo usuário. Esta escolha foi pautada na diversidade de elementos presentes em sistemas industriais, podendo ser aplicável em situações reais.



### **3 Estudo da Operação e Características dos Elementos**

Estudos de coordenação da proteção e seletividade de dispositivos de proteção contra sobrecorrente são necessários antes da implantação de novos sistemas elétricos, bem como quando ocorre da alteração de sistemas elétricos existentes, sobretudo quando da instalação de novos motores e geradores. Tais estudos envolvem o conhecimento de todos os critérios de coordenação e de proteção individual de equipamentos, das características dos dispositivos de proteção e das características dos elementos protegidos (Soares, 2009).

A seguir serão analisadas as características mais importantes referentes tanto aos dispositivos de proteção quanto aos elementos que devem ser protegidos. Todas as curvas características foram traçadas utilizando a ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho.

#### **3.1 Dispositivos de Proteção**

Os dispositivos de proteção abordados neste trabalho são:

- Fusíveis: podendo ser de baixa ou alta tensão;
- Disjuntores de baixa tensão e;
- Relés digitais de sobrecorrente.

A seguir serão explanadas as principais características destes dispositivos de proteção, com foco nas curvas de atuação. Estas curvas possuem um comportamento dependente da magnitude da corrente em relação ao tempo de operação. Quanto maior a intensidade da corrente, menor deve ser o intervalo de tempo para que o dispositivo atue, sendo que para valores no qual a corrente seja extremamente elevada, alguns dispositivos possam atuar instantaneamente, como o caso de alguns disjuntores de baixa tensão e relés; evitando danos as estruturas físicas dos elementos do sistema (IEEE Std. 242, 2001).

##### **3.1.1 Fusível**

Utilizados na proteção de linhas, cabos, motores, transformadores e até mesmo protegendo outros dispositivos de proteção, os fusíveis se tornaram bastantes populares devido a sua simplicidade e baixo custo.

Este dispositivo tem como finalidade básica o corte do fluxo da corrente elétrica quando esta for excessiva devido à ocorrência de um curto-circuito ou sobrecarga. O fusível é composto por um filamento ou lâmina de um metal ou liga metálica de baixo ponto de

fusão que se intercala em um determinado ponto de uma instalação elétrica para que se funda, por efeito Joule, quando circular uma corrente elétrica superior ao valor nominal por um determinado tempo. Este intervalo de tempo deve ser suficientemente curto para evitar danos à integridade dos condutores e o risco de incêndios ou destruição de outros elementos da rede (IEEE Std. 242, 2001).

Diversos são os parâmetros que caracterizam o fusível, como por exemplo, a corrente nominal, o tempo de fusão, o tipo, a classe de tensão e o nível básico de isolamento, entre outros. Este trabalho irá considerar a corrente nominal como a característica principal para todos os fusíveis. Esta pode ser definida como a corrente que pode circular pelo fusível por um tempo indeterminado, sem que haja interrupção do circuito.

Existem diversos tipos de fusíveis, que variam conforme a sua aplicação, curvas de atuação, correntes e tensões nominais. Inicialmente, existem duas grandes classes nas quais os fusíveis podem ser classificados: os fusíveis de baixa tensão (para classe de tensão inferior a 1 kV) e fusíveis de alta tensão (para classes de tensão superior a 1 kV). Os fusíveis têm as seguintes características funcionais (IEEE Std. 242, 2001):

- São capazes de detectar e interromper, por meio da abertura do circuito, a corrente danosa;
- Sua resposta se dá através de uma ação conjunta da magnitude da corrente que por ele circula e do tempo ao qual fica exposto;
- Não apresentam modo de operação manual a fim de desenergizar o sistema, assim como os disjuntores, necessitando de um dispositivo auxiliar que o faça;
- São dispositivos monofásicos, em que apenas a fase sujeita à sobrecorrente será interrompida, nada ocorrendo com as outras e;
- Depois de interrompida a sobrecorrente, eles devem ser substituídos por novos, e só então, religado o sistema.

Uma corrente maior que a nominal provoca a ruptura do elo fusível após algum tempo, e esta relação tempo *versus* corrente é a curva característica de proteção do fusível. Quando apresentam um tempo relativamente longo para atuar, são chamados de fusíveis de ação retardada. Em contrapartida, os que levam um tempo bem menor, com mesma corrente são chamados rápidos. Esta diversidade é necessária, uma vez que cargas comuns, como, por exemplo, motores, têm um pico de corrente na partida que deve ser suportado e, portanto, o tipo retardado deve ser usado.

É importante evitar confusões: um fusível rápido colocado no lugar de um retardado provavelmente irá abrir ao se ligar a carga; e um retardado no lugar de um rápido poderá



não proteger os componentes em caso de um curto-circuito interno no equipamento (IEEE Std. 242, 2001).

Um exemplo de curva de atuação que demonstra o comportamento do fusível perante a intensidade da corrente é apresentada na figura 2.

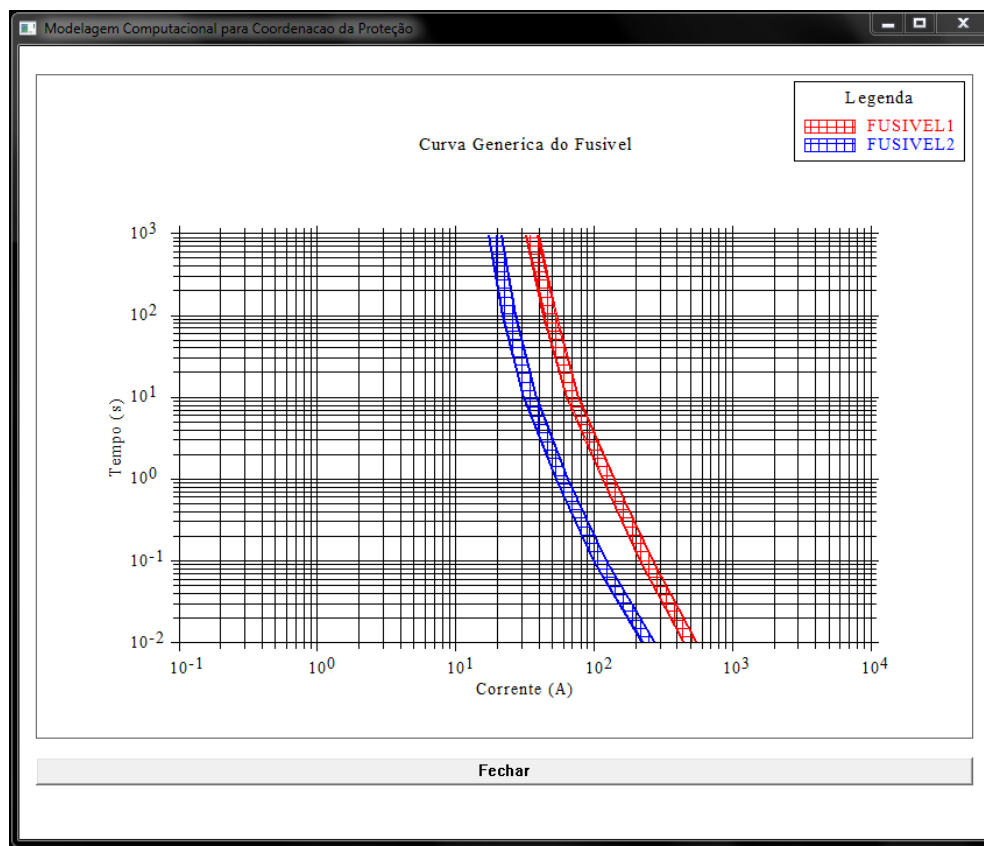


Figura 2: Curva de atuação do fusível.

A figura 2 apresenta a curva de dois diferentes fusíveis. Nela é possível notar que estes dispositivos apresentam uma faixa de imprecisão. Esta imprecisão está relacionada ao modo de fabricação do mesmo, e geralmente é determinada pelo fabricante como a tolerância do dispositivo.

### 3.1.2 Disjuntor de Baixa Tensão

Dotados de proteção contra curto-circuito e contra sobrecarga, os disjuntores de baixa tensão são dispositivos de proteção que têm como função principal agir como interruptor, possibilitando a abertura e fechamento do circuito por meios não automáticos, e abrindo automaticamente sempre que houver uma sobrecorrente, sem que sua estrutura sofra

danos quando aplicados de maneira correta (IEEE Std. 242, 2001). Pelo fato de poderem ser rearmados, manualmente ou eletricamente, levam vantagem sobre os fusíveis.

Os disjuntores de baixa tensão que serão contemplados neste estudo são os disjuntores com disparador eletrônico. Nestes, o processamento das correntes e a determinação da abertura são executados por uma unidade eletrônica acoplada ao disjuntor. Sua curva de atuação pode ser separada convenientemente em três regiões, conforme mostrado na figura 3 (IEEE Std. 242, 2001):

- Proteção de tempo longo: utilizada para proteção contra sobrecarga. Seu tempo de atuação é dado na ordem de minutos, dependendo das características do disjuntor e da intensidade de corrente. É normalmente definida por uma curva de tempo inverso.
- Proteção de tempo curto: podendo ser utilizada tanto na proteção contra curto-circuito quanto para situações de sobrecarga.
- Proteção instantânea: também utilizada na proteção contra curto-circuito, juntamente com a proteção de tempo curto.

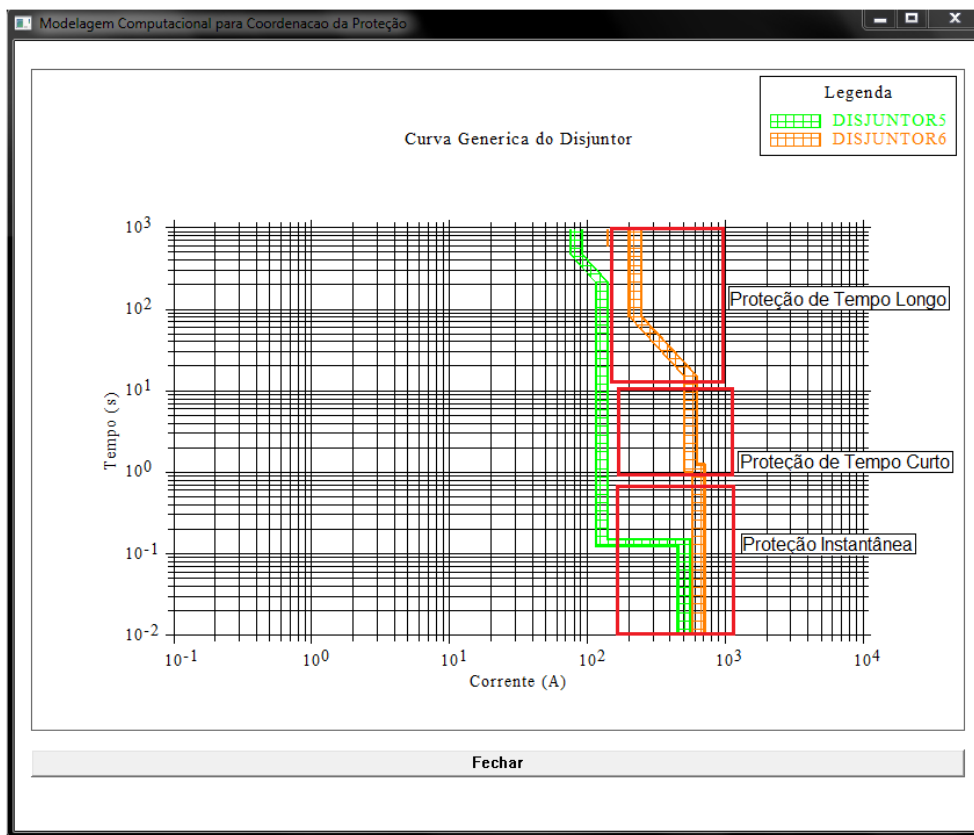


Figura 3: Curva de atuação dividida por região de proteção.

Os disjuntores de baixa tensão com disparador eletrônico ainda possuem proteção para faltas fase-terra, definida pela curva de tempo definido. Esta proteção se baseia no valor da corrente de sequência zero que, ao ultrapassar um valor ajustado no relé, comandará a abertura do disjuntor. Um exemplo é apresentado na figura 4.

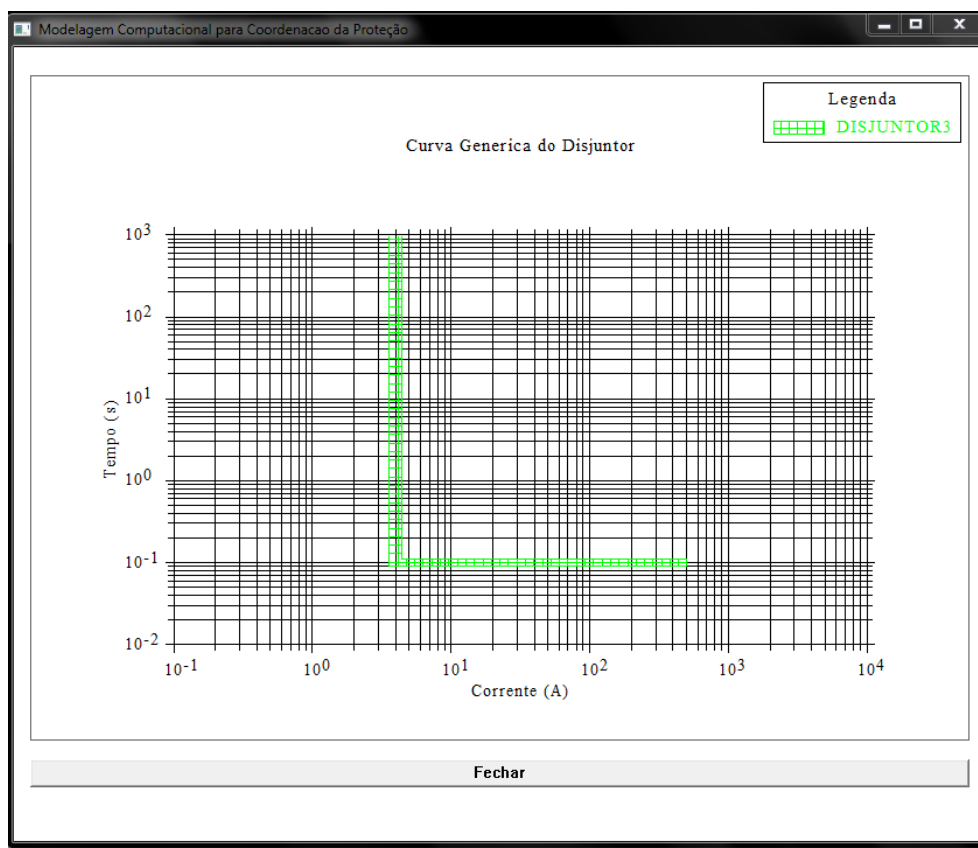


Figura 4: Curva de atuação do disjuntor para proteção fase-terra.

### 3.1.3 Relé Digital de Sobrecorrente

O relé de proteção é um dispositivo que comanda a abertura de outro dispositivo de proteção quando surgem no sistema protegido condições anormais de funcionamento. Seu objetivo é retirar de operação um equipamento ou circuito elétrico que esteja operando de maneira inadequada (Corry et al., 2007).

Durante os últimos anos, devido aos avanços na área da medição, proteção e supervisão de sistemas elétricos, foi possível a evolução dos relés em aspectos construtivos, dimensionais e operacionais. Estes passaram de dispositivos eletromagnéticos, para relés estáticos, que possuem elementos eletrônicos, e por fim para os atuais relés digitais, que possuem microprocessadores.

Através de sofisticados programas computacionais, os relés digitais possuem capacidade de monitorar e supervisionar diversas grandezas e controlar atuações no sistema, tornando-se um elemento indispensável, como, por exemplo, em um sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Podem-se citar como principais vantagens a velocidade de resposta, funções de autodiagnóstico, possibilidade de integração com diversos dispositivos e o fato destes concentrarem funções de vários tipos de relés de proteção em um único equipamento. Porém estes apresentam vida útil reduzida, quando comparados com outros tipos de relé (Coury et al., 2007).

A arquitetura típica de um relé digital é apresentada na figura 5 (Coury et al., 2007; Soares, 2009).

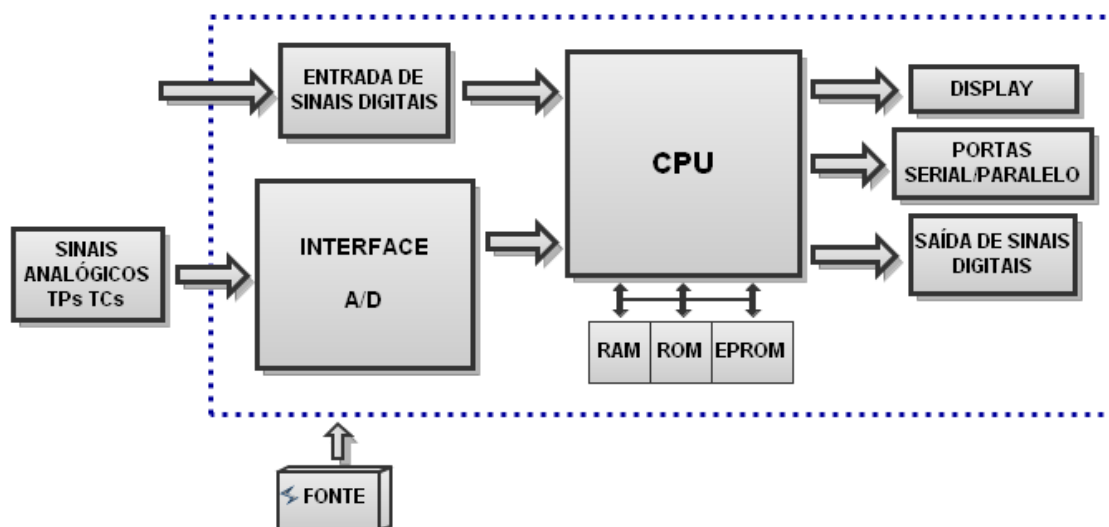


Figura 5: Diagrama funcional de blocos de um relé.

Na figura 5, nota-se a presença de sinais analógicos vindo de transformadores de corrente (TC) e de potencial (TP). As funções destes são de evitar conexão direta do relé e medidores na rede elétrica, e adaptar as grandezas a serem medidas aos valores compatíveis com a capacidade desses equipamentos, protegendo o operador das altas correntes.

As entradas de sinais digitais são compostas pelo estado de disjuntores, chaves e até mesmo de outros relés. Estes sinais, assim como os de medição vindo dos TPs e TCs, são pré-processados e enviados para a CPU (*Central Processing Unit*). O relé possui um display no qual os dados que foram processados pela CPU podem ser visualizados. Estes mesmos dados ainda podem ser compartilhados com outros relés. Para evitar que falhas no sistema

influenciem no correto funcionamento do relé, estes necessitam de fonte independente, geralmente proveniente de um conjunto de baterias.

