



**Universidade de São Paulo**  
**Escola de Engenharia de São Carlos**  
**Departamento de Engenharia Elétrica**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Desenvolvimento de um Algoritmo em C++  
para a Proteção de Sobrecorrente Temporizada  
de Geradores em um Relé Digital**

Autor:  
**Vinícius de Cillo Moro**

Número USP:  
**5475998**

Orientador:  
**Prof. José Carlos de Melo Vieira Júnior**

**São Carlos, Dezembro de 2010.**



**Vinícius de Cillo Moro**

**Desenvolvimento de um Algoritmo em C++  
para a Proteção de Sobrecorrente Temporizada  
de Geradores em um Relé Digital**

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

2010

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Moro, Vinícius de Cillo

M867d            Desenvolvimento de um algoritmo em C++ para a proteção de sobrecorrente temporizada de geradores em um relé digital / Vinícius de Cillo Moro ; orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior. -- São Carlos, 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistema de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Sistema elétrico de potência (SEP). 2. Proteção digital. 3. Proteção de geradores. 4. Proteção de sobrecorrente temporizada de tempo inverso. I. Título.

## Dedicatória

Aos meus pais Juarez e Vera Lúcia, e  
minha irmã Natália, com amor.



## **Agradecimentos**

- Aos companheiros do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), em especial ao Jáder pela colaboração essencial na elaboração deste trabalho.
- Ao amigo Renato Monaro, também do LSEE, por toda sua atenção, apoio, orientação e suporte a mim dedicados e que me auxiliaram na elaboração de todo este trabalho.
- A Beatriz, por todo amor, carinho e paciência em todos os momentos.
- A todos meus amigos de turma pelo apoio em todos os momentos difíceis durante o curso e também por todos os bons momentos vividos juntos.
- Ao professor José Carlos de Melo Vieira Júnior, pela orientação, atenção, apoio e incentivo na elaboração deste trabalho.
- A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, que de colaboraram durante toda a minha graduação.
- Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo.
- Ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, pela participação e fornecimento de todo o suporte e condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.
- A Deus, por toda minha família e amigos.





## Índice

<b>Dedicatória.....</b>	<b>i</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>iii</b>
<b>Índice.....</b>	<b>v</b>
<b>Índice de Figuras.....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Tabelas .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Siglas, Símbolos e Abreviaturas.....</b>	<b>xi</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>xv</b>
<b>Capítulo 1.....</b>	<b>1</b>
<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 - Objetivo .....	4
1.2 - Organização do Trabalho .....	4
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>7</b>
<b>Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>7</b>
2.1 - Breve histórico na área de relés digitais .....	7
2.2 - Trabalhos na área de proteção de sobrecorrente .....	9
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>11</b>
<b>Proteção de Geradores .....</b>	<b>11</b>
3.1 - Proteção Digital de Geradores.....	15
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>19</b>
<b>O Relé Digital de Sobrecorrente.....</b>	<b>19</b>
4.1 - Considerações iniciais sobre relés em geral.....	19
4.2 - Relé digital.....	20
4.3 - O Relé de Sobrecorrente.....	21
4.3.1 – O Relé de Sobrecorrente Instantâneo.....	22
4.3.2 - O Relé de Sobrecorrente de Tempo Definido .....	24
4.3.3 - O Relé de Sobrecorrente de Tempo Inverso.....	24
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>27</b>
<b>Desenvolvimento da Função de Proteção .....</b>	<b>27</b>
5.1 - A biblioteca <i>Open Relay</i> .....	27
5.1.1 - Canais .....	27

5.1.2 - Aquisição .....	29
5.1.3 - Medição .....	29
5.1.4 - Proteção .....	30
5.1.5 - Oscilografia.....	32
5.1.6 - Impressão .....	32
5.1.7 – Fluxo do Programa.....	33
5.2 - A função de proteção de sobrecorrente temporizada.....	35
5.2.1 - Teoria utilizada para desenvolver a função de proteção .....	35
5.2.1.1 - <i>Deslocamento do disco a partir de corrente com magnitude constante</i> .....	35
5.2.1.2 - <i>Deslocamento do disco a partir de corrente com magnitude variável</i> .....	37
5.2.2 - A função desenvolvida .....	38
<b>Capítulo 6.....</b>	<b>43</b>
<b>Testes e Resultados .....</b>	<b>43</b>
6.1 – Teste Computacional .....	43
6.2 - Testes em <i>hardware</i> usando PC104 e relé comercial.....	47
6.2.1 – Primeiro Teste.....	54
6.2.2 – Segundo Teste.....	65
<b>Capítulo 7 .....</b>	<b>77</b>
<b>Conclusão .....</b>	<b>77</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>79</b>

## Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama mostrando as principais funções de proteção para a unidade Gerador-Transformador .....	13
Figura 2: Resultado da pesquisa mostrando o número de sistemas de relés a serem comprados [16]. .....	16
Figura 3: Resultado da pesquisa apresentando a porcentagem aproximada de relés digitais [16]. .....	17
Figura 4: Curva de operação de um relé de sobrecorrente, com curvas de tempo T1 e T2. ....	22
Figura 5: Fluxograma da atuação de um relé digital de sobrecorrente instantâneo. ....	23
Figura 6: Curva característica de operação de um relé de sobrecorrente instantâneo. ..	24
Figura 7: Curva característica de operação de um relé de sobrecorrente de tempo definido. ....	24
Figura 8: Curva característica de operação de um relé de sobrecorrente de tempo inverso. ....	25
Figura 9: Organização da Biblioteca <i>Open Relay</i> . ....	28
Figura 10: Hierarquia de classes da Proteção .....	32
Figura 11: Fluxo do programa. ....	34
Figura 12: Curva de Tempo-Deslocamento para correntes de magnitude constante.....	36
Figura 13: Curva de Tempo-Deslocamento para corrente de magnitude variável .....	37
Figura 14: Diagrama de blocos mostrando simplificadaamente o algoritmo de proteção desenvolvido.....	41
Figura 15: Exemplo de arquivo utilizado para configurar o relé .....	44
Figura 16: Plataforma PC104 .....	49
Figura 17: Equipamento de simulação de sistemas de potência da <i>Doble</i> .....	49
Figura 18: Uma das telas de operação do <i>software ProTest</i> . ....	50
Figura 19: Caixa de condicionamento de sinais. ....	51
Figura 20: Relé T60 da <i>GE Industrial Systems</i> . ....	52
Figura 21: Interface do <i>software</i> do relé T60. ....	52