Os relés de proteção contra sobrecorrente podem ter as seguintes funções de proteção:

- Sobrecorrente de fase: mede a corrente de cada fase, bastando apenas que uma dessas apresente uma medida superior ao valor ajustado para que o relé atue.
- Sobrecorrente de neutro: sua atuação é proveniente de medição ou resultante do somatório vetorial das correntes das três fases.
- Sobrecorrente de terra: para que seja possível realizar a proteção contra sobrecorrente de terra, necessita de utilizar um tipo diferente de TC, o toroidal.

Para estas funções de proteção, apresentam-se duas alternativas de atuação: a temporizada e a instantânea. A temporizada apresenta seu tempo de resposta dependente da magnitude da corrente ou pode ser a tempo definido, enquanto a instantânea atua dentro de um tempo definido para o valor de corrente de ajuste pré-estabelecida.

Para curvas de atuação a tempo definido, o envio do sinal de disparo é feito para qualquer corrente acima do valor da corrente de ajuste ( $I_P$ ) (também chamada de corrente de disparo, corrente de partida ou corrente de *pick up*) que dure mais que um tempo estabelecido ( $T_P$ ).

Por outro lado, nas curvas de atuação temporizada, o tempo de atuação varia conforme a intensidade da corrente. Ou seja, quanto maior a corrente, menor este tempo de atuação.

A figura 6 mostra um exemplo de curva de atuação com tempo definido e na figura 7, mostra-se um exemplo de curva de atuação a tempo inverso.

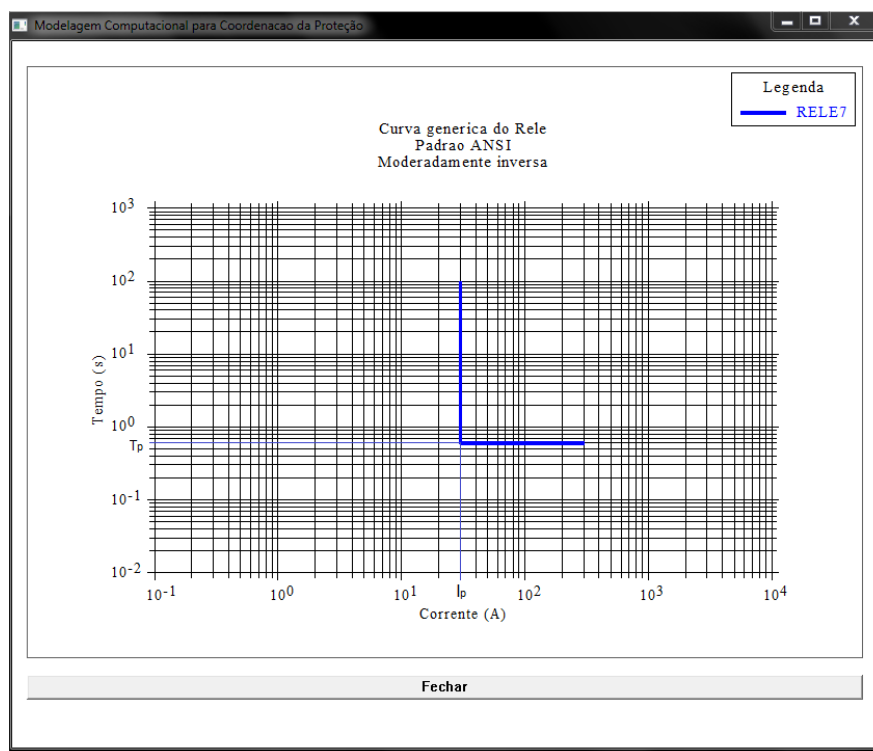


Figura 6: Curva de atuação a tempo definido do relé.

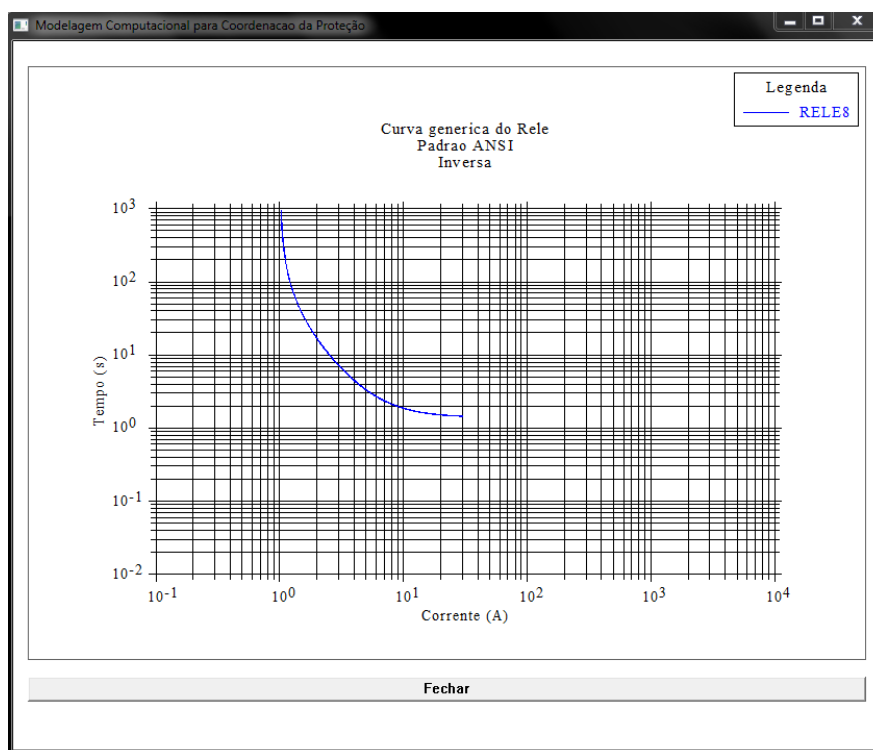


Figura 7: Curva de atuação a tempo dependente do relé.

As curvas de tempo inverso se encaixam em duas categorias, as curvas padronizadas e as não-padronizadas. As não-padronizadas são definidas pelo fabricante e as padronizadas seguem equações estabelecidas pelos institutos ANSI ou IEC. Em se tratando de relés eletromecânicos, a escolha da característica do equipamento deve ser feita no momento da compra e, assim, não é possível alterá-la. Atualmente, fabricam-se praticamente somente os relés digitais e a maior parte deles permite escolher a característica tempo corrente apenas alterando-se os parâmetros no próprio relé.

A fim de evitar o desgaste em catalogar curvas não padronizadas, pelo fato deste trabalho contemplar apenas os relés do tipo digital, este trabalho irá contemplar apenas as curvas padronizadas.

A equação que rege o tempo de operação do relé com relação à intensidade da corrente é a seguinte (IEEE Std. C37.112, 1996):

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

Sendo:

$T_{op}$ : tempo de operação do relé, em segundos.

TDS: multiplicador do ajuste de tempo do relé.

M: múltiplo da corrente de ajuste.

$K_1, K_2, K_3$ : Constantes definidas de acordo com tipo de curva.

Este dispositivo permite diferentes tipos de curvas, que indicam a sua declividade. Estas curvas são definidas pelas constantes  $K_N$ , as quais variam seu valor dependendo do instituto ao qual se está tomando como referência.

Adotando o padrão definido pelo instituto ANSI, os valores das constantes  $K_N$ , para todos os tipos de curva são apresentados na Tabela 1 (University of Idaho, 2012).

Tabela 1: Constantes  $K_N$  para padrão ANSI.

Tipo de Curva	K1	K2	K3
Moderadamente Inversa	0,0226	0,0104	0,0200
Inversa	0,1800	5,9500	2,0000
Muito Inversa	0,0963	3,8800	2,0000
Extremamente Inversa	0,0352	5,6700	2,0000
Inversa de Tempo Curto	0,0026	0,0034	0,0200

A figura 8 mostra um exemplo de família de curvas do tipo moderadamente inversa, e a figura 9 mostra as curvas do tipo extremamente inversas, ambas no padrão ANSI. Foi considerada uma variação do TDS entre 0,5 e 15.

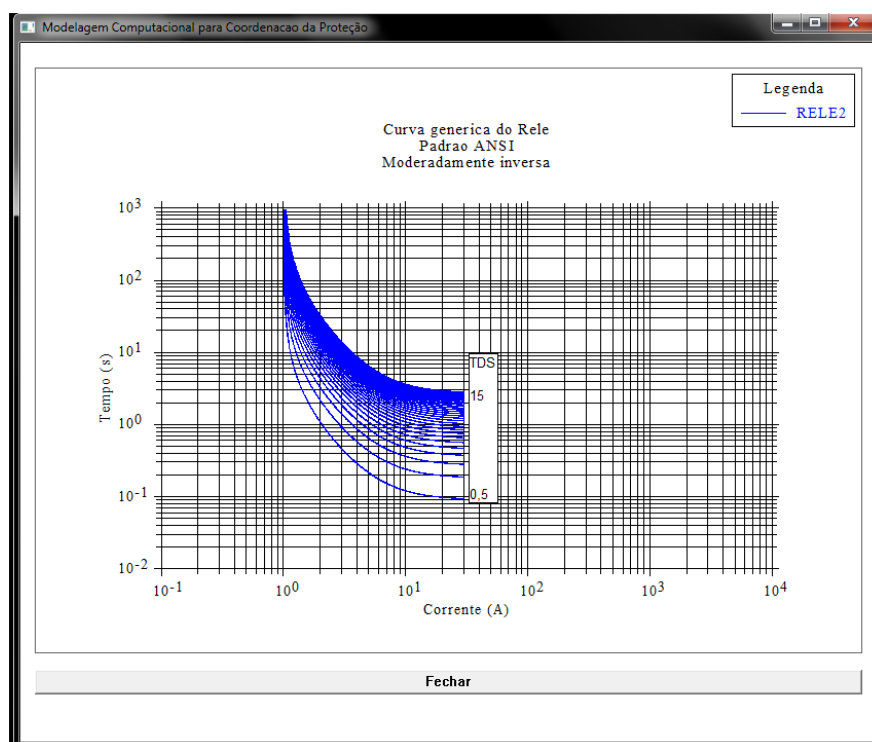


Figura 8: Curva do tipo moderadamente inversa padrão ANSI.



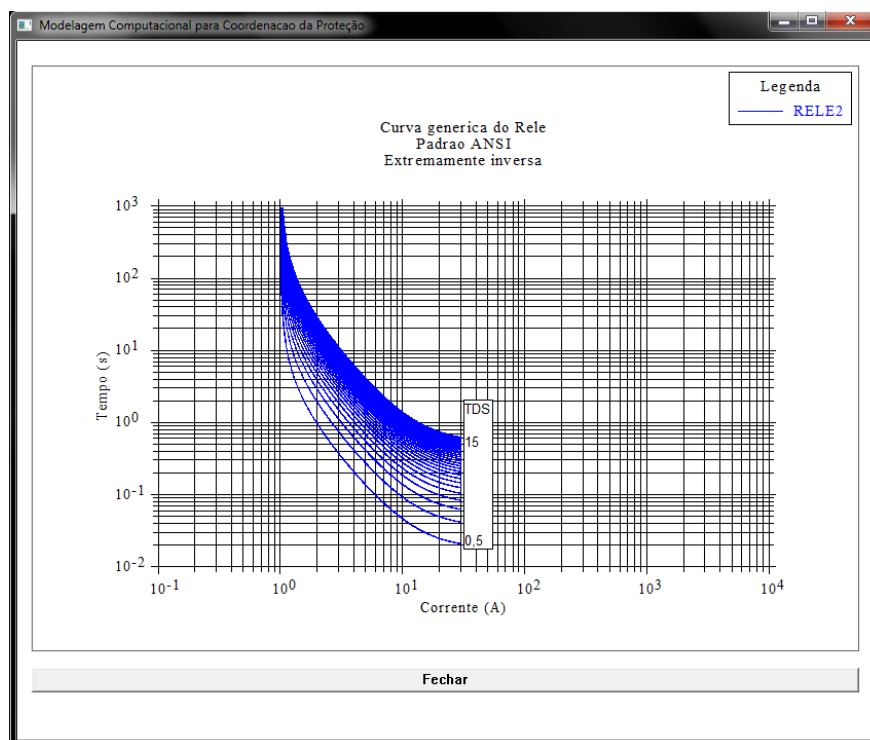


Figura 9: Curva do tipo extremamente inversa pelo padrão ANSI.

A Tabela 2 apresenta os valores das constantes de acordo com o IEC (IEC 60255-3, 1989):

Tabela 2: Constantes  $K_N$  para padrão IEC.

Tipo de Curva	K1	K2	K3
Inversa	0,0000	0,1400	0,0200
Muito Inversa	0,0000	13,5000	1,0000
Extremamente Inversa	0,0000	80,0000	2,0000
Inversa de Tempo Longo	0,0000	120,0000	1,0000
Inversa de Tempo Curto	0,0000	0,0500	0,0400

A figura 10 e 11 ilustram dois tipos de curvas pelo padrão IEC obtidas variando-se o TDS de 0,05 até 1.

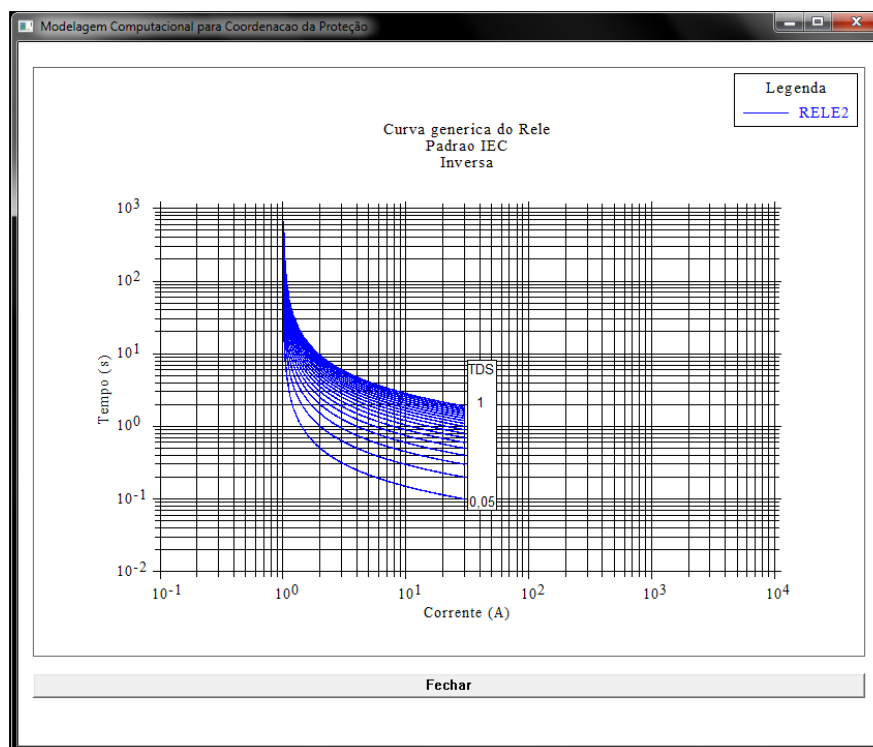


Figura 10: Curva do tipo inversa pelo padrão IEC.

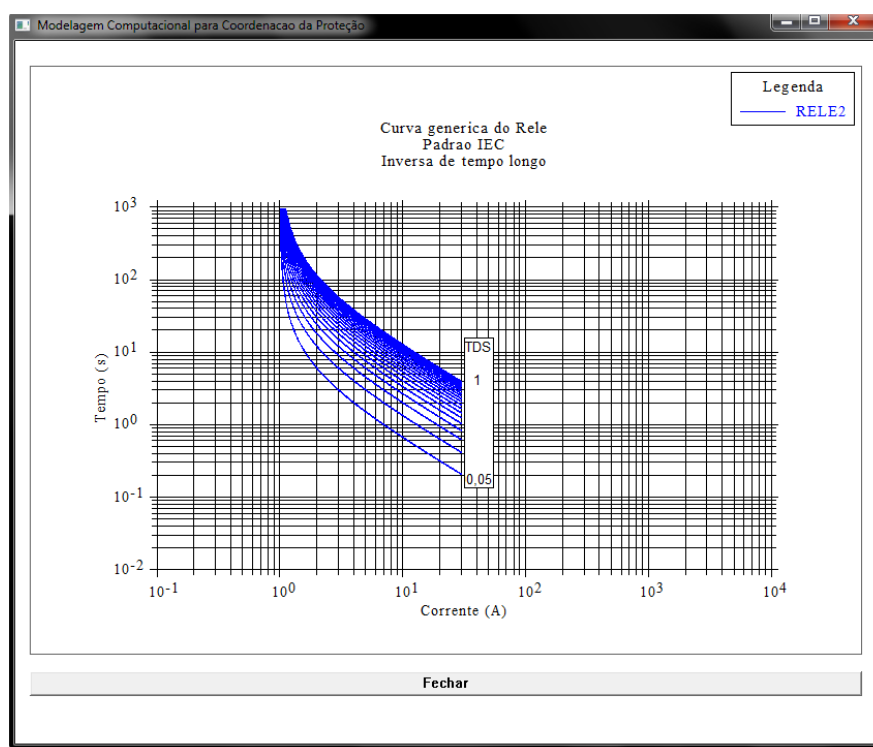


Figura 11: Curva do tipo inversa de tempo longo pelo padrão IEC.

Nota-se que conforme varia-se o padrão da curva (IEEE ou ANSI), têm-se diferentes possibilidades de parametrização dos relés. Dentro de cada padrão, há ainda uma variação no tipo da curva que atuará sobre a declividade da mesma.

## **3.2 Equipamentos Protegidos**

Os equipamentos dos sistemas elétricos industriais que serão analisados neste trabalho são:

- Cabos;
- Motores de indução trifásicos com rotor gaiola de esquilo e;
- Transformadores trifásicos de dois enrolamentos.

É de grande importância conhecer as características nominais dos equipamentos e seus limites de suportabilidade de sobrecorrente, para que assim possa ser realizada a definição dos ajustes dos dispositivos de proteção de sobrecorrente.

### **3.2.1 Cabos**

Quando ocorre um curto-circuito, o sistema é percorrido por correntes de valores elevados que provocam sérios danos aos equipamentos. No caso dos cabos, que são compostos de condutores envoltos em um material isolante, o acúmulo de energia térmica provocado pela passagem destas correntes de curto-circuito, gera um superaquecimento em sua estrutura física, causando dano. O acúmulo da energia é resultado do efeito Joule, que consiste no transporte das cargas através de um material isolante por um determinado tempo. Portanto, quanto maior a corrente passando pelo condutor, maior a quantidade de calor gerado. Para que a energia não seja transferida para o material isolante, deve-se eliminar a falta com a maior brevidade possível (IEEE Std. 242, 2001).

Pode-se concluir que a determinação das condições de operação do cabo durante um curto-circuito é função da energia térmica armazenada no material condutor e no limite de temperatura máxima tolerada pelo material isolante. Admite-se que o intervalo de tempo de da passagem de corrente de curto-circuito é pequeno, de forma que o calor desenvolvido durante o curto fica contido no condutor ((Prysmian Cables and Systems, 2008).

A curva que relaciona a suportabilidade do cabo com relação à intensidade da corrente é regida pelas equações (2) e (3) (Prysmian Cables and Systems, 2008). Aplicam-

se estas equações a cabos de média tensão para uso geral. A equação (2) se aplica aos condutores de cobre e a equação (3) para condutores de alumínio, tem-se:

$$\left(\frac{I}{S}\right)^2 \times t = 115.679 \times \log_{10} \left(\frac{T_2 + 234}{T_1 + 234}\right) \quad (2)$$

$$\left(\frac{I}{S}\right)^2 \times t = 48.686 \times \log_{10} \left(\frac{T_2 + 228}{T_1 + 228}\right) \quad (3)$$

Sendo:

$I$  = corrente de curto-circuito, em Ampére.

$S$  = seção transversal, em milímetros quadrados.

$t$  = tempo de duração do curto-circuito, em segundos.

$T_1$  = máxima temperatura admissível no condutor em operação normal, em graus Celsius.

$T_2$  = máxima temperatura admissível para o condutor em curto-circuito, em graus Celsius.

Conforme visto anteriormente, dependendo do material do condutor, tem-se uma equação. Nestas, os valores de  $T_1$  e  $T_2$  dependem do tipo de conexão, prensada ou soldada, que depreciam com o aumento da temperatura. Para a temperatura inicial do condutor, admite-se a temperatura máxima permitida em condições normais de trabalho, uma vez que esta depende da carga do cabo e das condições ambientais, sendo difícil saber seu valor com precisão. Para conexões do tipo solda estanho-chumbo, o aumento de temperatura danifica sua estrutura, não sendo recomendado que estas ultrapassem 160°C. Para conexões prensadas, admitem-se temperaturas maiores. A Tabela 3 os valores típicos de  $T_1$  e  $T_2$  de acordo com o material condutor e tipo da conexão (Prysmian Cables and Systems, 2008).

Tabela 3: Valores de temperatura para diversas condições.

Material do Condutor	T1 (°C)	T2 (°C)	
		Conexão Prensada	Conexão Soldada
Condutor de Cobre	90	250	160
Condutor de Alumínio	105	250	160

Utilizando as equações (2) e (3) é possível obter a curva que indica o limite térmico do cabo para diferentes valores de corrente de curto circuito, como apresentado na figura 12.

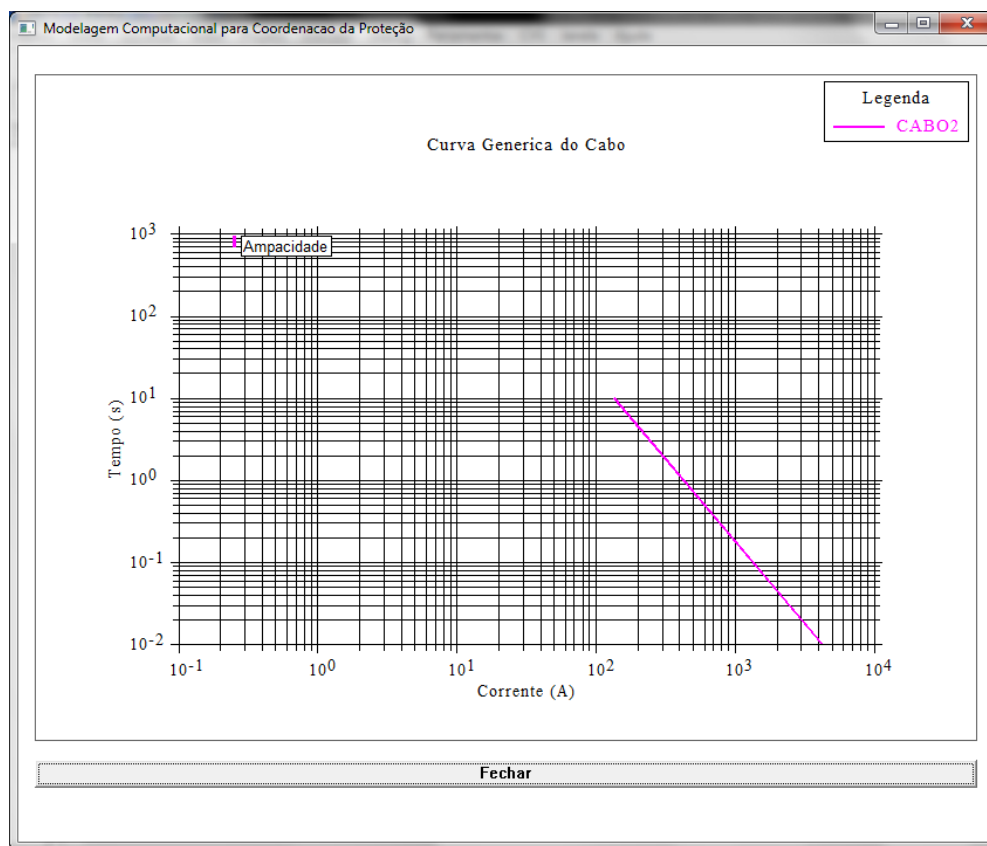


Figura 12: Curva limite de sobrecorrente do cabo.

A curva de limite térmico apresentada na figura 12 se refere a um cabo de alumínio com conexão prensada, com a seção transversal de  $95 \text{ mm}^2$ . É possível notar a presença de um ponto no gráfico, que é definido como sendo a ampacidade do cabo. A ampacidade é definida como a capacidade de corrente elétrica em regime. Caso esta corrente seja ultrapassada, por sobrecarga no sistema, haverá um aumento na energia térmica dos condutores, por efeito Joule, que provocará ligeira deformação do condutor reduzindo sua vida útil. Portanto é possível o cabo operar acima de seus dados nominais, porém esta situação não pode ser frequente.

Na metodologia a ser adotada para proteção instantânea contra curto-circuito do cabo, os dispositivos de proteção devem atuar sempre em tempos menores do que aquele obtido através da curva de limite térmico para uma mesma corrente. O mesmo deve ocorrer com

relação à ampacidade, onde a corrente de ajuste dos dispositivos não deve exceder este valor (IEEE Std 242, 2001).

### 3.2.2 Motor de Indução

Muitos fatores devem ser considerados na escolha da proteção do motor, como por exemplo, a importância do motor no sistema, limites térmicos do rotor e estator, ambiente ao qual o motor está sujeito, tipo de aterramento do sistema elétrico, etc (IEEE Std 242, 2001).

Outro fator determinante na escolha da proteção é a categoria de tensão. Neste trabalho serão abordados os motores de indução trifásicos, com rotor gaiola de esquilo, nas classes de baixa e de média tensão. Enquadram-se na categoria de baixa tensão motores que apresentam tensão inferior a 1 kV, enquanto os de média apresentam tensões acima de 1 kV (IEEE Std 242, 2001). Para cada classe de tensão são feitos diferentes esquemas de proteção contra sobrecorrente, porém a filosofia principal se aplica às duas classes. Esta filosofia consiste em utilizar dispositivos de atuação instantânea na proteção contra curtos-circuitos, enquanto dispositivos de atuação temporizada são empregados na proteção contra sobrecarga.

Para a proteção contra sobrecarga pode-se utilizar relés de sobrecorrente ou disjuntores de baixa tensão com disparador eletrônico, provendo assim uma atuação temporizada. Já para proteção contra curtos-circuitos, pode-se utilizar tanto de relés com atuação instantânea quanto disjuntores de baixa tensão ou fusíveis (IEEE Std 242, 2001).

O motor apresenta algumas características nominais que devem ser estudadas para definir os ajustes de proteção, independente do esquema de proteção ao qual este motor se enquadra. Elas são (Soares, 2009):

- Corrente nominal: corrente que promove a operação normal do motor. Esta pode ser corrigida pelo fator de serviço e pode funcionar com uma ligeira sobrecarga;
- Corrente de partida: valor eficaz da corrente responsável por fazer com que o motor parta. Seu valor está entre 5 a 10 vezes o valor da corrente nominal;
- Tempo de aceleração: tempo ao qual o motor sai da condição de repouso e atinge a condição normal de funcionamento. Durante esse tempo a corrente será superior à nominal;
- Tempo de rotor bloqueado: máximo período de tempo que o motor pode permanecer com o rotor travado sem violar os limites de temperatura recomendados para sua operação. Este pode ser à quente ou à frio, dependendo

do motor ter repetidas partidas ou não. Caso este valor seja ultrapassado, existem grandes chances do motor se danificar.

A figura 13 esboça as características nominais do motor de indução, a qual retrata desde a partida do motor até a entrada em regime permanente. Esta curva é considerada quando se deseja uma abordagem mais conservadora uma vez que a corrente de partida apresenta uma queda em seu valor conforme ocorre um avanço no tempo, portanto possui um valor menor que o apresentado no gráfico. Programas como o DigSILENT PowerFactory (DigSILENT, 2009) utilizam esta abordagem conservadora apresentada.

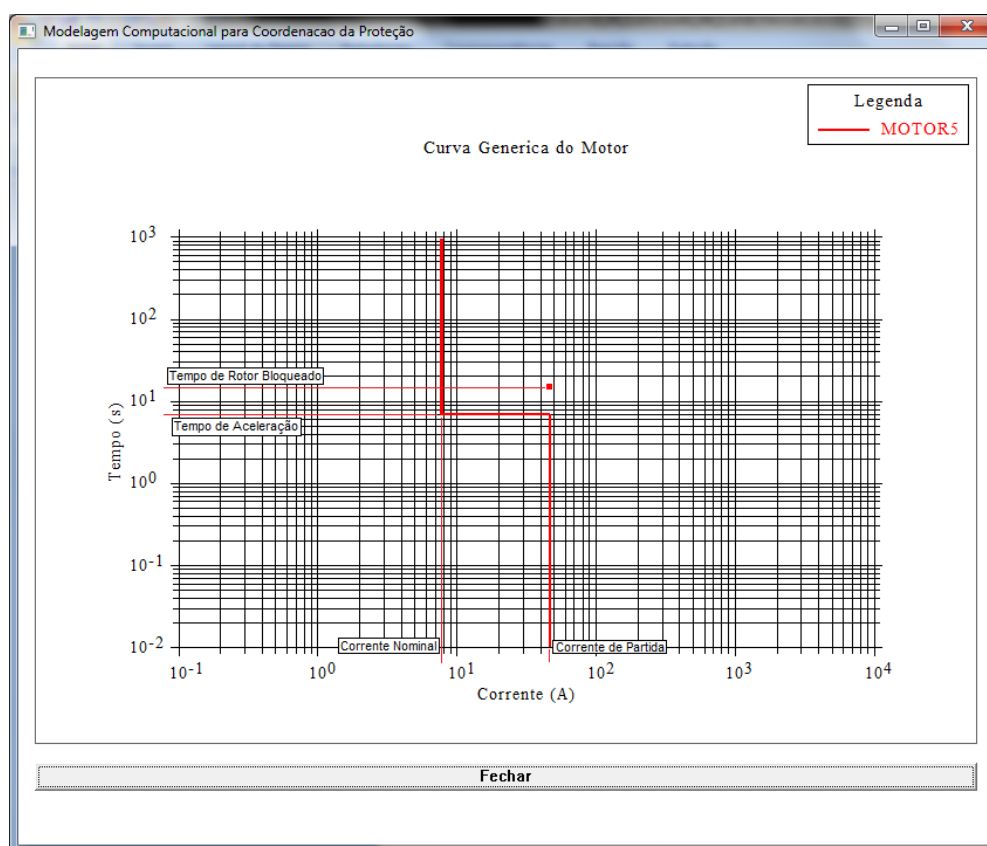


Figura 13: Curva de partida do motor.

O ajuste de corrente do dispositivo que protegerá o motor contra sobrecarga deve ser superior à corrente nominal do mesmo, devendo promover a proteção em um tempo inferior ao tempo de rotor bloqueado e superior ao tempo de aceleração.

Já a proteção do motor contra curto-circuito deve ser feita utilizando um dispositivo de atuação instantânea, onde seu ajuste deve ser superior ao pico da corrente de partida, devido à assimetria da corrente de partida.

### 3.2.3 Transformador de Dois Enrolamentos

A proteção contra sobrecorrente de transformadores, de modo geral, é feita instalando um dispositivo de proteção no lado do primário do mesmo, que pode ser um fusível ou disjuntor comandado por um relé. Porém, a filosofia de proteção da classe de tensão ao qual o transformador se encaixa, sua potência nominal e até a importância que este tem para o sistema em análise devem ser levados em conta (IEEE Std. 242, 2001). Novamente, é possível dividir a proteção deste elemento em duas frentes.

Para a proteção contra sobrecarga, utilizam-se normalmente relés com curva de tempo inverso no primário do transformador. Pode-se também adotar outro esquema utilizando disjuntores ou fusíveis, estes sempre associados com relés em ambos os lados do transformador.

Para a proteção contra curto-circuito, deve-se separar os dispositivos em dois grupos (IEEE Std. 242, 2001):

- Detectam a formação de gases no interior do transformador: ocorre em transformadores imersos em óleos isolantes, em que o material isolante pode ser decomposto devido a altas temperaturas resultante de altas correntes de curto-circuito, originando gases no interior do tanque do transformador. Como exemplo, tem-se o relé de Buchholz;
- Detectam sobrecorrente: utilizam-se fusíveis, disjuntores e relés de sobrecorrente para este tipo de falta.

Visando a operação do transformador em condições nominais, os ajustes devem ser feitos baseado nas características nominais do transformador, na intensidade e duração de sua corrente de energização, nos valores máximos das correntes de curto-circuito em ambos os lados e nos seus limites térmicos e mecânicos, para que a proteção atue quando alguma condição anormal ocorrer e não atue para situação de energização (IEEE Std. 242, 2001).

A representação gráfica dos limites térmicos e mecânicos suportados pelo transformador para que este não sofra danos em sua estrutura física se dá pelas suas características de suportabilidade. A seguir serão apresentados alguns dados que servirão para melhor entender como deve ser feita a representação das características de suportabilidade dos transformadores (SOARES, 2009).

- Corrente nominal: corrente para condições de operação;



- Corrente de magnetização: corrente de energização do transformador, que circula apenas no enrolamento primário;
- Curva ANSI: representa o limite térmico do transformador, dependente do tipo de isolamento feita.
- Curva ANSI (58%): utilizada apenas na análise de transformadores do tipo delta-estrela com neutro solidamente aterrado. Um curto fase-terra no secundário neste tipo de transformador causa a circulação de corrente igual a 58% da corrente de defeito no secundário, referida ao primário (IEEE Std 242, 2001);
- Limite mecânico: está relacionado com a intensidade e duração da corrente de defeito e com a frequência que as faltas ocorrem, devido à natureza cumulativa de alguns efeitos mecânicos. A sua representação irá variar, conforme a potência nominal do transformador, podendo ser agrupado nas 4 categorias mostradas na Tabela 4 (IEEE Std. C57.12.00, 2006):

Tabela 4: Categorias de potência nominal para transformadores.

<b>Categoria</b>	<b>Monofásico (kVA)</b>	<b>Trifásico (kVA)</b>
<b>1</b>	5 a 500	15 a 500
<b>2</b>	501 a 1667	501 a 5000
<b>3</b>	1668 a 10000	5001 a 30000
<b>4</b>	Acima de 10000	Acima de 30000

Para a categoria 1, a curva ANSI é suficiente para representar a curva de suportabilidade do transformador, juntamente com o limite mecânico. Para categoria 2, se forem esperadas mais de 10 faltas no transformador durante sua vida útil, considera-se o limite mecânico, caso contrário, fazer igual a categoria 1. Para categoria 3, representa-se a curva do limite mecânico caso ocorram mais que 5 faltas em toda vida útil do transformador. Já para a categoria 4, convencionou-se sempre representar a curva do limite mecânico, devido à elevada potência dos transformadores dessa classe (IEEE Std. C57.109, 1993).

Na figura 14, tem-se um exemplo das curvas que representam as características de suportabilidade do transformador e os dados suficientes para que seja possível fazer a definição dos ajustes para a proteção contra sobrecorrente. O transformador em questão pertence à classe de tensão 2 e tem conexão delta-estrela. Os procedimentos necessários para a obtenção dessas curvas são apresentados na seção 4.2.3.

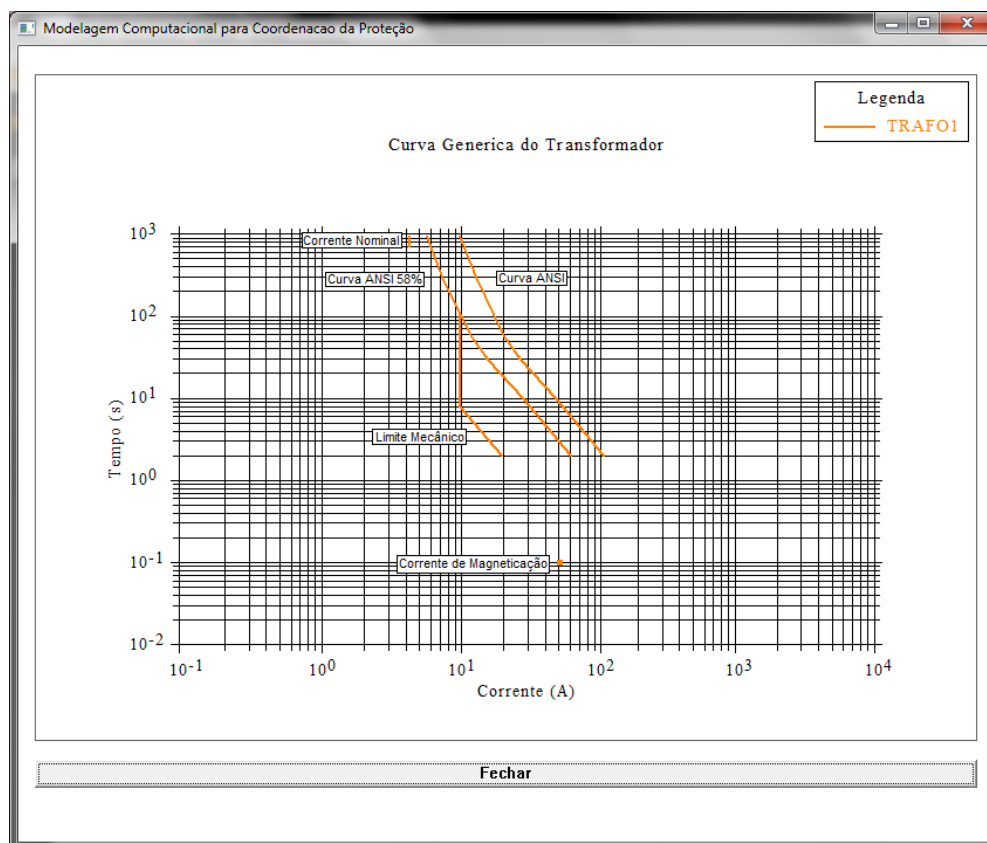


Figura 14: Curva representando os limites do transformador.