Figura 22: Sistema montado para realizar o teste com o "Cubo PC104" contendo a função desenvolvida .....	53
Figura 23: Sistema montado para realizar o teste com o relé T60 da GE.....	54
Figura 24: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEEE <i>Extremely Inverse</i> .....	69
Figura 25: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEEE <i>Moderately Inverse</i> .....	70
Figura 26: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEEE <i>Very Inverse</i> ...	70
Figura 27: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEC A.....	71
Figura 28: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEC B.....	72
Figura 29 : Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEC C.....	72
Figura 30: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEC <i>Short Inverse</i> ...	73
Figura 31: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IAC <i>Extremely Inverse</i> .....	74
Figura 32: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IAC <i>Very Inverse</i> .....	74
Figura 33: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IAC <i>Inverse</i> .....	75
Figura 34: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IAC <i>Short Inverse</i> ....	75

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Proteções tipicamente aplicadas a Geradores Síncronos [4] .....	12
Tabela 2: Resultados da pesquisa realizada pelo CIGRÉ .....	15
Tabela 3: Tabela com os valores das constantes para a fórmula das Curvas IEEE .....	40
Tabela 4: Tabela com os valores das constantes para a fórmula das Curvas IEC / BS142 .....	40
Tabela 5: Tabela com os valores das constantes para a fórmula das Curvas GE Type IAC .....	40
Tabela 6: Situações escolhidas para realizar o teste .....	45
Tabela 7: Resultados do primeiro teste .....	47
Tabela 8: Tabela para testes com as curvas do padrão IEEE .....	55
Tabela 9: Tabela para testes com as curvas do padrão IEC (BS142) .....	55
Tabela 10: Tabela para testes com as curvas do padrão GE Type IAC .....	56
Tabela 11: Valores medidos para teste com o PC104 usando as curvas do padrão IEEE .....	57
Tabela 12: Valor médio e erros do teste com PC104 para as curvas IEEE .....	57
Tabela 13: Valores medidos para teste com o PC104 usando as curvas do padrão IEC (BS142) .....	58
Tabela 14: Valor médio e erros do teste com PC104 para as curvas IEC .....	58
Tabela 15: Valores medidos para teste com o PC104 usando as curvas do padrão GE Type IAC .....	59
Tabela 16: Valor médio e erro do teste com PC104 para as curvas IAC .....	59
Tabela 17: Valores medidos para teste com o T60 usando as curvas do padrão IEEE ..	61
Tabela 18: Valor médio e erro para o teste com T60 para as curvas IEEE .....	61
Tabela 19: Valores medidos para teste com o T60 usando as curvas do padrão IEC (BS142) .....	62
Tabela 20: Valor médio e erro para o teste com T60 para as curvas IEC .....	62

Tabela 21: Valores medidos para teste com o T60 usando as curvas do padrão <i>GE Type IAC</i> .....	63
Tabela 22: Valor médio e erro para o teste com T60 para as curvas IAC .....	63
Tabela 23: Tabela retirada do manual do relé G60 da GE <i>Industrial Systemss</i> .....	65
Tabela 24: Resultados do teste usando o PC104.....	66
Tabela 25: Resultados do teste usando o T60.....	68

## Lista de Siglas, Símbolos e Abreviaturas

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ANSI</b>	<i>American National Standards Institute</i>
<b>BS</b>	<i>British Standard</i>
<b>CAD</b>	Conversor Analógico Digital
<b>CIGRÉ</b>	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
<b>DC</b>	<i>Direct Current</i>
<b>EEPROM</b>	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
<b>IEC</b>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
<b>LSEE</b>	Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica
<b>MPX</b>	Multiplexador
<b>RAM</b>	<i>Random Access Memory</i>
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Square</i>
<b>ROM</b>	<i>Read-Only Memory</i>
<b>S/H</b>	<i>Sample and Hold</i>
<b>SEP</b>	Sistema Elétrico de Potência
<b>TC</b>	Transformador de Corrente
<b>TP</b>	Transformador de Potencial





## Resumo

MORO, V. C. (2010). Desenvolvimento de um Algoritmo em C++ para a Proteção de Sobrecorrente Temporizada de Geradores em um Relé Digital. São Carlos, 2010. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

No contexto de Sistema Elétrico de Potência (SEP), a proteção constitui uma importante área na qual atualmente a tecnologia digital vem sendo largamente empregada constituindo a Proteção Digital. Entre os diversos elementos alvos da proteção de um SEP estão os geradores síncronos, os quais são peças extremamente importantes dentro de um sistema elétrico e expostos a diversas situações de risco, portanto devem estar devidamente protegidos contra esses riscos, contando assim com um diverso número de funções de proteção a eles aplicados. Dentro deste cenário, a proteção digital de sobrecorrente temporizada de tempo inverso é uma das funções de proteção aplicadas a geradores síncronos. Este trabalho tem o objetivo de desenvolver um algoritmo em C++ para essa função de proteção e inseri-la dentro de uma biblioteca de diversas funções de proteção já existente. Além disso, testes serão realizados com a função de proteção desenvolvida e esses resultados serão comparados com os resultados obtidos a partir dos mesmos testes utilizando um relé comercialmente disponível.

**Palavras-chaves:** Sistema Elétrico de Potência (SEP); Proteção Digital; Proteção de Geradores; Proteção de sobrecorrente temporizada de tempo inverso.



## Abstract

MORO, V. C. (2010). Development of a C++ Algorithm for the Time Overcurrent Protection of Generators in a Digital Relay. São Carlos 2010. Course Conclusion Work – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo.

In the context of Electrical Power Systems (EPS), the protection represents an important area in which the digital technology has been widely used nowadays and this is called Digital Protection. Among several targets of a EPS Protection there are the synchronous generators, which are extremely important pieces inside an electrical system and they are exposed to many different risk situations, therefore they must adequately protected against such risks, for that reason they must have a large number of protection functions applied to them. Within that scenery, the inverse time overcurrent protection is one of the protection functions applied to synchronous generators. This work aims to develop a C++ algorithm to this protection function and to insert it within a library of various protection functions that already exists. Besides, tests will be performed with the developed protection function and the results will be compared with the results obtained from the same tests using a relay that is commercially available.

**Keywords: Electrical Power System (EPS); Digital Protection; Generators Protection; Inverse Time Overcurrent Protection.**



## Capítulo 1

# Introdução

A proteção digital para um Sistema Elétrico de Potência (SEP) surgiu já há algum tempo, por volta das décadas de 60 e 70, nas quais vários algoritmos para relés de distância para a proteção de linhas de transmissão foram desenvolvidos. Atualmente a proteção digital está cada vez mais consolidada, possuindo diversos tipos de funções e sendo empregada largamente em muitos sistemas de proteção. Apesar de sua atual consolidação, a proteção digital é uma área de constante pesquisa e investigação, tendo em vista um desenvolvimento ainda maior nessa área [1].