Neste capítulo foram levantadas todas as características relevantes a fim de obter as curvas de atuação dos dispositivos e as curvas que representam as características nominais dos equipamentos do sistema. Os parâmetros que foram ressaltados neste estudo são os mínimos requeridos para que seja possível traçar as curvas. A seguir, apresenta-se a metodologia de como foram obtidas as curvas.

## 4 Metodologia Adotada para Levantamento das Curvas

Neste capítulo será apresentada a metodologia desenvolvida para o levantamento das curvas, bem como seus resultados. Primeiramente serão exibidos os dados de entradas exigidos para que seja possível expressar por meio de gráficos as características relevantes dos elementos, focando na análise da proteção contra sobrecorrente. Em seguida será demonstrado o método utilizado pelo trabalho para o levantamento destas curvas. Será explicada em detalhes a forma como cada uma das curvas de suportabilidade e de atuação foram obtidas, com a exposição das mesmas de forma a auxiliar a explicação.

Os dados de entrada serão adquiridos através da interface criada para o programa na qual se permite adicionar novos dispositivos de proteção e novos equipamentos ao catálogo já existente. Este catálogo servirá como banco de dados, onde estarão disponíveis informações suficientes para que seja possível realizar o levantamento das curvas.

Os dados de entrada, de equipamentos e de dispositivos de proteção, estão divididos no programa em dois tipos de entrada:

- Entrada de catálogo: são os dados que serão armazenados no banco de dados do programa. Estes são divididos de acordo com o tipo do elemento e ao ser salvo, cada item tem um nome específico fornecido pelo usuário. As classes de elementos que podem ser salvos são: cabos, motores, transformadores, fusíveis, disjuntores e relés. Estes são os dados mínimos para que seja possível traçar a curva que caracteriza o elemento;
- Entrada de projeto: são os dados que serão utilizados apenas para projetos específicos, em análise pelo usuário. Neste caso, poderão ser inseridos dispositivos novos, ou então carregados do banco de dados e completadas as informações adicionais, tais como a barra em que o equipamento se encontra instalado, dentre outros. Para esta entrada criou-se o ID (Identificação) com o objetivo de evitar elementos repetidos na base de dados. Portanto, caso o projeto possua mais de um elemento com as mesmas características, basta alterar o ID do mesmo.

A apresentação dos dados será separada conforme proposto acima.

Todas as curvas a serem exibidas nas subseções seguintes foram traçadas utilizando a ferramenta desenvolvida e serão retratadas dentro do intervalo de tempo de 0,01 até 1000s. Este intervalo foi escolhido por ser o que melhor retrata o comportamento dos elementos do sistema.

## 4.1 Dispositivos de Proteção

Com relação aos dispositivos de proteção, alguns dados são comuns a todos, porém para outros foi necessário adotar algumas convenções. Os dados comuns para a entrada de projetos são os seguintes:

- Índice numérico para identificação do dispositivo (ID);
- Índice numérico que define a localização dos dispositivos:
  - 1 para dispositivo instalado em motores;
  - 2 para dispositivos instalados no primário de transformadores;
  - 3 para dispositivos instalados no secundário de transformadores;
  - 4 para dispositivos instalados no início de cabos;
  - 5 para dispositivos instalados no final de cabos;
  - 6 para dispositivo de proteção de subestação.
- Índice numérico do equipamento protegido.

Para a entrada de catálogo, deve-se nomear todos os dispositivos.

### 4.1.1 Fusível

Além dos dados de entrada de projeto comuns, o fusível deverá ter as seguintes especificações:

- Corrente nominal em Ampères;
- Pontos de corrente *versus* tempo fornecidos pelo fabricante do fusível.

Para a entrada de catálogo dos fusíveis será necessário:

- Corrente nominal em Ampères;
- Pontos (corrente *versus* tempo).

Na figura 15, tem-se a figura da tela da entrada de catálogo do fusível.

Corrente[A]	Tempo[s]

Figura 15: Entrada de catálogo do fusível.

Conforme apresentado no capítulo anterior, as curvas de atuação dos fusíveis são simplesmente representadas por pontos de corrente x tempo, adquiridos por análise dos gráficos nos catálogos do fabricante. Estas curvas não são padronizadas, portanto não apresentam equações que possam representá-las. Como ideia inicial de desenvolvimento, optou-se por unir estes pontos por métodos de interpolação ao qual o resultado aproximasse ao máximo da curva real. Vários métodos foram utilizados, entre eles o polinômio hermitiano, funções spline e spline cúbica (Franco, 2006; Ruggiero e Lopes, 1997). Porém estes não obtiveram êxito. Todos os métodos obtiveram resultados semelhantes, invertendo a concavidade da curva conforme aumentava o grau do polinômio. Porém não apresentavam suavizações nos pontos fornecidos. Uma vez que estas não traduziam o comportamento da curva real, optou-se por representar a curva pela simples interpolação linear dos pontos. Esta escolha pouco interfere na coordenação dos dispositivos, uma vez que o fusível é um elemento que já apresenta uma imprecisão de suas medidas. Esta imprecisão, por conferência em vários catálogos, será considerada neste trabalho como sendo um limite de  $\pm 10\%$  com relação à curva média, obtida através dos pontos informados (SIEMENS, 2012).

A título de exemplo, na figura 16 é apresentada uma curva teste utilizando a função *spline cúbica*. Nota-se que entre os pontos não foi possível obter a suavização satisfatória.

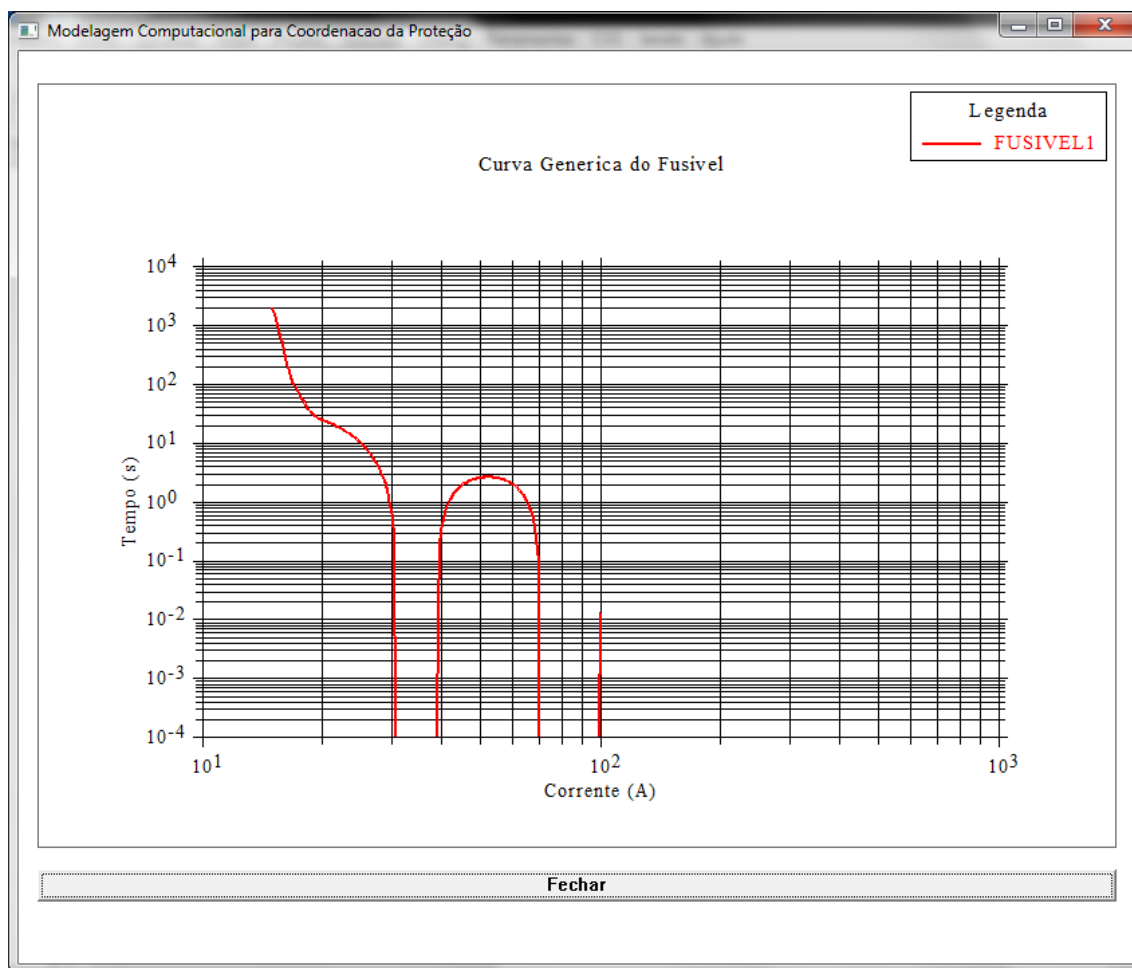


Figura 16: Curva do fusivel, utilizando método de interpolação por *spline cúbica*.

O resultado final para as curvas de atuação dos fusíveis pode ser visto na figura 17, ressaltando os pontos que foram utilizados para traçá-la.

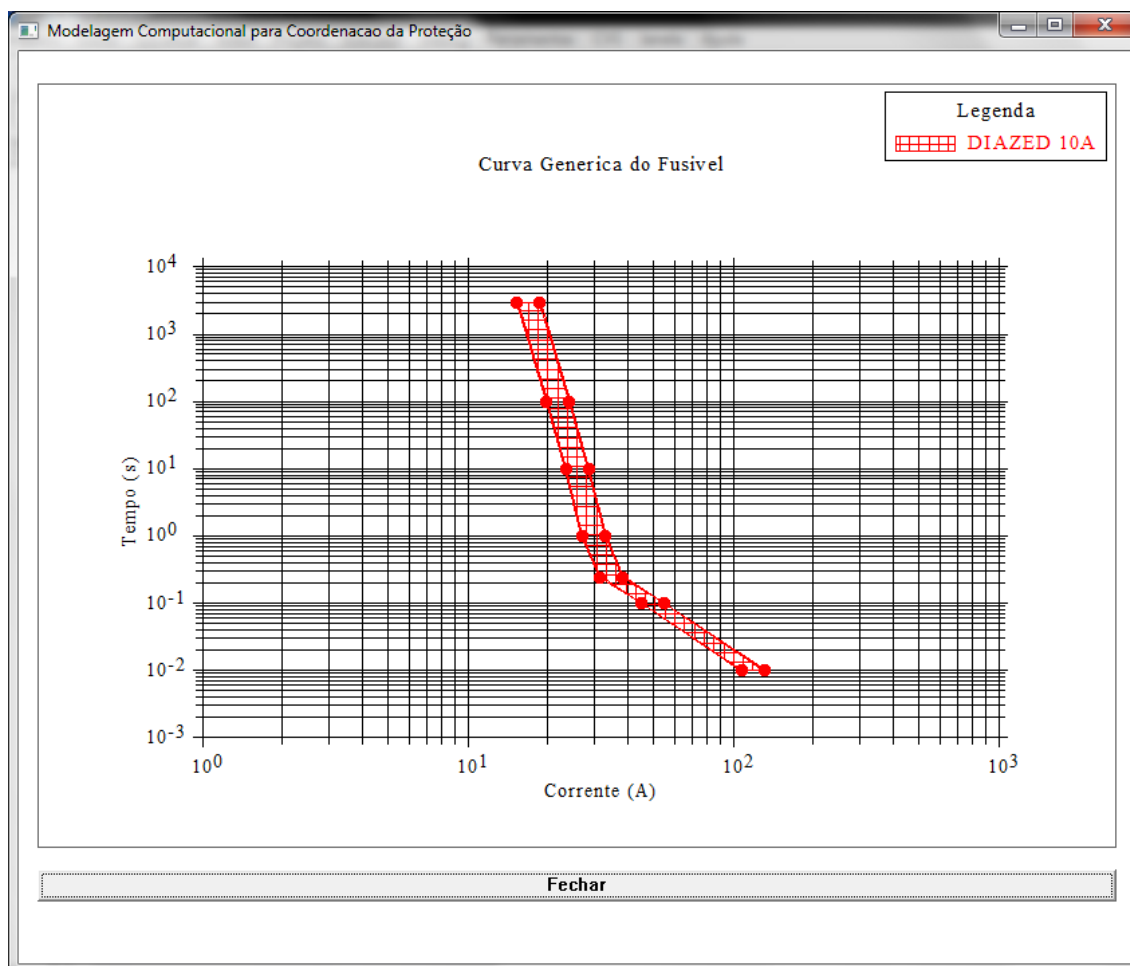


Figura 17: Curva do fusível, realçando os pontos usados.

Pode-se comparar a curva obtida, na figura 17, com a curva real do fabricante, na figura 18 (SIEMENS, 2012). O fusível em questão é um DIAZED 10A. A aproximação proposta é extremamente próxima do comportamento real de atuação do dispositivo, validando desta forma a metodologia desenvolvida.

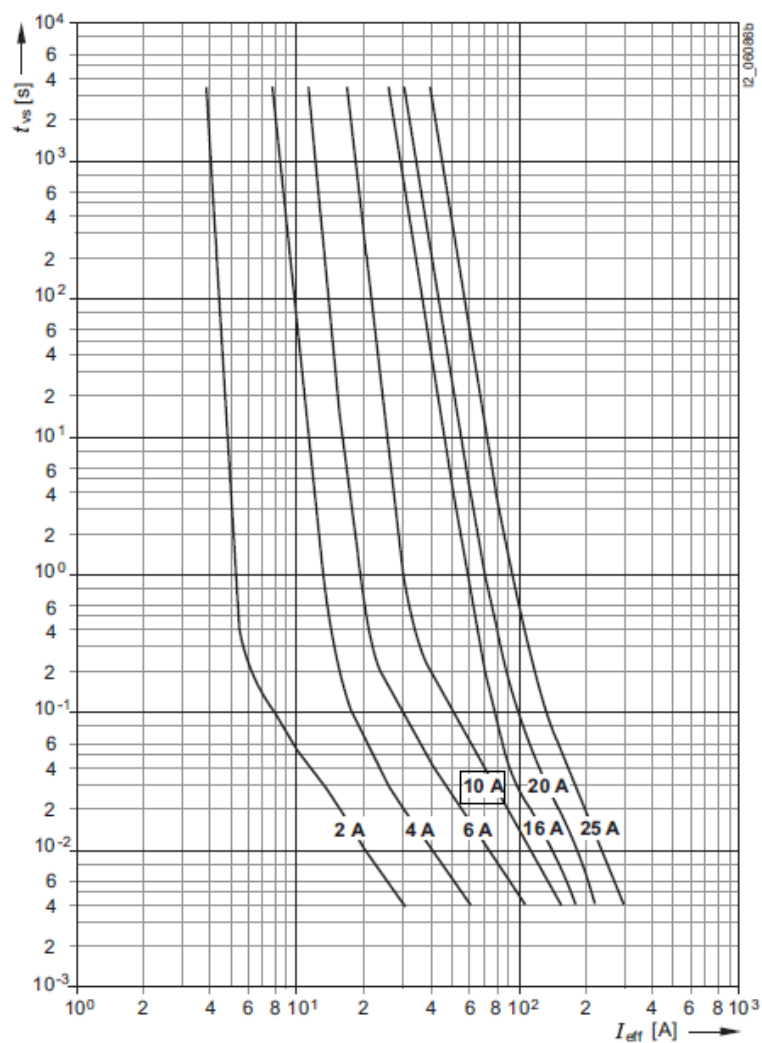


Figura 18: Curva do fusível DIAZED, retirada do catálogo.

#### 4.1.2 Disjuntor de Baixa Tensão

As entradas de projeto do disjuntor são as seguintes:

- Multiplicador de tempo longo (MTL);
- Atraso de tempo longo (ATL);
- Multiplicador de tempo curto (MTC);
- Atraso de tempo curto (ATC);
- Multiplicador para ajuste instantâneo (MI);
- Multiplicador de terra (MT);
- Atraso de terra (AT).

Já as entradas de catálogo, que deverão ser armazenadas em bancos de dados, são:



- Corrente nominal em Ampères ( $I_n$ );
- Faixas de ajuste do disjuntor (Limite Inferior [LI] / Passo / Limite Superior [LS]):
  - Multiplicador de tempo longo (MTL);
  - Atraso de tempo longo (ATL);
  - Multiplicador de tempo curto (MTC);
  - Atraso de tempo curto (ATC);
  - Multiplicador para ajuste instantâneo (MI);
  - Multiplicador de terra (MT);
  - Atraso de terra (AT).

Na figura 19, tem-se a figura da tela da entrada de catálogo do disjuntor, com as mesmas siglas adotadas acima.

	LI	Passo	LS
MTL[ $\times I_n$ ]			
ATL[s]			
MTC[ $\times MTL$ ]			
ATC[s]			
MInst[ $\times I_n$ ]			
MT[ $\times I_n$ ]			
AT[s]			

Figura 19: Entrada de catálogo do disjuntor.

Para efeito de explicação, na figura 20, encontram-se reforçados os pontos que foram utilizados para traçar a curva de atuação do dispositivo.

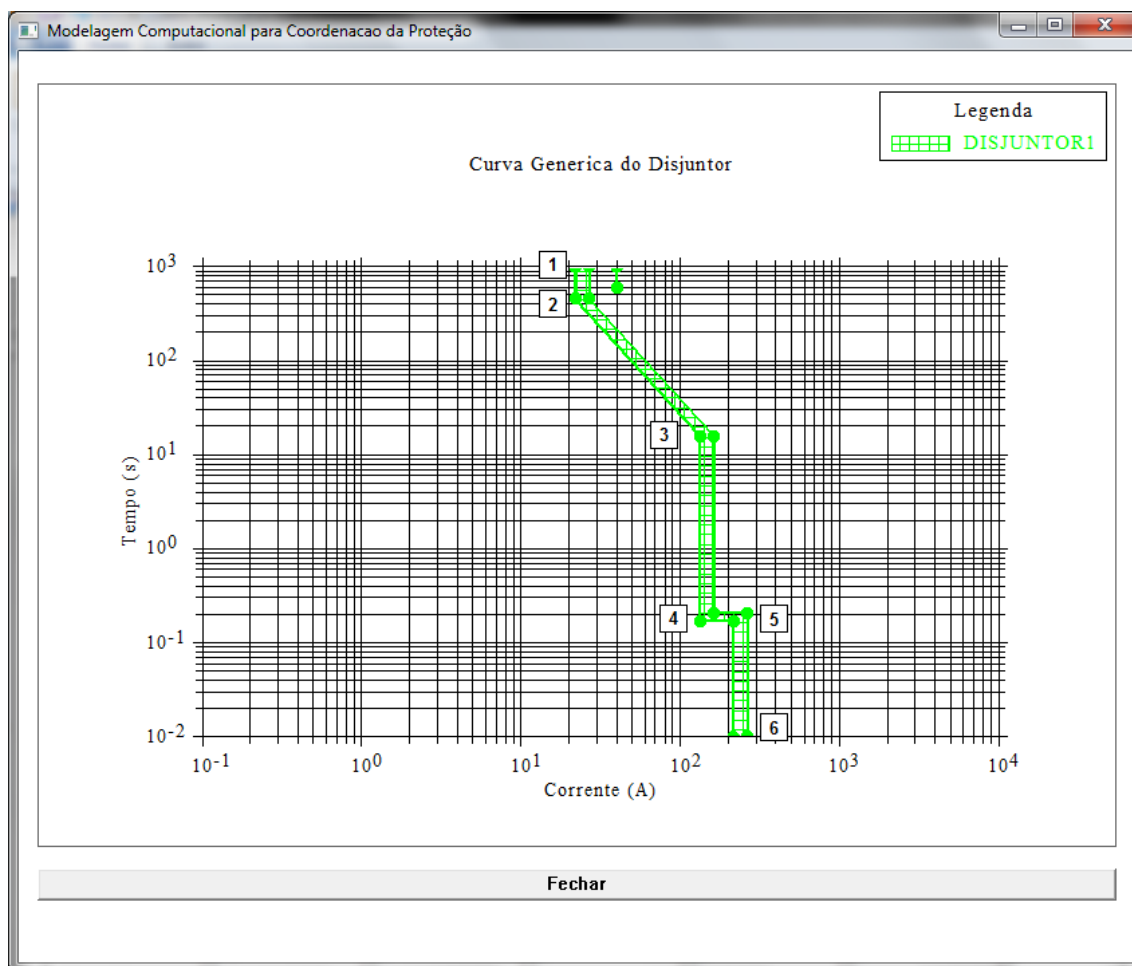


Figura 20: Curva de atuação do disjuntor, realçando os pontos usados.

O ponto 1 é a combinação do tempo máximo (pré-fixado como 1000 s) com a corrente de tempo longo.

A corrente de tempo longo é obtida através da seguinte fórmula:

$$I_L = MTL \times I_N \quad (4)$$

Sendo:

$I_L$ : corrente de tempo longo, em Ampére;

MTL: multiplicador de tempo longo;

$I_N$ : corrente nominal do disjuntor, em Ampére.

O ponto 2 é o resultado da interpolação logarítmica de dois pontos. Um dos pontos é o de tempo máximo com ajuste de tempo longo mínimo (menor valor possível para o multiplicador de tempo longo) e o outro ponto é o de atraso de tempo longo, que é definido para uma corrente seis vezes superior a corrente nominal do disjuntor (IEEE Std 242, 2001). Ao fixar a corrente como a de tempo longo, obtém-se o tempo.

O terceiro ponto é obtido de forma semelhante ao seu antecessor, porém, este tem como referência a corrente de tempo curto. Através de interpolação logarítmica encontra-se qual deve ser o tempo deste ponto.

É obtida a corrente de tempo curto da seguinte maneira:

$$I_C = MTC \times I_L \quad (5)$$

Sendo:

$I_C$ : corrente de tempo curto, em Ampére;

MTC: multiplicador de tempo curto.

O quarto ponto é obtido pela corrente de tempo curto e o atraso de tempo curto. O atraso de tempo curto é normalmente ajustável em até 0,4 segundo (IEEE Std 242, 2001).

O quinto ponto é o resultado de uma corrente instantânea atuando sobre o atraso de tempo curto.

$$I_{inst} = M_{Inst} \times I_N \quad (6)$$

Sendo:

$I_{inst}$ : corrente de tempo instantâneo, em Ampére;

$M_{Inst}$ : multiplicador de tempo instantâneo.

E por fim, o sexto ponto é a corrente instantânea para um tempo de 0,01s.

Para a proteção de terra, são definidos a corrente e o atraso de terra. A corrente de terra é obtida através da seguinte fórmula:

$$I_{terra} = MT \times I_N \quad (7)$$

Sendo:

$I_{terra}$ : corrente da unidade de proteção de terra, em Ampére;

MT: multiplicador da corrente da unidade de proteção de terra.

A partir deste ponto é traçado o ajuste para a proteção de terra, conforme mostrado na figura 21.

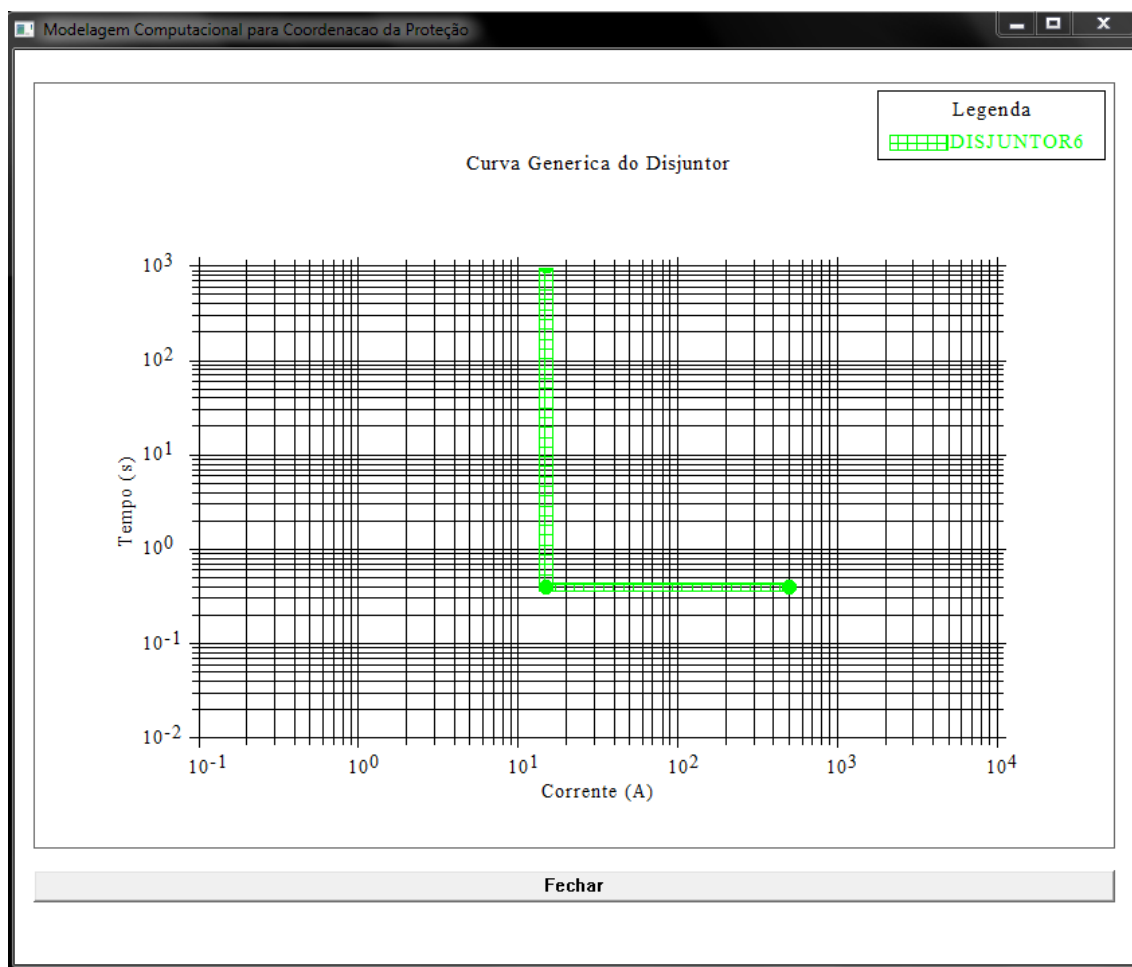


Figura 21: Curva de atuação do disjuntor para proteção fase-terra, destacando-se os pontos.

#### 4.1.3 Relé Digital de Sobrecorrente

É necessário fornecer os seguintes parâmetros para a entrada de projeto:

- Ajuste do multiplicador de tempo do relé (TDS);
- Valores da corrente de ajuste da unidade temporizada do relé (CAUT);
- Valores da corrente de ajuste da unidade instantânea do relé (CAUI);
- Valores da corrente e tempo de ajuste da unidade de terra;
- Constantes  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  dos relés.

Para a entrada de catálogo são necessários:

- Faixa de ajustes do relé (Limite Inferior [LI] / passo / Limite Superior [LS]):

- Multiplicador de tempo do relé (TDS) para os padrões ANSI e IEC;
- Corrente da unidade temporizada do relé (CAUT);
- Corrente da unidade instantânea do relé (CAUI);
- Valores da corrente nominal (em Ampères) no primário de fase (PF), no primário de terra (PT) e no secundário (Sec) do TC.

Na figura 22, observa-se a tela de entrada de catálogo do relé, com as siglas conforme acima.

	LI/PF	Passo/PT	LS/Sec
TDS[ANSI]			
TDS[IEC]			
CAUT[A]			
CAUI[A]			
TC[A]			

Figura 22: Entrada de catálogo do relé.

Por se tratar de uma curva padronizada, com o comportamento regido pela equação (1), há maior facilidade em construir as curvas de atuação dos relés digitais em comparação com as curvas dos fusíveis e dos disjuntores de baixa tensão. Para isso, deve ser feita a escolha do padrão (ANSI ou IEC) e da declividade da curva, a fim de definir os valores das constantes  $K_N$ .

As escolhas do padrão e declividade da curva são feitas através dos algoritmos de coordenação, assim como a escolha do multiplicador do ajuste de tempo do relé. Estes algoritmos de coordenação estão presentes em Negrão (2012), e sua proposta é a definição automática dos ajustes dos dispositivos de proteção.

Variando o múltiplo da corrente de ajuste (M), de seu limite mínimo até o máximo, são obtidos os tempos utilizando equação 1 e então a curva de atuação é traçada, conforme a figura 23. Já para a proteção de terra, a sua curva é traçada de maneira análoga a do disjuntor. Com os pontos de corrente e tempo de terra, traça-se a curva, conforme foi mostrado na figura 24.

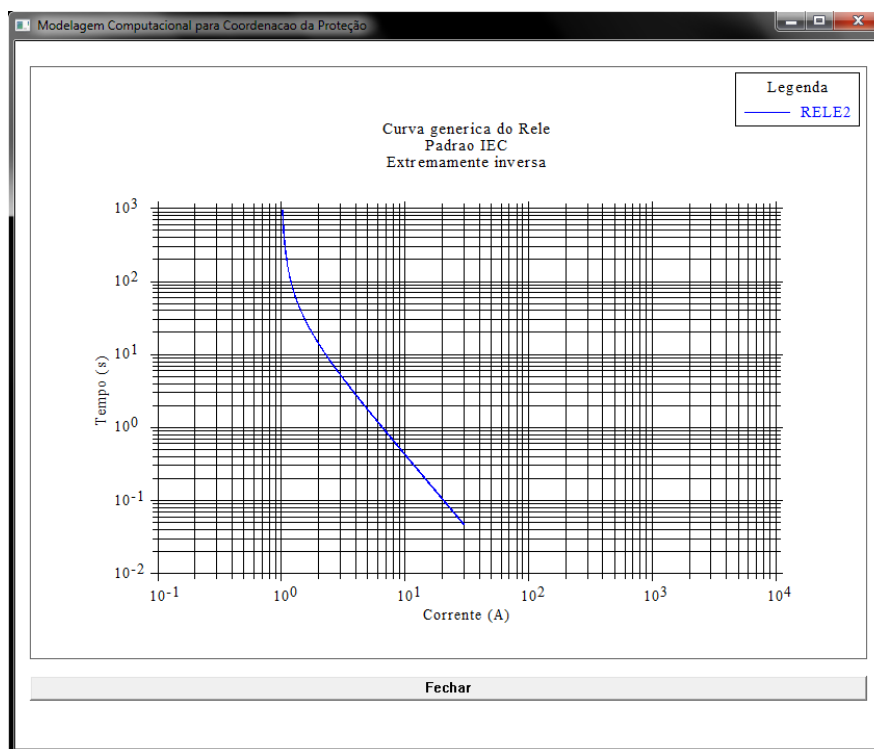


Figura 23: Curva de atuação do relé.

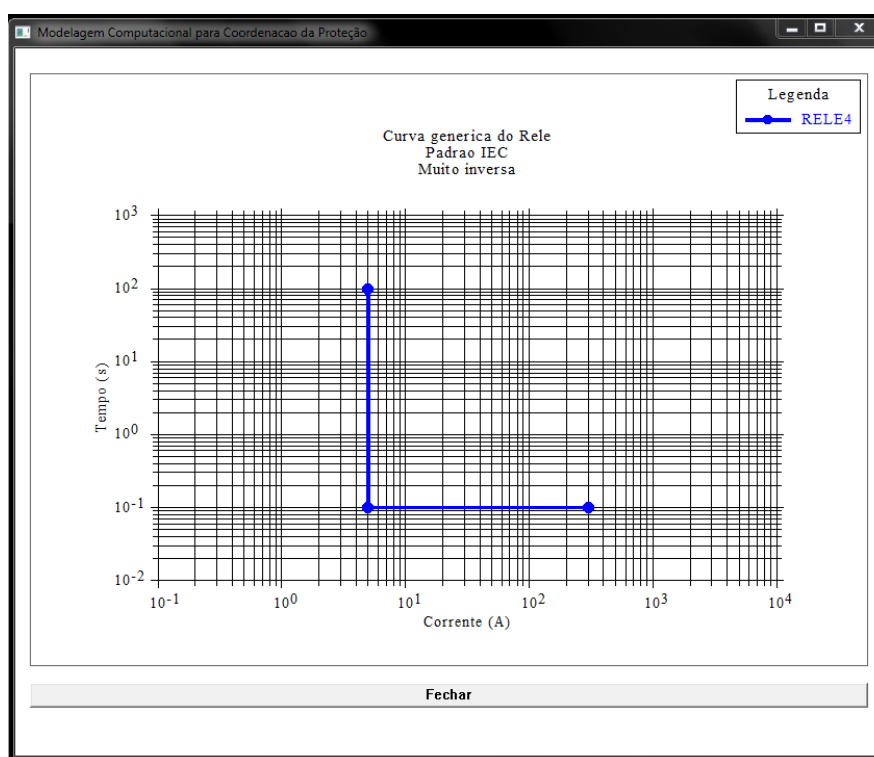


Figura 24: Curva de atuação do relé a tempo definido, com marcação dos pontos usados.

## 4.2 Elementos Protegidos

A seguir serão apresentados os dados mínimos necessários para realizar a coordenação e seletividade para os equipamentos a serem protegidos, de acordo com IEEE Std. 242 (2001).

### 4.2.1 Cabos

Os dados que devem ser fornecidos para a entrada de catálogo, a fim de obter a curva de limite dos cabos são:

- Índice numérico para identificação do tipo do cabo: 1 para cobre e 2 para alumínio;
- Número de condutores no cabo;
- Área da seção transversal do cabo em  $\text{mm}^2$ ;
- Temperaturas de funcionamento, normal e máxima permitida do cabo em graus Celsius;
- Ampacidade em Ampère;
- Resistência em  $\Omega/\text{km}$ ;
- Reatância em  $\Omega/\text{km}$ .

Acrescentando os dados abaixo, forma-se a entrada de projeto:

- Índice numérico para identificação do cabo;
- Número do barramento conectado ao início do cabo;
- Número do barramento conectado ao final do cabo;
- Tensão nominal sobre o cabo em kV;
- Comprimento do cabo em km.

Na figura 25, observa-se a entrada de catálogo do cabo, com as informações e unidades necessárias.

**Dados Nominais**

Nome:  Ampacidade por Condutor (A):

Tipo:  Número de Condutores (por fase):

Secao (mm2):  Temperatura Máxima em Condições Normais (°C):

Reatância (ohm/km):  Temperatura Máxima em Curto Circuito (°C):

Resistência (ohm/km):

\* Tipo: [1] - Cobre

[2] - Aluminio

Figura 25: Entrada de catálogo do cabo.

O cabo, assim como o relé, apresenta uma curva padronizada regida pelas equações (2) e (3), conforme o tipo do material constituinte do condutor (Prysmian Cables and Systems, 2008). Ambas as equações apresentam como variáveis a temperatura máxima permitida em condições normais, temperatura máxima permitida em condições de curto circuito, a seção transversal do cabo e as incógnitas tempo e corrente de curto circuito.

Conforme analisado na Tabela 3, a temperatura máxima permitida em condições normais, assim como as equações, depende do tipo do material do condutor. Já a temperatura máxima permitido em curto circuito depende do tipo de conexão, prensada ou soldada. Para a seção transversal, esta será determinada pela área transversal de um único condutor, multiplicado pela quantidade de condutores que compõe o cabo. Portanto, sobram as duas incógnitas, tempo e corrente. Definindo os instantes de tempo obtêm-se as correntes pela equação e então a curva do cabo. Os tempos escolhidos foram 10 e 0,01 s, conforme especificado em IEEE Std. 242 (2001). A figura 26 mostra curva de suportabilidade de um cabo. Observa-se que esta se aproxima de uma reta logarítmica.