Um sistema de proteção possui diversos elementos que se relacionam com o objetivo de garantir uma melhor atuação sobre um SEP. Esse sistema é composto basicamente por Transformadores de Corrente (TCs), Transformadores de Potencial (TPs), disjuntores, um sistema fornecedor de energia composto por um banco ou conjunto de baterias e relés [2]. Filosoficamente, o relé é definido como sendo um dispositivo sensor que comanda a abertura do disjuntor quando surgem no SEP condições anormais de funcionamento [1].

No caso da proteção digital, os relés utilizados são comumente chamados de relés digitais, numéricos ou ainda, microprocessados [1]. Os relés digitais podem ser programados com diversas funções de proteção, medição, monitoramento, entre outras. No caso deste trabalho o enfoque será dado sobre uma função de proteção em específico, que é a proteção de sobrecorrente temporizada de tempo inverso para a proteção de geradores síncronos – importante elemento de um sistema elétrico. Um maior aprofundamento em relação tanto da função de proteção quanto dos geradores síncronos será feito durante os capítulos que se seguem neste trabalho.

O relé digital é um dispositivo gerenciado por um microprocessador, o qual é controlado por um *software*, sendo que os dados de entrada, constituídos por tensão e corrente, são digitalizados. Os dispositivos com tecnologia analógica serviram de referência para o desenvolvimento dos digitais, os quais solucionam algumas limitações que são encontradas no caso da tecnologia analógica. Isso foi possível devido ao uso de um processador para a tarefa de proteção, o que permitiu o desenvolvimento e a realização de funções mais complexas.

Algumas características funcionais que um relé deve ter são inerentes ao processo de proteção, assim tanto os relés com tecnologia analógica quanto os digitais devem atender a essas características, as quais estão aqui apresentadas [3]:

- *Sensibilidade*: corresponde à capacidade da proteção em responder às anormalidades nas condições de operação e aos curtos-circuitos para os quais foi projetado.
- *Velocidade ou rapidez de ação na ocorrência de um curto-circuito*: essa característica visa a:
  - i. Diminuir a extensão do dano ocorrido;
  - ii. Auxiliar a manutenção da estabilidade das máquinas operando em paralelo;
  - iii. Melhorar as condições para re-sincronização dos motores;
  - iv. Assegurar a manutenção de condições normais de operação nas partes sadias do sistema;
  - v. Diminuir o tempo total de paralisação dos consumidores de energia;
  - vi. Diminuir o tempo total de não liberação de potência, durante a verificação de dano, etc.

É importante lembrar que relés devem estar associados a disjuntores rápidos, de modo que o tempo de atuação do sistema de proteção seja pequeno.

- *Confiabilidade*: é definida como sendo a probabilidade de um componente, um equipamento ou sistema satisfazer a função prevista sob dadas circunstâncias.
- *Seletividade*: é a propriedade do sistema de proteção em reconhecer e selecionar aquelas entre as condições para as quais uma imediata operação é requerida e aquelas para as quais nenhuma operação ou um retardo de atuação é exigido.

O uso da tecnologia digital tem sido amplamente difundido. Isso se deve a alguns benefícios e vantagens que os relés digitais podem trazer para um sistema, dentre estes, destacam-se [2]:

- Custos: os custos de relés digitais foram drasticamente reduzidos ao longo dos anos e sua velocidade de processamento aumentou significativamente. Atualmente, as novas subestações fazem largo uso da tecnologia digital.
- Confiabilidade e Auto-diagnose: o relé digital pode ser programado para monitorar constantemente seus sistemas de *hardware* e *software*, detectando assim qualquer defeito interno que venha a existir.
- Integração Digital: a tecnologia digital permite a integração entre diversos dispositivos em um sistema, por isso essa tecnologia e os microcomputadores têm se tornado a base da maioria dos sistemas empregados nas subestações modernas. Atividades como medições, comunicação de dados, telemetria e controle são praticamente realizadas usando a tecnologia digital.
- Flexibilidade Funcional: o relé digital pode ser programado para executar diversas funções. Por isso ele pode executar muitas outras tarefas na subestação tais como: medição, monitoramento, controle, localização de faltas, etc. Esse relé pode ainda ter característica adaptativa, modificando sua atuação em várias funções, para torná-la mais adequada às condições de um SEP.
- Possibilidade de Implementação de Técnicas Inteligentes: a tecnologia digital permite a implementação de ferramentas inteligentes, tais como redes neurais artificiais, lógica *Fuzzy*, algoritmos genéticos, entre outras.

O elemento alvo deste trabalho para receber a proteção, como já citado anteriormente, é o gerador síncrono. Os geradores constituem uma das peças mais caras dentre todos os equipamentos de um SEP e, além disso, estão sujeitos a mais tipos de defeitos do que qualquer outro equipamento, embora a probabilidade de ocorrência de defeitos nessas máquinas seja reduzida. Porém quando estas falhas acontecem, podem submeter o gerador a sérios danos e ainda a longos períodos fora de operação e, dessa forma, qualquer uma dessas consequências será muito danosa ao SEP em geral. Assim, os requisitos de confiabilidade, rapidez, seletividade e sensibilidade de uma operação de proteção tornam-se mais críticos no caso da proteção de geradores devido à importância destes para o sistema elétrico [4], [5].

Os geradores podem ser submetidos a um grande número de condições anormais de operação, isso resulta num considerável número de funções de proteção que devem ser previstas pelos projetistas. A determinação das funções de proteção a serem aplicadas a um gerador síncrono não segue um critério único, pois leva em consideração vários fatores como, por exemplo, a capacidade da máquina, o tipo e a importância do gerador [5].

## 1.1 - Objetivo

Tomando como base os fatos expostos aqui anteriormente, o objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso é o desenvolvimento de um algoritmo de proteção de sobrecorrente temporizada de tempo inverso, que será inserido em um sistema embarcado PC104.

A verificação e validação desse algoritmo serão dadas através de testes de simulação computacional e testes com a implementação em laboratório empregando o PC104. Além disso, a validação será dada comparando-se os resultados dos testes utilizando a função desenvolvida no PC104 e os resultados obtidos a partir dos mesmos testes realizados em um relé comercial contendo a mesma função de proteção.