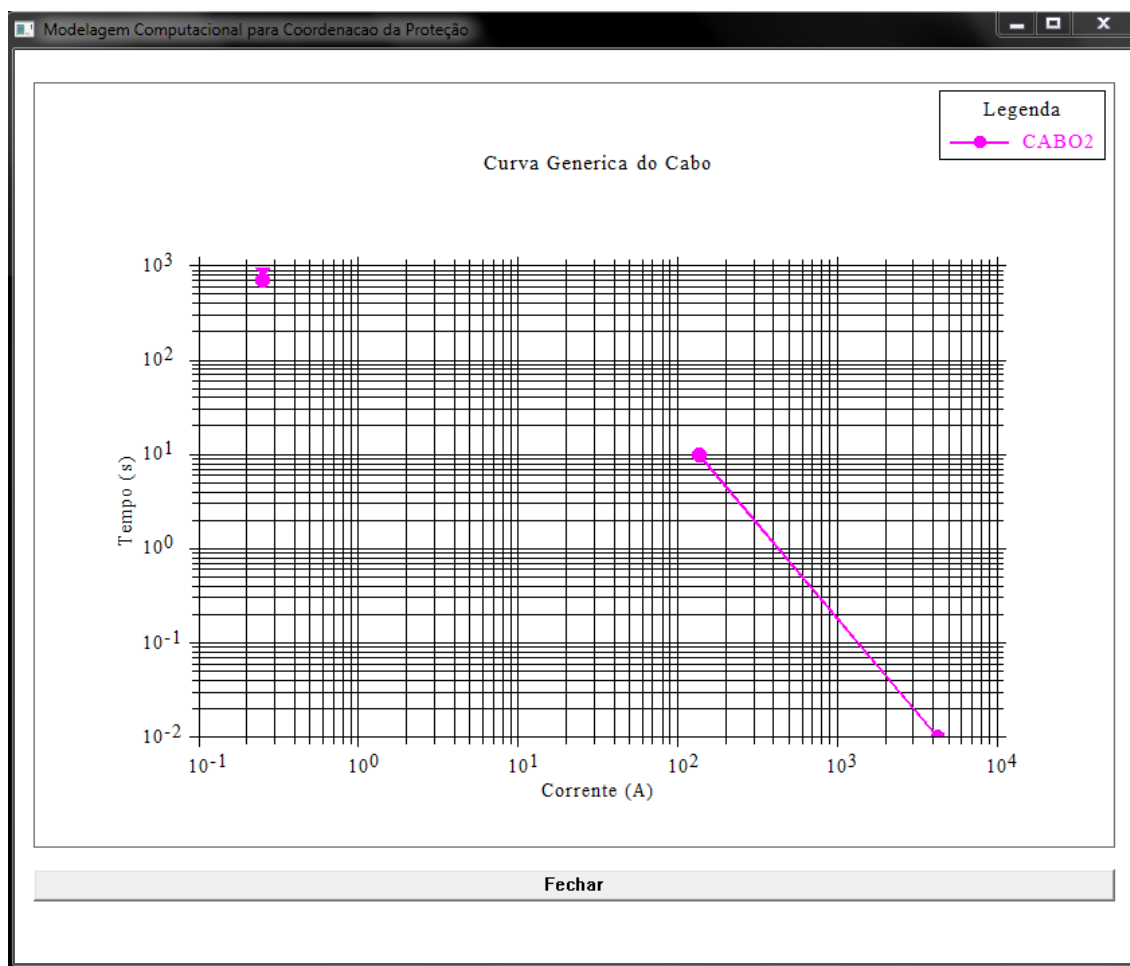


Figura 26: Curva de suportabilidade do cabo, ressaltando os pontos usados.

#### 4.2.2 Motor de Indução

Os dados necessários para a entrada de catálogo dos motores de indução são:

- Um nome para identificação;
- Potência nominal do motor em kVA;
- Tensão nominal do motor em kV;
- Fator de serviço do motor;
- Fator de potência do motor;
- Múltiplo da corrente nominal para cálculo da corrente de partida;
- Tempo de aceleração do motor, em segundos;
- Margem de segurança sobre o tempo de aceleração, em segundos;

- Tempo de rotor bloqueado a quente;
- Tempo de rotor bloqueado a frio.

Acrescidos aos dados acima, formando a entrada de projeto tem-se:

- Índice numérico para identificação do motor;
- Número do barramento ao qual o motor está conectado;
- Potência nominal do motor em kVA.

Na figura 27 ilustra-se a janela da entrada de catálogo do motor, com as respectivas unidades.

**Dados Nominais**

<b>Nome:</b>	<input type="text"/>	<b>Tensão Nominal (kV):</b>	<input type="text"/>
<b>Fator <math>I_p/I_n</math>:</b>	<input type="text"/>	<b>Potência Nominal (kVA):</b>	<input type="text"/>
<b>Fator de Serviço:</b>	<input type="text"/>	<b>Margem de Segurança (s):</b>	<input type="text"/>
<b>Fator de Potência:</b>	<input type="text"/>	<b>Tempo de Aceleração (s):</b>	<input type="text"/>
<b>Salvar</b>		<b>Tempo de Rotor Bloqueador a Frio (s):</b>	<input type="text"/>
<b>Fechar</b>		<b>Tempo de Rotor Bloqueador a Quente (s):</b>	<input type="text"/>

Figura 27: Entrada de catálogo do motor.

Para o caso do motor, não há uma curva que determina sua suportabilidade contra sobrecorrente, mas sim uma curva de operação que deve ser respeitada pelos dispositivos de proteção. Esta curva representa a partida do motor até o mesmo encontrar-se em regime permanente. Durante a partida do motor, sua corrente pode chegar a até dez vezes a corrente nominal. Portanto, a proteção deve ser suficientemente segura para entender esta ocorrência como uma situação de não falta. Para a curva do motor, devem-se destacar três pontos principais:

- Corrente de partida x Tempo de aceleração;

- Corrente nominal x Tempo de aceleração;
- Corrente de partida x Tempo de rotor bloqueado.

É a partir destas três informações que é traçada sua curva característica conforme a figura 28, na qual são destacados estes pontos.

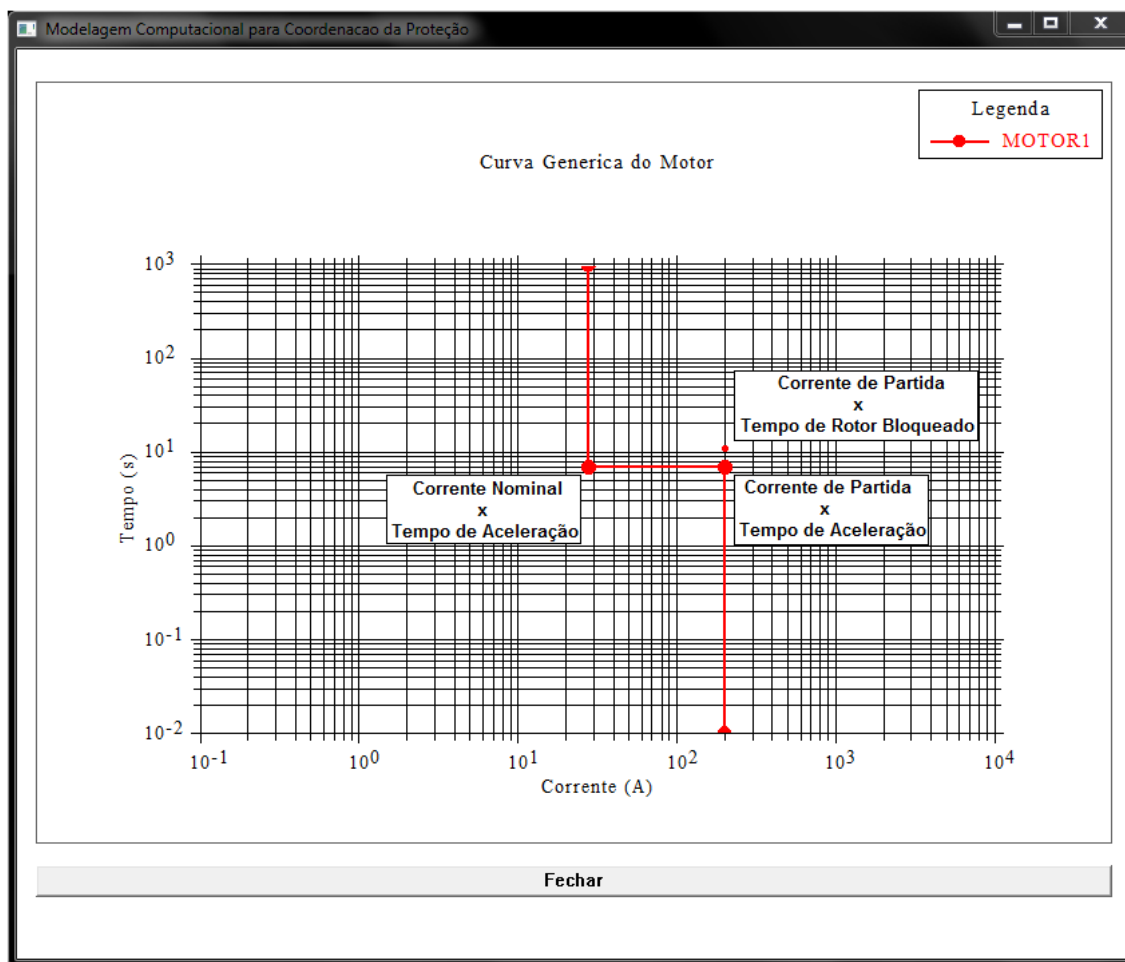


Figura 28: Curva de operação do motor, seguindo abordagem conservadora.

O tempo de rotor bloqueado da figura 28 é traçado para um valor de corrente de partida com o tempo indicado na especificação técnica.

#### 4.2.3 Transformador de Dois Enrolamentos

Os dados de entrada de catálogo para os transformadores são apresentados a seguir:

- Tipo de isolamento do transformador: 1 para líquido imerso e 2 para seco;

- Tipo de enrolamento no primário: 1 para delta, 2 para estrela, 3 para estrela com neutro aterrado por impedância e 4 para estrela com neutro solidamente aterrado;
- Tipo de enrolamento no secundário: mesma classificação do primário;
- Potência nominal do transformador em MVA;
- Impedância nominal do transformador em “por unidade” (p.u.);
- Multiplicador para obter a corrente de magnetização.

Para a entrada de projeto, os dados que devem ser adicionados aos acima são:

- Índice numérico para identificação do transformador;
- Número do barramento conectado ao lado do primário;
- Número do barramento conectado ao lado do secundário;
- Tensão nominal no primário em kV;
- Tensão nominal no secundário em kV;
- Frequência de ocorrência de faltas: 0 para faltas casuais e 1 para faltas frequentes.

Na figura 29, tem-se a entrada de catálogo do transformador, com as informações e unidades necessárias.

Modelagem Computacional para Coordenação da Proteção

**Dados Nominais**

Nome:  Tipo de Enrolamento do Primário:

Tipo de Isolacao:  Tipo de Enrolamento do Secundário:

Impedância (p.u.):  Multiplicador da Corrente de Magnetizacao:

Potência Nominal do Motor (MVA):

\* Tipo de Isolação: Tipo de Enrolamento:

(1) - Líquido Imerso (1) - Delta (3) - Y Aterrado por Impedância

(2) - Seco (2) - Estrela [Y] (4) - Y Solidamente Aterrado

Salvar

Fechar

Figura 29: Entrada de catálogo do transformador.

A abordagem escolhida para representação dos limites funcionais do transformador é a mesma adotada pelo IEEE Std.242 (2001).

As três principais características desta representação são:

- Limite térmico: representado pelas curvas ANSI e ANSI 58%;
- Limite mecânico: representados para transformadores com faltas frequentes;
- E a corrente de magnetização.

A corrente de magnetização é esboçada apenas por um ponto no gráfico, definido para um tempo de 0,1s. Sua intensidade, em valor eficaz, varia de 8 a 12 vezes a corrente nominal e sua duração é de até 0,1 segundo (IEEE Std. 242, 2001). A corrente é obtida multiplicando a corrente nominal por um múltiplo da corrente de magnetização.

A curva que representa o limite térmico é traçada conforme a Tabela 5 (IEEE Std C57.109, 1993), na qual são mostrados os multiplicadores da corrente nominal e os tempos correspondentes para cada ponto da curva. Para a curva ANSI 58%, basta multiplicar a corrente nominal por 0,58. A Tabela 5 depende do tipo de isolamento do transformador .

Tabela 5: Dados para representação do limite térmico do transformador.

Isolação para líquido imerso		Isolação a seco	
Múltiplo da corrente nominal	Tempo (s)	Múltiplo da corrente nominal	Tempo (s)
25,00	2	25,00	2
11,30	10	11,20	10
6,30	30	3,50	100
4,75	60		
3,00	300		
2,00	1800		

Por fim, o limite mecânico é obtido de formas diferentes, conforme a categoria que ele pertence, indicada na Tabela 4. Na categoria 2, o limite mecânico é obtido para correntes que variam de 70 a 100% da máxima corrente de defeito. Para categoria 3 e 4 o limite mecânico é obtido para correntes acima de 50% da máxima corrente de defeito. Na Tabela 6 mostram-se os pontos para traçar o limite mecânico, conforme recomendado em IEEE Std. C57.109 (1993). Nela,  $P_{\min}$  representa a porcentagem mínima (70% na categoria 2 e 50% na categoria 3 e 4),  $P_{\max}$  representa a porcentagem máxima (100% em todos os casos),

Z representa a impedância percentual do transformador e k é definido pelo produto  $I_{cc_{max}} \times t$ , sendo  $I_{cc_{max}}$  a corrente de defeito de curto-circuito e  $t = 2$  segundos.

Tabela 6: Dados para representação do limite mecânico do transformador.

Múltiplo da corrente nominal	Tempo (s)
$\frac{P_{min}}{Z}$	$k \times \left(\frac{Z}{P_{min}}\right)^2$
$\frac{P_{min}}{Z}$	$2 \times \left(\frac{P_{max}}{P_{min}}\right)^2$
$\frac{P_{max}}{Z}$	2

A figura 30 mostra um exemplo dos pontos principais, que encontram-se destacados, utilizados para traçar cada uma das características da suportabilidade do transformador.

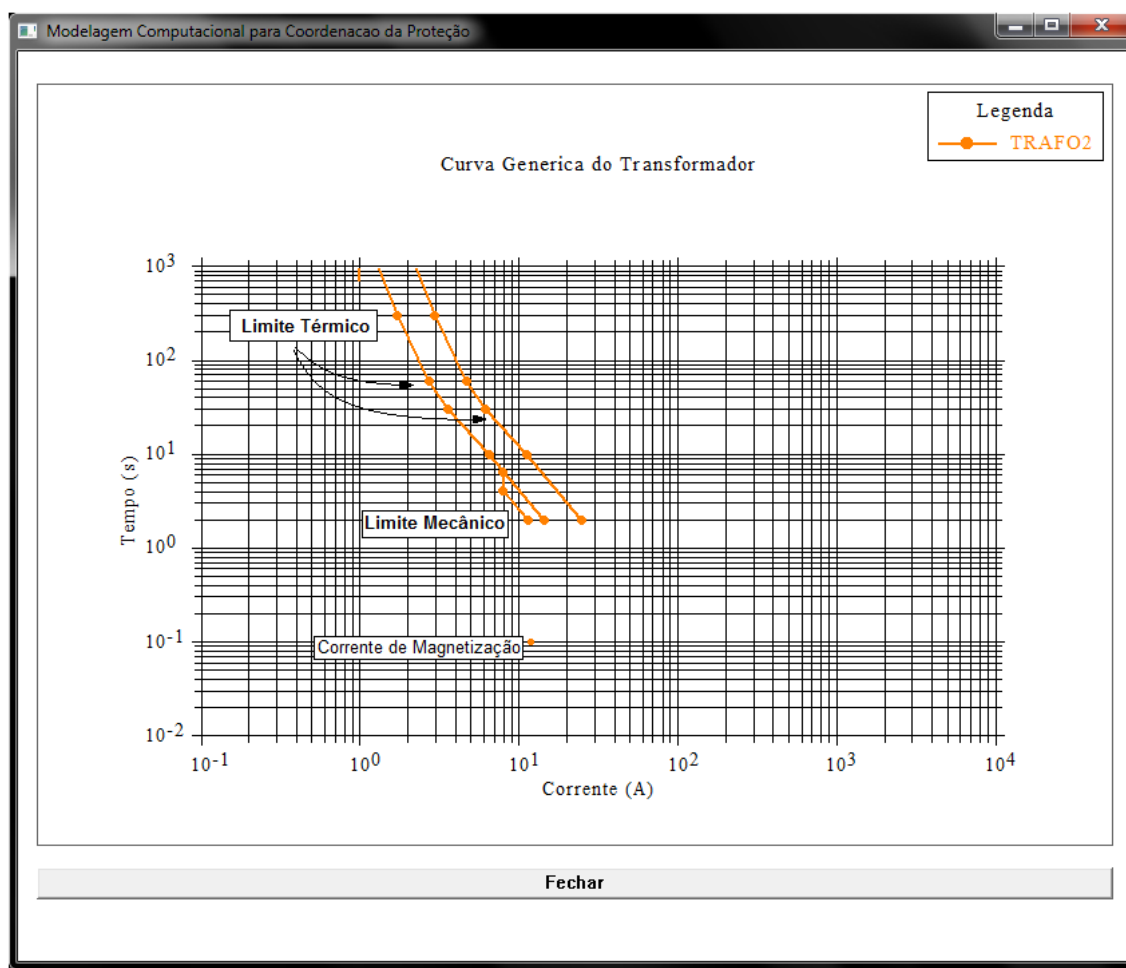


Figura 30: Curva de limite do transformador, marcando pontos usados.

Na Tabela 6, normalmente o primeiro ponto extrapola no tempo o valor da curva ANSI, sendo este desnecessário para a coordenação dos dispositivos. A proposta é utilizar da interpolação logarítmica para que este ponto coincida exatamente com a curva ANSI, obtendo desta maneira um gráfico mais coerente.





## 5 Ferramenta Computacional Desenvolvida

Nesta seção são descritas as características e o funcionamento da ferramenta computacional de seleção e Coordenação Automática de Dispositivos de Proteção (CADISP) em sistemas industriais radiais. Será explicado como funciona a interface de aquisição de dados, bem como procedimentos para efetuar a coordenação de um sistema elétrico.

Lembrando que a ferramenta a ser apresentada é resultado de um projeto maior no qual coube a Negrão (2012) o desenvolvimento do algoritmo de coordenação automática e a este trabalho o desenvolvimento das metodologias para levantamento das curvas e ambiente gráfico da ferramenta.

A permissão de uso do programa é concedida a qualquer pessoa com finalidade de uso pessoal, portanto ficando proibida a comercialização do mesmo. Esta restrição existe devido à permissão de distribuição das bibliotecas utilizadas por este programa. Estas serão explanadas a seguir.

### 5.1 Bibliotecas e Softwares Auxiliares

Desenvolvida em ambiente C++, através da IDE - *Integrated Development Environment* (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) Bloodshed Dev-C++, com o auxílio do pacote gráfico DISLIN (2012), biblioteca esta de distribuição gratuita, desde que não seja para uso comercial. Esta ferramenta segue a metodologia descrita no fluxograma da figura 31, sendo que os procedimentos de coordenação automática são descritos em Negrão (2012).