## 1.2 - Organização do Trabalho

Este trabalho de conclusão de curso está organizado da maneira como mostra os itens da seqüência a seguir:

- **Capítulo 1:** é o capítulo de introdução, que mostra a contextualização deste trabalho dentro de sua área de enfoque. Mostra também o objetivo a ser atingido com este trabalho e, além disso, mostra a forma como este trabalho está organizado.
- **Capítulo 2:** este capítulo mostra o levantamento bibliográfico que foi feito para realizar este trabalho. Este levantamento envolve trabalhos desenvolvidos na área de proteção digital e também na área de proteção de sobrecorrente.
- **Capítulo 3:** traz explicações relacionadas com a proteção de geradores para se ter um maior aprofundamento neste tema. Além disso, mostra também duas pesquisas realizada nessa área envolvendo geradores síncronos.



- **Capítulo 4:** esta seção do trabalho mostrará uma explicação da proteção de sobrecorrente de uma maneira geral e um enfoque na proteção temporizada tanto de tempo definido quanto de tempo inverso, mostrando as características pertinentes a cada tipo.
- **Capítulo 5:** este capítulo mostrará explicações referentes tanto à função de proteção desenvolvida como também à biblioteca na qual esta função foi inserida.
- **Capítulo 6:** este é o capítulo que apresentará os testes e resultados relativos à função de proteção desenvolvida e, além disso, testes com relé comercial, contendo a mesma função de proteção, foram realizados para que uma comparação de desempenho pudesse ser realizada.
- **Capítulo 7:** neste capítulo estarão demonstradas todas as conclusões obtidas com a elaboração e resultados obtidos com este trabalho.



## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

Com o crescimento da demanda por energia elétrica em todo o mundo, surge a necessidade de uma busca contínua por novos métodos e tecnologias no sistema de proteção que garantam a confiabilidade, segurança e alto desempenho na operação da rede elétrica. Isso significa que estes novos métodos e tecnologias no sistema de proteção - que possibilitem a manutenção da operabilidade do sistema em condições anormais, de forma a isolar o problema no menor tempo possível - sejam cada vez mais eficientes e robustos com o intuito de garantir a máxima funcionalidade do sistema elétrico.

No contexto em que a perda do SEP não é admitida, muitos estudos foram e estão sendo desenvolvidos por diversos pesquisadores e engenheiros. Este levantamento bibliográfico tem como objetivo comentar algum dos trabalhos desenvolvidos na área de proteção. Sendo assim, este capítulo começará com um breve histórico, mostrando a evolução dos relés digitais, citando diversos pesquisadores responsáveis por tal feito e, além disso, mostrará trabalhos desenvolvidos dentro do tema principal deste trabalho que é a proteção de sobrecorrente.

## 2.1 - Breve histórico na área de relés digitais

Um dos primeiros artigos relacionado à área de relés digitais foi publicado em Abril de 1969 por G. D. Rockefeller com o título de “*Fault protection with a digital computer*”, no qual explorava-se a idéia de que a proteção de vários equipamentos deveria ser feita por um único computador [5]. Além disso esse artigo propõe algoritmos para alguns tipo de proteção em linhas de transmissão de alta tensão. É importante observar que a maior parte dos trabalhos e da atenção sempre foi destinada à área de proteção de linhas de transmissão [2]. Assim, vários outros trabalhos foram desenvolvidos na área de proteção de linhas de transmissão ao longo do tempo.

Durante a década de 70 diversos estudos foram propostos como, por exemplo:

- Artigos abordando algoritmos para proteção de distâncias em linhas de transmissão, realizados por B. J. Mann em conjunto com J. F. Morrison em 1971 [6] e por R. Poncelet em 1972 [7].
- Estudos realizados em 1972 [8] e 1975 [9] referentes à natureza não senoidal das formas de onda faltosas de tensão e corrente, os quais concentraram seus esforços na extração dos componentes fundamentais de ondas ruidosas baseadas no método de *Fourier* de um ciclo [2].
- Um estudo publicado em 1978 mostra o controle sobre variadas funções de proteção realizado por um computador central. Neste estudo, algoritmos foram desenvolvidos para as diversas funções de proteção. [10].

Evidentemente, muitos outros estudos foram realizados nessa área. Mas outro fato importante foram os avanços consideráveis no *hardware* computacional no início da década de 70. Isso fez com que os equipamentos fossem muito mais compactos, o consumo de energia e o custo diminuíssem e, além disso, os tornaram muito mais rápidos na velocidade de processamento e muito mais confiáveis. A partir dessa época a evolução dos computadores, tanto no lado do *hardware* quanto do *software*, não parou até hoje. Esse avanço no *hardware* somado aos estudos algorítmicos, dos quais alguns exemplos foram citados anteriormente, foram decisivos na implementação real de dispositivos digitais na proteção de sistemas elétricos [2].

Atualmente, vê-se o uso de novas tecnologias aplicadas a sistemas elétricos, no intuito de suprir as necessidades desse sistema, que tornou-se cada vez mais complexo. Algumas dessas técnicas são [2]:

- Relés adaptativos, que envolvem uma filosofia que permite e procura fazer ajustes no sistema de proteção, com o objetivo de deixá-lo mais adequado às condições variáveis do sistema elétrico.
- Sistemas de comunicação em SEPs, utilizando, por exemplo, fio piloto, ondas portadoras, sinais de áudio, microondas ou fibras ópticas para realizar a transmissão de dados entre os dispositivos. Estas redes de comunicação são utilizadas para controle e operação de SEPs.
- PMUs (*Phase Measurement Units*) responsáveis pela medição sincronizada de fasores.
- O uso de GPS (*Global Positioning Systems*) para realizar a sincronização de

dados em um sistema elétrico.

- Aplicação da transformada *Wavelet*, uma eficiente ferramenta matemática utilizada em problemas de localização de faltas em linhas de transmissão e também na proteção de transformadores.

## 2.2 - Trabalhos na área de proteção de sobrecorrente

Todos os trabalhos descritos previamente contribuíram de forma indireta para a realização deste trabalho, isso porque todos esses estudos tornaram possível atingir o nível em que encontra-se atualmente a proteção digital de sistemas elétricos. Assim esses trabalhos constituem a base da proteção digital, sobre a qual este trabalho está inserido.

O presente trabalho de conclusão de curso se baseou nas idéias principais apresentadas em [11] e [12].

Em [11] aborda-se o desenvolvimento de modelos dinâmicos para representar os principais relés empregados em sistemas de proteção de redes de distribuição e subtransmissão de energia elétrica na presença de geradores síncronos. Os modelos desenvolvidos foram feitos para o uso no ambiente *Matlab/Simulink*. Entre os relés que foram modelados neste trabalho, está o relé de sobrecorrente temporizado.

O trabalho apresentado em [12] tem como foco a modelagem, caracterização e análise do relé digital de sobrecorrente aplicado a um determinado sistema elétrico de distribuição. Para tanto, foram utilizados os *softwares Alternative Transients Program (ATP)*, para realizar a modelagem do sistema de distribuição, e do ambiente *Matlab/Simulink*.



## Capítulo 3

# Proteção de Geradores

Devido à sua importância para o sistema elétrico de potência e, principalmente, pela maior gravidade dos danos a que estão sujeitos em caso de falhas ou mesmo operação em condições anormais, os geradores devem ser convenientemente protegidos, visando garantir a integridade de suas diversas partes elétricas e mecânicas. Desta forma, é importante que as falhas e condições anormais de operação sejam prontamente reconhecidas e rapidamente eliminadas, evitando a extensão dos danos. Para atender esses requisitos, as proteções aplicadas aos geradores devem obedecer às mesmas características funcionais de um processo de proteção já discutidas anteriormente que são sensibilidade, rapidez de atuação, seletividade e confiabilidade.

Os geradores síncronos estão sujeitos a diversas condições anormais de operação quando conectados ao sistema elétrico de potência, dentre estas é possível citar:

- Correntes desbalanceadas;
- Curto-circuito externo;
- Energização inadvertida;
- Falta nos enrolamentos;
- Motorização;
- Oscilações subsíncronas;
- Perda de sincronismo;
- Redução ou perda total da excitação;
- Sobreaquecimento dos enrolamentos e mancais;
- Sobrecarga;
- Sobreexcitação;
- Sobretenção;
- Sobrevelocidade;

Algumas dessas condições não requerem que a unidade seja desligada automaticamente, neste caso apenas alarmes são disparados e a situação pode ser corrigida enquanto a máquina continua em funcionamento. Porém, a maioria requer uma pronta atuação com a remoção imediata da máquina de serviço. Além disso, a quantidade

de funções de proteção que devem ser aplicadas a um gerador varia de acordo com o tamanho e a importância da máquina [13].

Algumas funções de proteção, quando empregadas por uma determinada companhia, podem promover o desligamento da máquina, enquanto em outra companhia esta mesma função pode utilizar apenas um alarme para sinalizar esta situação, ou seja, em algumas situações de condições anormais de funcionamento o procedimento pode depender de cada companhia.

Embora as funções de proteção aplicadas a um gerador síncrono possam variar de acordo com seu tamanho, capacidade, tipo ou sua importância para o sistema, algumas delas são tipicamente empregadas. A Tabela 1 mostra estas funções e o código ANSI utilizado para identificar tais proteções. Além disso, a Figura 1 mostra como estão empregadas algumas das funções de proteção da unidade Gerador-Transformador citadas na Tabela 1.

**Tabela 1: Proteções tipicamente aplicadas a Geradores Síncronos [4]**

<b>Descrição</b>	<b>Código ANSI</b>
Proteção de Distância	21
Proteção Volts/Hertz	24
Proteção Anti-motorização	32
Proteção contra Perda de Excitação	40
Proteção contra Seqüência Negativa	46
Proteção Térmica	49
Proteção contra Sobrecorrente	50/51
Proteção contra Sobretensão	59
Proteção contra Balanço de Tensão	60
Proteção contra Faltas à Terra	64
Proteção contra Energização Inadvertida	67
Proteção contra Sobrecorrente DC no Circuito de Campo	76
Proteção contra Perda de Sincronismo	78
Proteção contra Sub/Sobrefrequência	81U/O
Proteção Diferencial	87



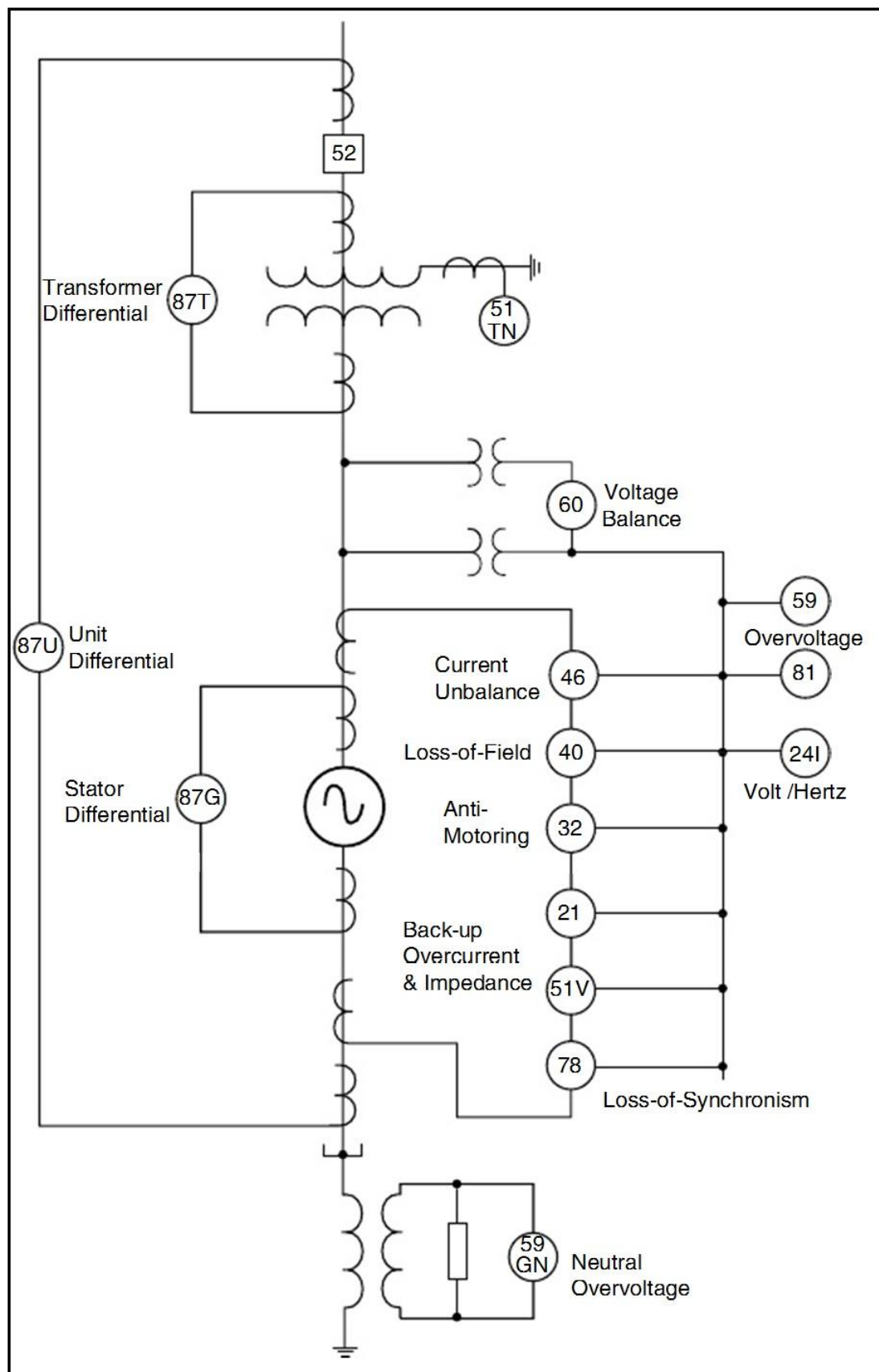


Figura 1: Diagrama mostrando as principais funções de proteção para a unidade Gerador-Transformador