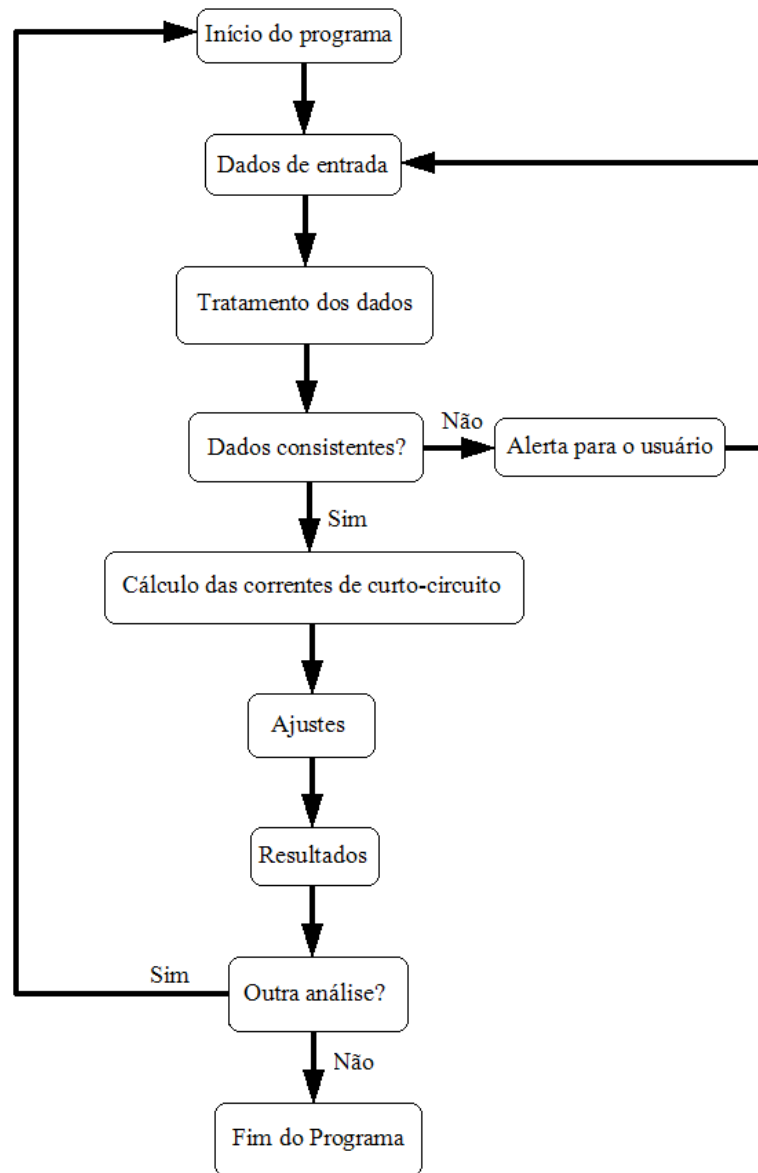


Figura 31: Fluxograma da estrutura do programa desenvolvido.

Analisando o fluxograma da figura 31, observa-se que é responsabilidade deste trabalho oferecer os dados de entrada para o programa e exibir os resultados em forma de coordenogramas, auxiliando o engenheiro a visualizar a consistência dos ajustes.

Para criação do programa de instalação, foi utilizado o programa “Inno Setup” (Inno Setup, 2012), por ser um *software* livre, permitindo usos comerciais.

A seguir será apresentado como o usuário deve entrar com os dados e proceder para que seja possível realizar a coordenação dos dispositivos de proteção.

## 5.2 Visão Geral

Na figura 32, apresenta-se a janela inicial da ferramenta desenvolvida. A seguir, são descritas as funções dos botões de comando.

1. Botão “Adicionar Equipamentos”

- Este botão permite adicionar diversos os elementos apresentados neste trabalho.

2. Botão “Adicionar Dispositivos de Proteção”

- Este botão permite adicionar diversos dispositivos de proteção apresentados por este trabalho.

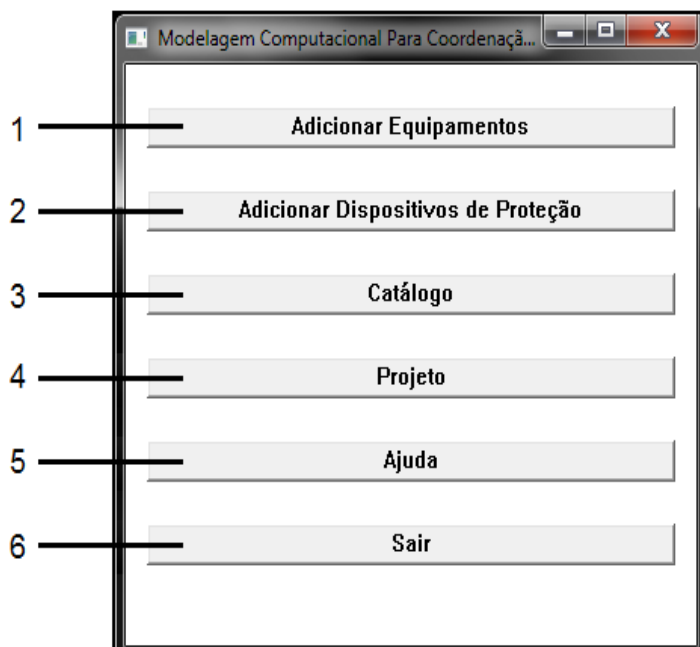


Figura 32: Tela inicial.

3. Botão “Catálogo”

- Este botão permite visualizar os elementos e dispositivos já catalogados no programa.

4. Botão “Projeto”

- Este botão permite criar ou abrir projetos, e realizar a coordenação do mesmo.

5. Botão “Ajuda”

- Este botão exibe contato dos desenvolvedores do programa, a fim de reportar problemas.

6. Botão “Sair”

- Este botão permite ao usuário sair do programa.

### 5.3 Adicionando Elementos

O *software* CADISP já vem com uma série de equipamentos e dispositivos de proteção pré-catalogados, porém, ainda é possível adicionar mais elementos a fim de tornar o seu banco de busca cada vez mais completo. Para isso existem as opções “Adicionar Equipamento” e “Adicionar Dispositivos de Proteção”. O primeiro permite adicionar “Cabo”, “Motor” e “Transformador”, conforme pode ser observado na figura 33. No segundo é possível adicionar os seguintes dispositivos: “Fusível”, “Disjuntor de Baixa Tensão” e “Relé”, conforme visto na figura 34.

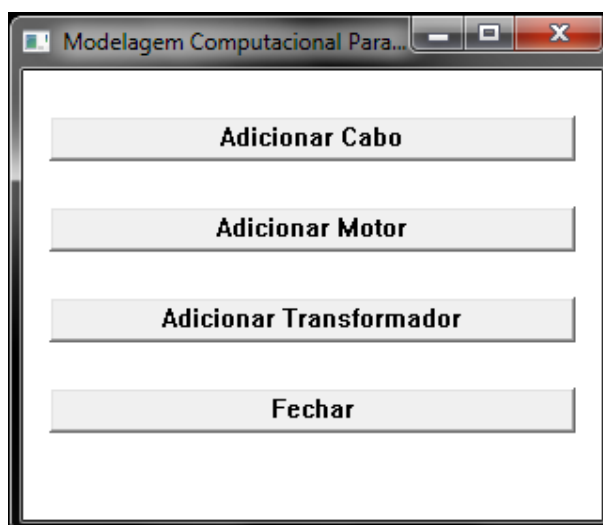


Figura 33: Adicionar equipamento.

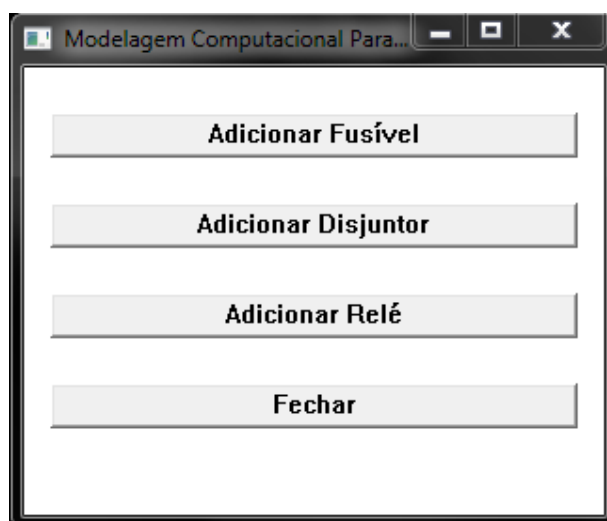


Figura 34: Adicionar dispositivo de proteção.

Ao selecionar qualquer uma das opções, é apresentada uma subtela que contém os espaços a serem preenchidos a fim de caracterizar o elemento inserido. Para cada elemento, existem parâmetros diferentes, sendo necessário o preenchimento de todos os campos. Exemplos das subtelas podem ser vistos nas seções anteriores deste mesmo capítulo, nas figuras 15, 17, 19, 22, 25 e 27.

#### 5.4 Dados de Catálogo

Ao selecionar a opção “Catálogo” na tela inicial, será exibida uma subtela na qual é possível visualizar todos os elementos já catalogados. Além de ser possível analisar seus dados nominais, é possível com a entrada de mais alguns parâmetros, observar sua curva em um gráfico di-logaritmico corrente (A) *versus* tempo (s).

Na figura 35 é possível visualizar a subtela do catálogo. Na região 1 é feita a escolha do tipo de elemento. Os elementos escolhidos e já catalogados são mostrados na região 2. Ao selecionar qualquer elemento da lista é possível analisar suas características na região 3.

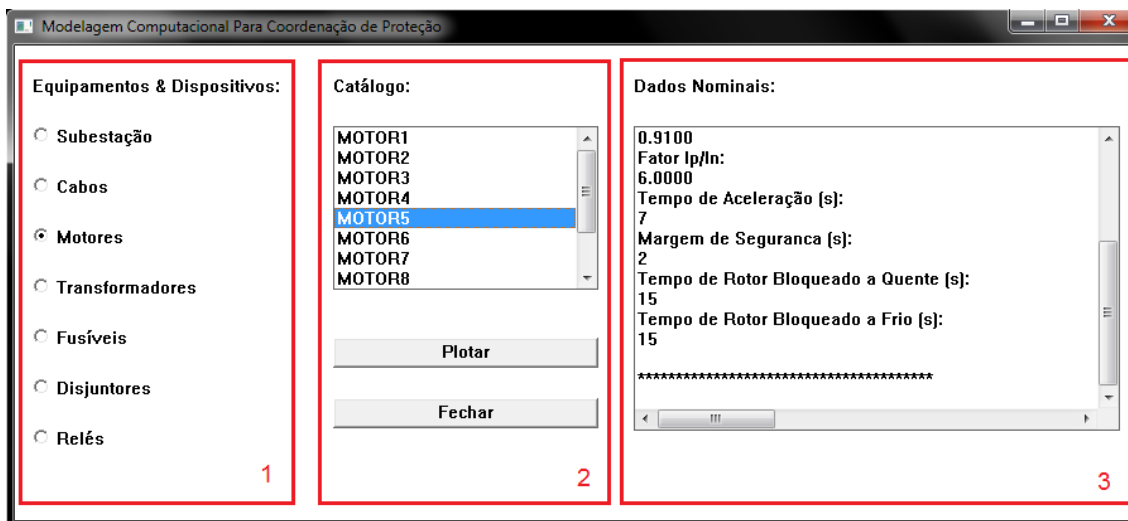


Figura 35: Tela do catálogo.

Na figura 35, apresenta-se o elemento “Subestação”, porém este não foi contemplado neste projeto, ficando por conta de Negrão (2012). O mesmo ocorrerá na figura 38.

Por fim, ao selecionar a opção “Plotar”, será apresentada uma tela com a curva do respectivo elemento, conforme a figura 36.

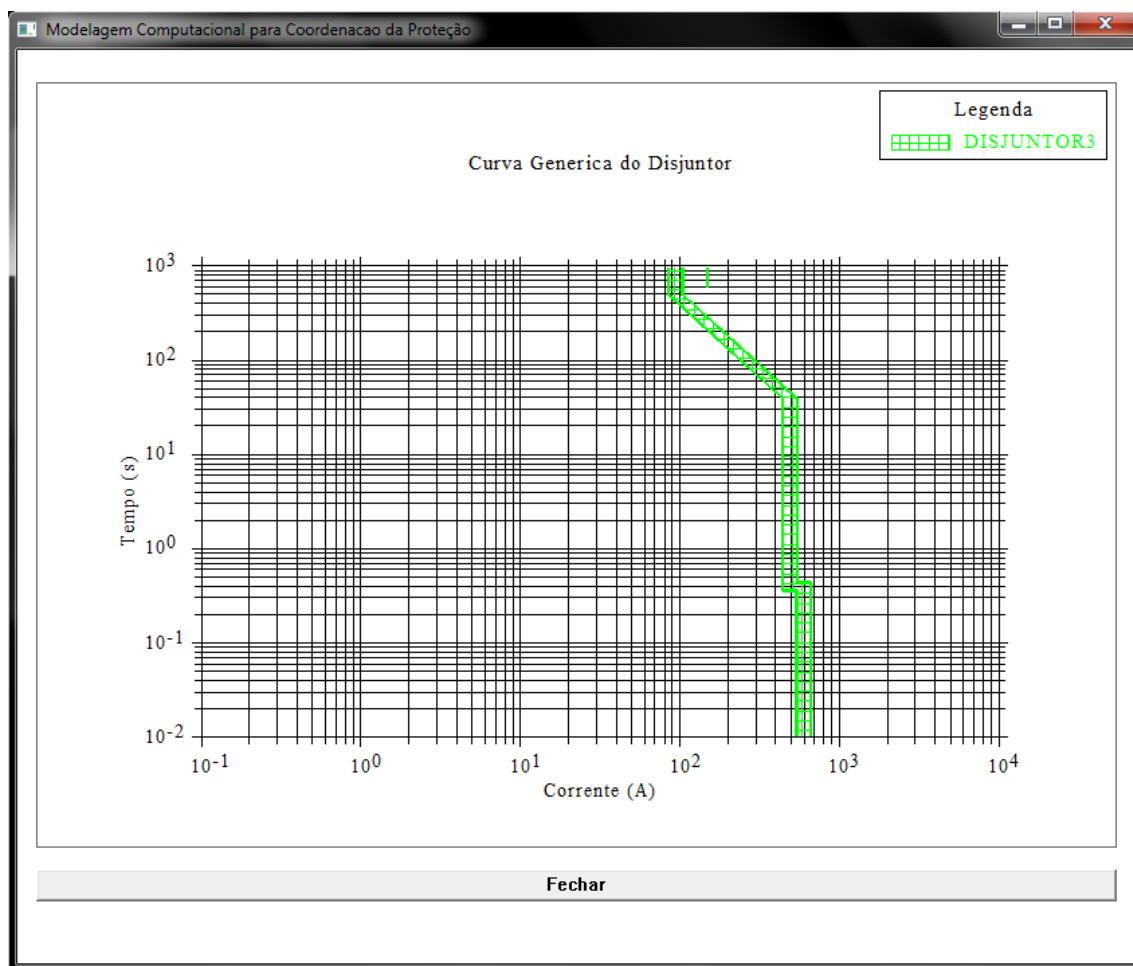


Figura 36: Curva de um disjuntor de baixa tensão.

## 5.5 Dados de Projeto

No botão “Projeto” da tela inicial, é possível acessar todos os projetos salvos ou ainda criar novos projetos. Para isso, ao selecionar a opção, surgirá uma tela conforme mostrado na figura 37. Nela é necessário escrever o nome do projeto que se deseja criar, e optar por “Novo projeto”, ou abrir, optando por “Abrir projeto”, um projeto já existente.

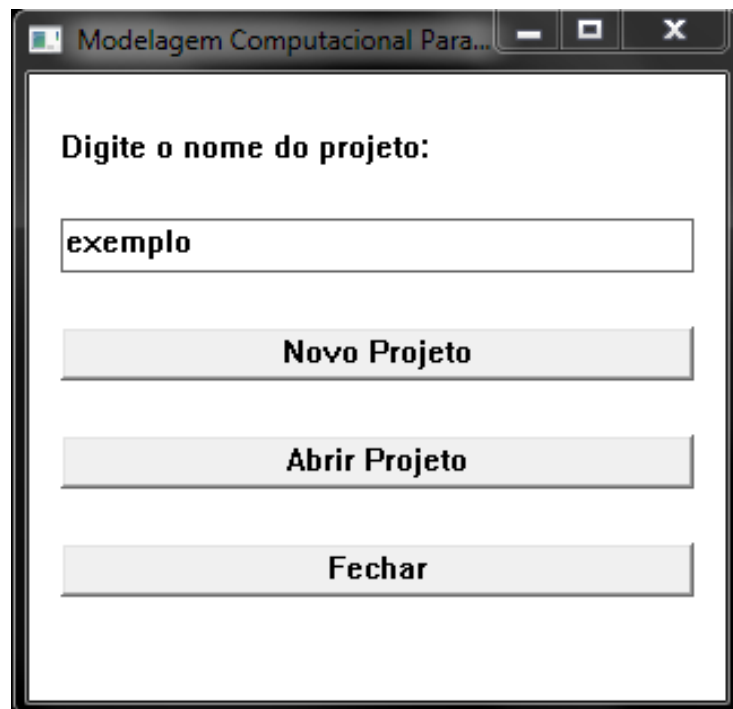


Figura 37: Tela de projeto.

Em seguida surgirá uma nova tela, com informações dos elementos presentes no projeto, podendo ser adicionados novos elementos e inseridas as correntes de curto circuito, e proceder a coordenação do projeto.

Na figura 38, região 3 - “Elementos do Projeto” - é possível ver os elementos presentes no projeto. Para adicionar um novo elemento, é necessário escolher o tipo do elemento na região 1, em seguida selecionar o elemento na região 2. Então abrirá uma janela, conforme a figura 39. Nesta devem ser inseridas as características intrínsecas do elemento referente ao projeto. Ao fim, deve-se selecionar a opção “Adicionar Elemento”.

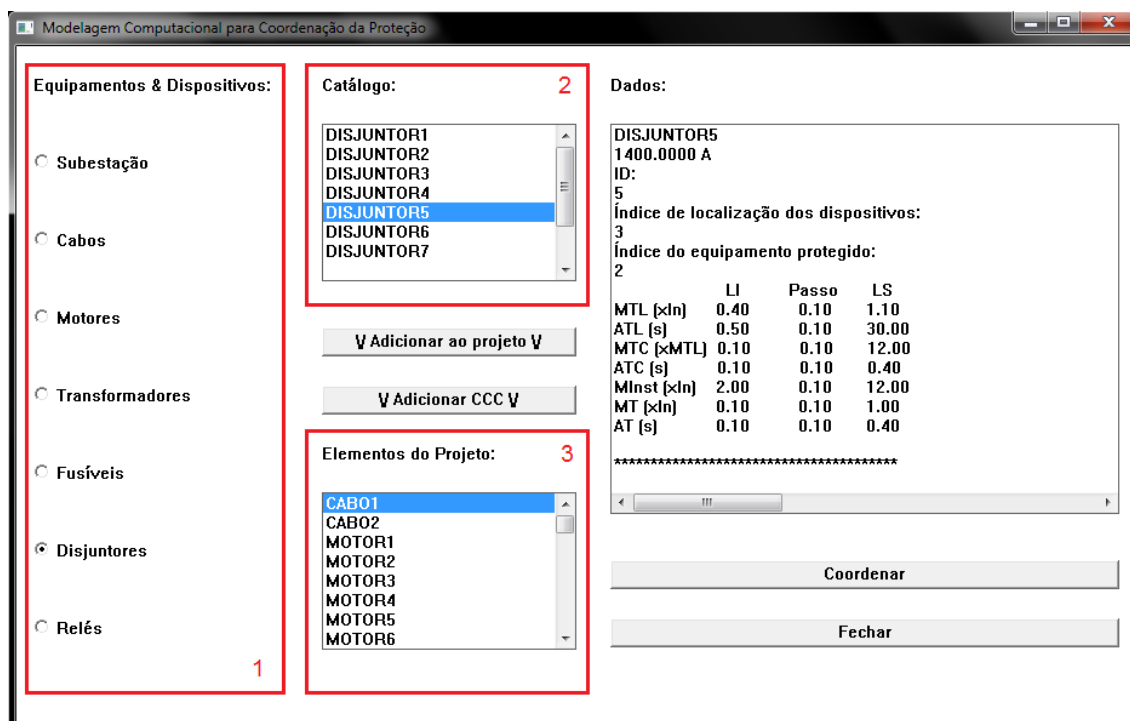


Figura 38: Visualização de um projeto.