Uma pesquisa não tão recente, realizada em 1995 pelo Comitê de Estudo 34.05 do CIGRÉ [14] mostra uma visão clara da diversidade de funções que são aplicadas aos geradores, levando em consideração apenas a capacidade dos mesmos. Esta pesquisa foi feita em 16 países através de questionários que foram respondidos por concessionárias de energia elétrica, fabricantes de proteção para geradores, empresas de consultoria e produtores independentes de energia.

Nesta pesquisa os geradores foram classificados de acordo com sua capacidade. A classificação proposta foi:

- Geradores de Pequeno porte: de 5 a 20 MW;
- Geradores de porte Moderado: de 20 a 50 MW;
- Geradores de Médio porte: de 50 a 350 MW;
- Geradores de Grande porte: de 350 MW ou mais.

Além disso, nesta pesquisa foram considerados os dois tipos de aterramento mais utilizados para geradores: aterramentos através de alta e baixa impedância comumente aplicados a geradores de grande e pequeno porte respectivamente. Os resultados dessa pesquisa estão evidenciados na Tabela 2.

Esta tabela mostra algumas funções a mais ou com características mais específicas do que as funções da Tabela 1. Portanto, para deixar claro, a proteção que corresponde ao código ANSI 51V refere-se à uma proteção de sobrecorrente temporizada com restrição de tensão. O código 64-1 refere-se à proteção contra faltas à terra no estator (100%); o código 64-2 é a proteção contra faltas à terra no estator (95%); o código 64F corresponde à proteção contra faltas à terra no rotor. Por fim, as proteções com códigos 87G e 87U já foram esclarecidas anteriormente.

Analisando a Tabela 2, é possível notar claramente como a aplicação de certas funções varia conforme a capacidade do gerador. E essa variação, como já dito anteriormente, se dá também por outras características do gerador. Ainda sobre essa tabela, é possível ver como a proteção de sobrecorrente temporizada é bastante utilizada em todos os casos, sendo que o caso principal é o de geradores de pequeno porte.

Tabela 2: Resultados da pesquisa realizada pelo CIGRÉ

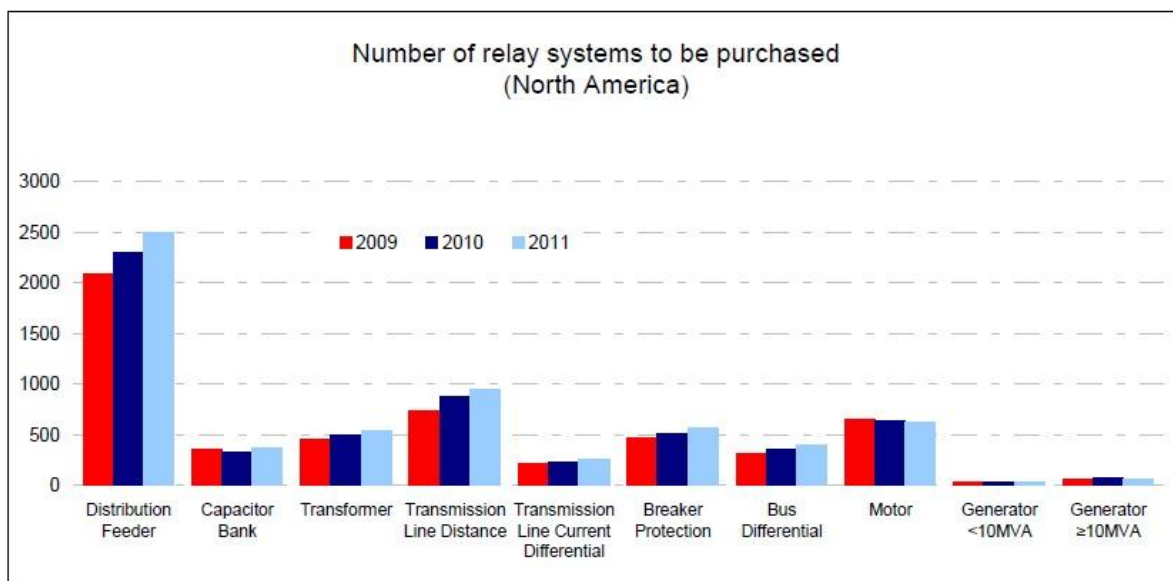
Função de Proteção	Pequeno		Moderado		Médio		Grande	
	SIM (%)	NÃO (%)	SIM (%)	NÃO (%)	SIM (%)	NÃO (%)	SIM (%)	NÃO (%)
21	32	68	48	52	75	25	78	22
24	20	80	46	54	84	16	85	15
32	83	17	88	12	87	13	72	28
40	67	33	88	12	94	6	100	0
46	68	32	92	8	100	0	100	0
51V	75	25	58	42	53	47	50	50
59	85	15	87	13	81	19	80	20
60	28	72	48	52	65	35	43	57
64-1 *	0	100	7	93	40	60	42	58
64-1 **	7	93	13	87	58	42	42	58
64-2	78	22	85	15	80	20	81	19
64F	79	21	95	5	90	10	94	6
67	18	82	7	93	44	56	50	50
78	22	78	47	53	37	63	59	41
81U/O	69	31	68	32	74	26	64	36
87G	85	15	91	9	96	4	88	12
87U	65	35	77	23	83	17	87	13
* Esquema de Injeção ** Esquema 3º Harmônico								

### 3.1 - Proteção Digital de Geradores

Apesar de o enfoque dos estudos na área de proteção em geral ter sido destinado em sua maior parte às linhas de transmissão, a proteção de geradores também evoluiu com o tempo, assim como todas as áreas de proteção, se desenvolvendo desde os relés eletromecânicos e estáticos até os sistemas contendo relés digitais com múltiplas funções de proteção. Muitos sistemas de proteção atualmente ainda utilizam os relés eletromecânicos ou estáticos, pois possuem um longo retrospecto em promover uma proteção confiável. Entretanto, com todos os avanços da tecnologia digital e todas as vantagens que esta possui em relação às tecnologias anteriores, o uso desses dispositivos mais novos vem crescendo muito, inclusive na proteção de geradores. [15]

Uma pesquisa realizada em 2009 pela empresa *Newton-Evans Research Company* [16] mostra essa tendência no uso da tecnologia digital nas diversas áreas de proteção.

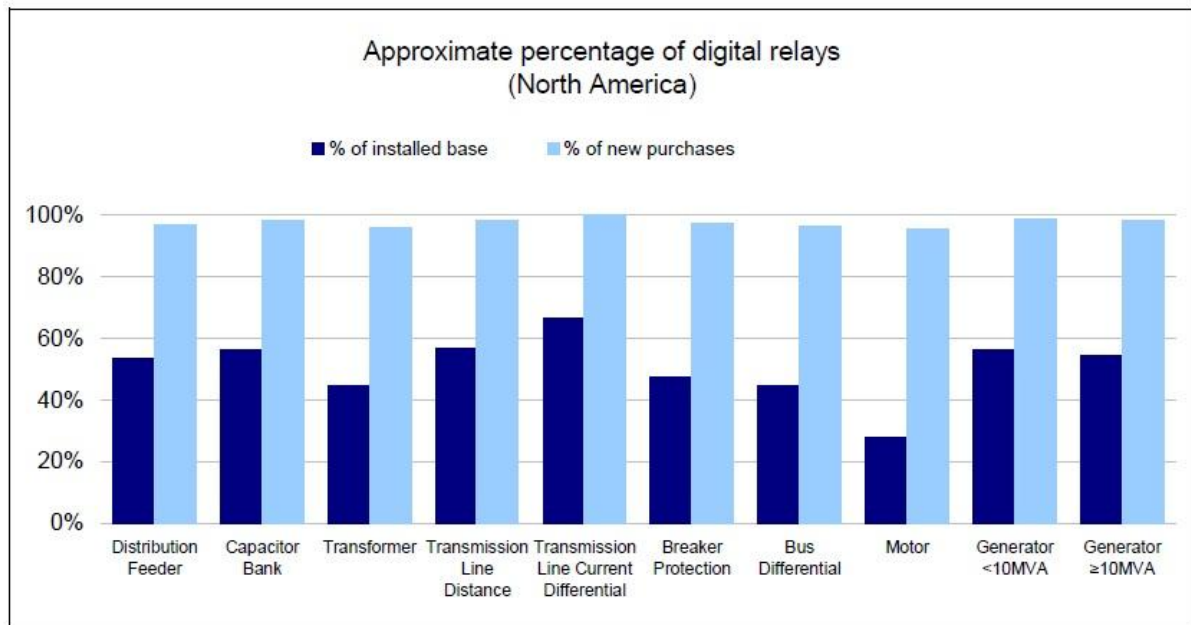
Essa pesquisa aborda apenas o mercado de Estados Unidos e Canadá, porém é possível claramente notar essa tendência em âmbito mundial. Essa pesquisa foi realizada através de entrevistas com engenheiros de proteção e gerentes de engenharia de várias companhias de geração, transmissão e distribuição dos dois países. Um dos resultados que esta pesquisa teve está mostrado no gráfico da Figura 2, a qual apresenta o número de sistemas de relés que devem ser comprados nos anos de 2009, 2010 e 2011 para as diversas partes do sistema elétrico.



**Figura 2: Resultado da pesquisa mostrando o número de sistemas de relés a serem comprados [16].**

Como o número de geradores em um sistema elétrico não é tão grande como os outros componentes do sistema, o número de relés a serem comprados não é tão grande como o de outras áreas. Porém constata-se que mesmo na proteção de geradores há um interesse em expandir o número de relés.

O outro resultado desta pesquisa, que vem complementar o resultado exposto anteriormente, está mostrado no gráfico da Figura 3. Nesta figura vê-se que o número de relés digitais já instalados é relativamente grande na maioria dos casos. No caso dos geradores, essa porcentagem ultrapassa os 50 %, ou seja, a tecnologia digital está superando a analógica. Associando a porcentagem de novas compras com o gráfico anterior, é possível concluir que os novos sistemas utilizarão em extrema maioria os relés digitais. Essa porcentagem de novos relés digitais é alta em todas as áreas do sistema elétrico, inclusive no caso dos geradores.



**Figura 3: Resultado da pesquisa apresentando a porcentagem aproximada de relés digitais [16].**

Apesar de estes resultados retratarem apenas o cenário de Estados Unidos e Canadá, é possível concluir que a grande tendência é a utilização da tecnologia digital, preterindo a analógica. Além disso, essa tendência é clara em todas as áreas do sistema elétrico incluindo os geradores.



## Capítulo 4

# O Relé Digital de Sobrecorrente

### 4.1 - Considerações iniciais sobre relés em geral

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), relé é um dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nas condições deste equipamento ou do circuito em que ele está ligado, ou em outro equipamento ou circuito associado [3]. Outras normas definem relé como sendo um dispositivo que tem como função eliminar perigosas ou indesejáveis condições do sistema e iniciar manobras de chaveamento ou aviso adequados [3].

Existe uma variada gama de relés disponíveis comercialmente, os quais atendem às diversas situações que são encontradas em sistemas elétricos. Porém, didaticamente, todos esses relés podem ser classificados basicamente em termos de [3]:

1. Grandeza física de atuação: podem estar relacionados, por exemplo, à grandezas elétricas, mecânicas, térmicas, óticas, etc.
2. Natureza da grandeza a que respondem: corrente, tensão, potência, frequência, pressão, temperatura, etc.
3. Tipo construtivo: podem ser, por exemplo, dos tipos eletromecânicos, mecânicos, eletrônicos, estáticos, digitais.
4. Função: podem ser de sobre ou subcorrente, tensão ou potência, direcional de corrente ou potência, diferencial, distância, entre outros.
5. Aplicação: máquinas rotativas (gerador) ou estáticas (transformadores), linhas aéreas ou subterrâneas, aparelhos em geral.
6. Temporização: instantâneo ou temporizado.
7. Forma de conexão do elemento sensor: direto no circuito primário ou através de redutores de medida.
8. Tipo de fonte para atuação do elemento de controle: corrente alternada ou contínua.
9. Código ANSI (*American National Standards Institute*): normalização internacional

que define as funções de proteção.