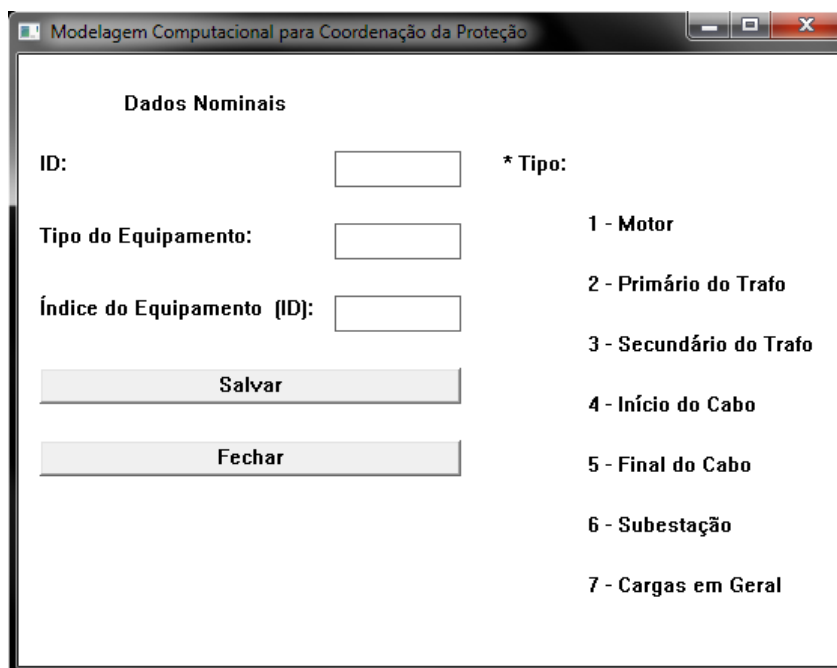


Figura 39: Adicionando um elemento.



Para adicionar uma corrente de curto-circuito, basta selecionar a opção “Adicionar CCC”. Então uma janela abrirá, e deverão ser fornecidas as entradas pedidas, conforme mostra a figura 40.

**Dados das CCC**

Tipo do Equipamento:  \* Tipo:

Índice do Equipamento (ID):  1 - Motor

Corrente Mínima (A):  2 - Primário do Trafo

Máxima Corrente Transitória (A):  3 - Secundário do Trafo

Máxima Corrente Subtransitória (A):  4 - Início do Cabo

Máxima Corrente Fase-Terra (A):  5 - Final do Cabo

6 - Subestação

7 - Cargas em Geral

Salvar

Fechar

Figura 40: Adicionar corrente de curto circuito.

Ao terminar de adicionar os elementos do sistema elétrico, é possível coordenar a proteção do mesmo, selecionando a opção “Coordenar”. Ao fazer isso, o algoritmo de coordenação identifica topologicamente os caminhos de coordenação do sistema elétrico e então escolhe os ajustes dos dispositivos de proteção conforme configuração dos elementos. Ao fim, uma janela será aberta na qual é possível visualizar quais foram os ajustes dos dispositivos na forma de um gráfico. É também possível conferir os ajustes no seguinte caminho “C:\CADISP 4.0\Bin\Saída\”, no qual gerará arquivos *.txt* com os ajustes dos Relés e Disjuntores de Baixa Tensão. Os arquivos são salvos na seguinte forma “*nomedoprojeto\_Relés.txt*” e “*nomedoprojeto\_Disjuntores.txt*”. Neste mesmo caminho é possível conferir os gráficos gerados, se assim for desejado. A subtela de coordenação, bem como um exemplo de curva é exibida na figura 41. Um exemplo de arquivo de saída no formato texto é mostrado no Anexo A.

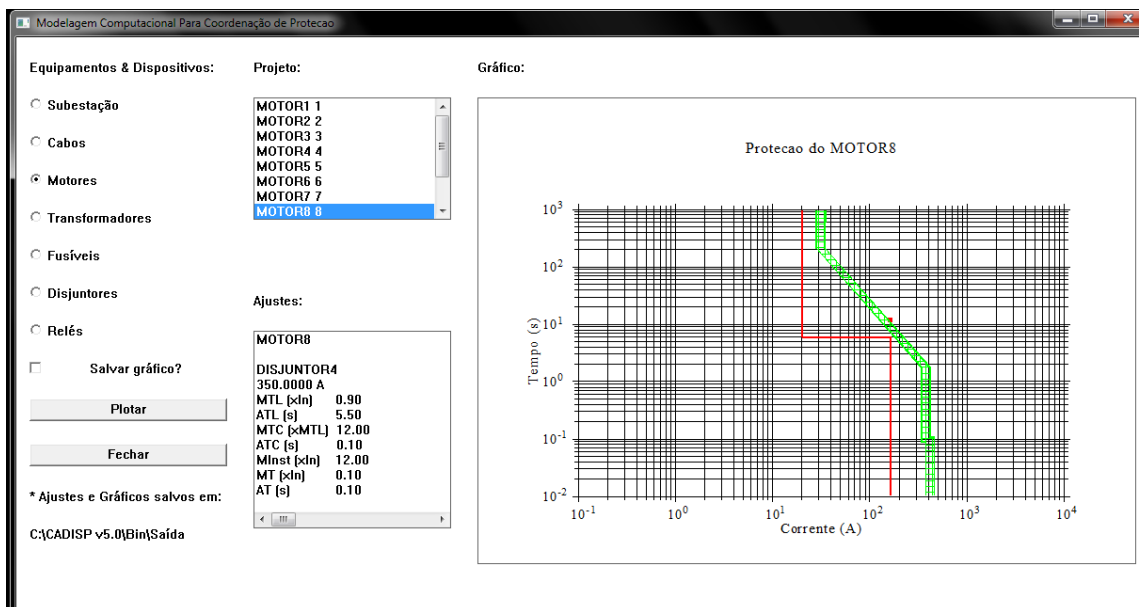


Figura 41: Curvas de saída coordenadas.

## 5.6 Ajuda e Sair

Os botões “Ajuda” e “Sair” são auxiliares do programa, e o primeiro permite que o usuário saiba qual versão do *software* está instalada em sua máquina, assim como o contato dos desenvolvedores, caso exista mais alguma dúvida ou queira reportar algum erro. O segundo permite sair do programa, finalizando todas as janelas e processos. A tela de ajuda é apresentada na figura 42.

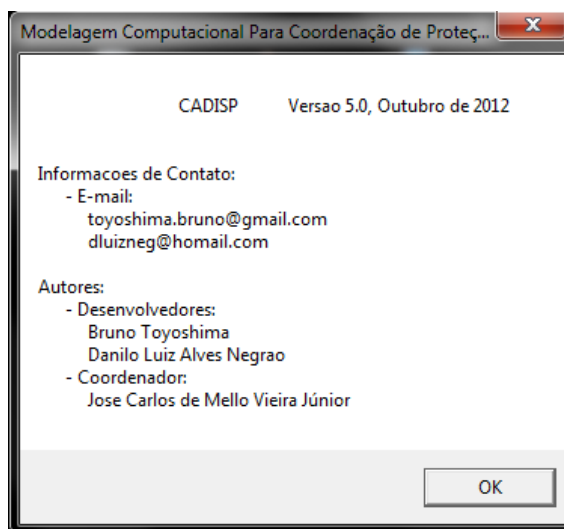


Figura 42: Tela de ajuda.

## 6 Conclusões

Em observação à proposta inicial deste trabalho, a qual contempla a definição de uma modelagem computacional das características dos elementos presentes em estudos de coordenação da proteção, considera-se que os objetivos foram atingidos. Foram implementados, segundo normas do IEEE, métodos de modelagem das curvas de atuação dos dispositivos de proteção e um algoritmo para a geração automática das curvas que representam os limites e as características de suportabilidade contra sobrecorrente dos equipamentos do sistema. Estes métodos foram validados através da análise dos catálogos dos dispositivos de proteção, verificando, desta forma, que a curva criada apresenta comportamento semelhante ao proposto. As curvas foram implementadas e incorporadas na ferramenta de coordenação automática CADISP. Esta ferramenta compreende também um módulo de coordenação automática da proteção, cujo método de coordenação automática está descrito em Negrão (2012). Como funcionalidade, a ferramenta computacional apresenta os resultados em forma de coordenogramas, facilitando o entendimento do engenheiro de proteção com relação aos ajustes que devem ser feitos. Sua abordagem tem o enfoque voltado tanto para a modelagem computacional das curvas de atuação quanto para os algoritmos responsáveis pelo processo de definição automática dos ajustes, que aliado a agilidade nos cálculos dos ajustes, tornam-se o grande diferencial da ferramenta.

Uma das grandes dificuldades encontradas foi o desenvolvimento de um método capaz de interpolar as curvas de forma a retratar com maior veracidade possível o comportamento das curvas dos fusíveis. Diversos métodos foram testados durante a execução deste trabalho, porém nenhum obteve êxito. Como analisado no capítulo quatro, os métodos de interpolação não eram capazes de suavizar a curva, apresentando um ruído em trechos entre os pontos fornecidos. Mesmo estes ruídos não possuindo grande amplitude, apresentavam uma distorção muito grande do comportamento real do componente, pelo fato da curva ser traçada em escala di-logarítmica.

Apesar das contribuições feitas por este trabalho, ainda é possível expandi-lo. Como sugestão, pode-se criar um módulo que realiza o cálculo das correntes de curto-circuito, evitando assim o grande volume de trabalho em realizar estes cálculos manualmente ou até mesmo pelo uso de outros *softwares*. Outra sugestão seria a introdução de novos equipamentos ou até mesmo novos tipos de algoritmos de proteção, para diferentes tipos de proteção, tornando a ferramenta mais genérica.

Por fim, este trabalho representa uma última etapa no âmbito acadêmico, e precede uma enorme quantidade de outros desafios que virão, porém em âmbito profissional. O

curso permitiu a absorção de uma enorme quantidade de conhecimentos técnicos, e também propiciou uma aprendizagem ética e social, fazendo o futuro engenheiro compreender sua importância e papel na sociedade.

## Referências Bibliográficas

**ABNT/NBR 5459/1987.** Manobra e Proteção de Circuitos. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas 1987.

ALBRECHT, R. E.; NISJA, M. J.; FEERO, W. E.; ROCKEFELLER, G. D.; WAGNER, C. L. Digital Computer Protective Device Co-ordination Program I-General Program Description. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. 83, no. 4, Apr. 1964.

**ASPEN.** Disponível em <<http://www.aspeninc.com>>. Acesso em 08 de setembro de 2012.

**BCP SWITZERLAND.** Disponível em <<http://www.neplan.ch>>. Acesso em 08 de setembro de 2012.

**BLOODSHED DEV C++.** Disponível em <[www.bloodshed.net/devcpp.html](http://www.bloodshed.net/devcpp.html)>. Acesso em 18 de agosto de 2012.

BROWN, K. A.; PARKER, J. M. A Personal Computer Approach to Overcurrent Protective Device Coordination. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 3, no. 2, Apr. 1988.

CAMINHA, A. C. Introdução a Proteção dos Sistemas Elétricos. 9 ed. São Paulo: Editora Edgar Blüher, 2004.

COMASSETTO L.; BERNARDON, D. P.; CANHA, L. N.; ABAIDE, A. R. Software for Automatic Coordination of Protection Devices in Distribution System. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 23, no. 4, Oct. 2008.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência:** dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. São Carlos: EESC-USP, 2007.

**DIGSILENT.** Disponível em <<http://www.digsilent.de>>. Acesso em 08 de setembro de 2012.

**DISLIN.** Disponível em <<http://www.dislin.de/>>. Acesso em 18 de agosto de 2012.

**EASYPower.** Disponível em <<http://www.easypower.com>>. Acesso em 08 de setembro de 2012.

FLORES, E. L.; PEREIRA, P. S. **Ajuste Computacional Interativo de Dispositivos de Sobrecorrente para Sistemas Elétricos de Potência.** In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE, 5., 1995, Curitiba.

FRANCO, N.B. **Cálculo Numérico**. Editora Pearson Education, 2006.

HEWITSON, L. G.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. *Practical Power System Protection*. Oxford: Newnes, 2004.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. **IEC 60255-3**: electrical relays – part 3: “single input energizing quantity measuring relays with dependente or independente time”, 1989.

INNO SETUP. Disponível em <<http://www.jrsoftware.org/>>. Acesso em 18 de agosto de 2012.

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

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. C37.112**: IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays. 1996.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. C37.12.00**: IEEE standard for standard general requirements for liquid immersed distribution, power, and regulating transformers. 2006.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. C57.109**: IEEE guide for liquid-immersed transformer through-fault-current duration. 1993 (R2008).

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 620**: IEEE guide for the presentation of thermal limit curves for squirrel cage induction machines. 1996 (R2008).

KLOCK Jr., O. S. **Programa Computacional para a Verificação da Coordenação e Auxílio na Determinação dos Ajustes de Relés Direcionais de Sobrecorrente de Neutro de Linhas de Transmissão**. 2002. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

LANGHANS, J. D.; E. RONAT. Protective Devices Coordination via Computer Graphics. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. IA-16, no. 3, Jun. 1980.

NEGRÃO, D. L. A.; **Metodologia para a Realização da Coordenação e Seletividade da Proteção de Sobrecorrente em Sistemas Elétricos Industriais**. 2012 Graduação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PRYSMIAN CABLES & SYSTEMS. **Mercado Geral – Média Tensão: Dimensionamento.** Disponível em <<http://www.prysmian.com.br/>>. Acesso em 15 de setembro de 2012.

RUGGIERO, M. A. G, LOPES, V. L. R, **Cálculo Numérico – Aspectos Teóricos e Computacionais**, Makron Books, São Paulo, 1997.

SIEMENS. Disponível em <<http://www.industry.siemens.com.br/buildingtechnologies/br/pt/produtos-baixa-tensao/protecao-eletrica/Fusiveis/Documents/Fusiveis-Curvas-Characteristicas.pdf>>. Acesso em 26 de novembro de 2012.

SKM. Disponível em <<http://www.skm.com/captor.html>>. Acesso em 08 de setembro de 2012.

SOARES. A. H. M.; **Metodologia Computacional para Coordenação Automática de Dispositivos de Proteção Contra Sobrecorrente em Sistemas Elétricos Industriais.** 2009. 235f. Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

**University of Idaho.** Material apresentado no curso de Proteção de Sistemas de Potência II, Disponível em <[http://www.ece.uidaho.edu/ee/classes/ECE526S05/text/book\\_2-2005.pdf](http://www.ece.uidaho.edu/ee/classes/ECE526S05/text/book_2-2005.pdf)>. Acesso em 26 de novembro de 2012.

YANG, Z.; SHI, D.; XIANZHONG, D.; **Study on Flexible Power System Protection Relay Coordination Software Based on User-Defined Principle.** In: UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 2007.

YINHONG, L.; DONGYUAN, S.; XIANZHONG, D; **An Integrated Power System Relay Coordination Software.** In: 2001 IEEE PES SUMMER MEETING, 2001.





## Anexo A – Exemplo de Saída do Software

Este anexo visa apresentar como é o formato de saída dos documentos dos ajustes de disjuntores e relés. Para isso, foi utilizado o sistema exemplo para a ferramenta computacional desenvolvida, composto de 7 disjuntores e 15 relés. A primeira saída retrata os ajustes de cada disjuntor do sistema e, a segunda, os ajustes que devem ser parametrizados nos relés.

Saída dos disjuntores - “exemplo\_Disjuntores.txt”:

DBT	MTL	ATL	MTC	ATC	Minst	MT	AT
1	0.900	5.900	10.90	0.100	12.00	0.100	0.100
2	0.900	5.900	10.90	0.100	12.00	0.100	0.100
3	0.800	4.900	11.80	0.100	12.00	0.100	0.100
4	0.900	5.500	12.00	0.100	12.00	0.100	0.100
5	0.900	0.700	4.200	0.300	11.20	0.100	0.300
6	0.900	0.700	4.200	0.300	11.20	0.100	0.300
7	0.900	0.500	3.300	0.300	11.60	0.100	0.300

As siglas apresentadas acima estão conforme apresentado na seção 4.1.2.

Saída dos relés – “exemplo\_Relés.txt”:

Rele	ITlong	ITinst	TDS	K1	K2	K3	padrao	declividade
1	2.790	30.131	8.100	0.0352	5.6700	2.0000	1	4
2	2.770	30.131	3.340	0.0963	3.8800	2.0000	1	3
3	4.360	38.190	1.020	0.1800	5.9500	2.0000	1	2
4	0.750	6.380	0.560	0.0000	80.000	2.0000	2	3
5	1.660	18.080	0.500	0.0000	80.000	2.0000	2	3
6	1.660	18.080	0.500	0.0000	80.000	2.0000	2	3
7	0.560	8.070	0.980	0.0000	80.000	2.0000	2	3
8	0.420	6.060	0.980	0.0000	80.000	2.0000	2	3
9	0.420	6.060	0.980	0.0000	80.000	2.0000	2	3
10	5.210	40.569	3.260	0.0352	5.6700	2.0000	1	4
11	4.970	46.818	0.500	0.0000	120.00	1.0000	2	4
12	4.590	43.259	0.500	0.0000	120.00	1.0000	2	1
13	5.210	41.119	2.570	0.0352	5.6700	2.0000	1	4
14	4.070	38.360	0.500	0.0000	120.00	1.0000	2	4
15	3.250	30.601	0.500	0.0000	120.00	1.0000	2	1

Para a coluna padrão, o número 1 representa padrão ANSI, e número 2, representa padrão IEC. Já a coluna declividade apresenta a possibilidade de ter a numeração variando de 1 a 5. Conforme se aumenta a numeração, maior é a declividade, conforme tabela 1 e 2 apresentadas na seção 3.1.3.