10. Posicionamento dos contatos (com circuito desenergizado): normalmente aberto ou fechado.

A forma como os relés de sobrecorrente e também os outros relés em geral atuam, pode ser descrita basicamente em quatro etapas [1]:

1. O relé recebe informações, de forma permanente, da situação de operação do sistema protegido através das formas de onda de corrente, tensão, frequência e/ou uma combinação dessas grandezas, por exemplo, potência, impedância, entre outras.
2. Se por algum motivo, em um dado momento, surgirem condições anormais de funcionamento do sistema protegido de tal forma que estas sensibilizem o relé, este deve atuar de acordo com o que lhe foi atribuído.
3. A atuação do relé caracteriza-se pelo envio de um sinal que resultará em um alarme (sinalização), ou bloqueio, ou abertura do disjuntor ou ainda nas três ao mesmo tempo.
4. Por fim, no caso da abertura ou disparo do disjuntor comandado pelo relé ocorrerá o isolamento da parte defeituosa do sistema.

## 4.2 - Relé digital

Um relé digital é composto por alguns subsistemas cujas funções são bem definidas. Os principais subsistemas em questão são os Transformadores de Entrada, Filtros, Dispositivos *Sample and Hold* (S/H), Multiplexador (MPX), Conversor Analógico Digital (CAD), Módulo de Entrada Lógica, Unidade Central de Processamento e Módulo de Saída Lógica.

Os Transformadores de Entrada constituem-se de Transformadores de Corrente (TC) e Transformadores de Potencial (TP) e compõem o chamado Módulo de Interface e são eles os responsáveis por atenuar os valores de tensões e correntes a níveis adequados aos microprocessadores. Os filtros também constituem o Módulo de Interface e são usados com o objetivo de se evitar erros no processamento digital dos sinais [2].

Os dispositivos S/H têm a função de amostrar as entradas analógicas em um mesmo instante e disponibilizar os sinais ao MPX. O MPX permite usar apenas um CAD para várias entradas analógicas, estas entradas são conectadas uma a uma pelo MPX ao



CAD. No CAD os sinais analógicos são convertidos para digitais em intervalos definidos pela taxa amostral [2].

O Módulo de Entrada Lógica tem a função de informar ao processador sobre o estado de chaves, disjuntores, seccionadoras e sobre a atuação de outras proteções. A Unidade Central de Processamento é composta por processador (controla o funcionamento do relé, executa cálculos, decide atuações), memórias RAM (utilizada para armazenar quantidades e operações intermediárias no algoritmo do relé), ROM (onde o *software* lógico do relé é armazenado) e EEPROM (onde os ajustes do relé são armazenados) [2].

### 4.3 - O Relé de Sobrecorrente

O relé de sobrecorrente como o próprio nome sugere, tem como grandeza de atuação a corrente elétrica do equipamento ou de parte do sistema elétrico que está sendo protegido. Logo, ele pode ser aplicado para proteger qualquer elemento de um sistema de energia, como, por exemplo, linhas de transmissão, transformadores, geradores ou motores, entre outros dispositivos [2].

Os relés de sobrecorrente podem ser eletromecânicos, eletrônicos (estado sólido) ou digitais [2]. Porém, atualmente, os relés eletromecânicos e eletrônicos estão sendo substituídos em larga escala pelos relés digitais. As concessionárias de energia elétrica e instalações industriais têm preferido a tecnologia digital, em razão da grande quantidade de informações que os relés digitais conseguem armazenar e do elevado potencial de integração com outros dispositivos.

Para exemplificar a aplicação de um relé de sobrecorrente, assume-se um sistema radial, ou seja, com apenas uma fonte de tensão. Pode-se afirmar que, se a mínima corrente de falta dentro da zona de proteção, definida por  $I_f$ , for igual ou maior do que a máxima corrente possível de carga, a qual é pré estabelecida e também conhecida por corrente de *pick up*, definida por  $I_P$ , tem-se então o princípio de operação do relé de sobrecorrente como representado na Figura 4 e na equação 4.1. Assim, se a corrente de falta for maior que a corrente de *pick up* indica que há uma situação faltosa ocorrendo dentro da zona de proteção, mostrando a necessidade de abertura do disjuntor. Caso essa situação não ocorra, ou seja, se a corrente de falta for menor do que a corrente de *pick up*, então não há situação faltosa, o que garante a não abertura do disjuntor. Esta situação está também evidenciada na Figura 4 e na equação 4.2.

$$I_P \geq I_f \quad (4.1)$$

$$I_p < I_f \quad (4.2)$$

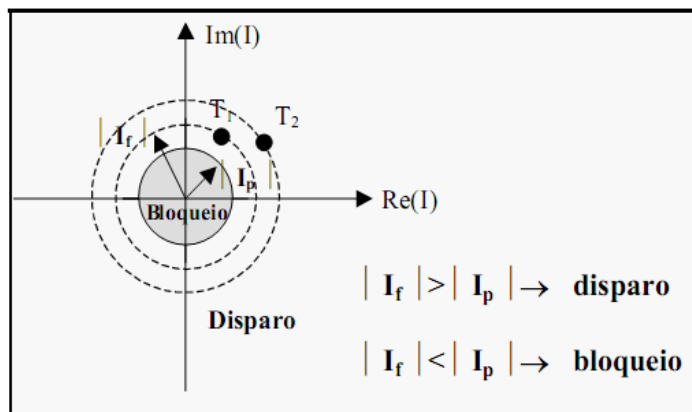


Figura 4: Curva de operação de um relé de sobrecorrente, com curvas de tempo T1 e T2.

É importante ressaltar que a magnitude da corrente deve ser derivada de uma fonte de corrente alternada, a qual pode incluir um componente de decaimento CC, cuja magnitude depende do instante de ocorrência da falta.

Segundo a norma IEC 255-3 [17] existem três tipos de relés de sobrecorrente, os quais são os seguintes:

1. Relé de sobrecorrente instantâneo.
2. Relé de sobrecorrente de tempo definido.
3. Relé de sobrecorrente de tempo inverso.

A seguir, explicações sobre esses três tipos de relés de sobrecorrente serão feitas, porém explicações mais detalhadas sobre os itens 2 e 3 mostrados acima serão dadas no próximo capítulo, já que essas duas funções foram as desenvolvidas neste trabalho.

#### 4.3.1 – O Relé de Sobrecorrente Instantâneo

As equações 4.1 e 4.2 descrevem uma situação de operação de um relé ideal de sobrecorrente, o qual não opera enquanto a corrente for menor do que  $I_p$  (tempo de operação infinito). Porém se a magnitude da corrente exceder a corrente de *pick up* o relé

opera considerando apenas um tempo mínimo para fechar seus contatos, este relé é denominado relé instantâneo.

Um fluxograma muito simples como o da Figura 5 pode exemplificar a atuação deste tipo de relé instantâneo. Para o caso de um relé digital a ação “Definir valor de *pick up*”, mostrada neste fluxograma, é feita via *software*, em que o usuário define esse valor conforme sua aplicação. No passo seguinte - “Medir corrente” - o relé recebe o valor de corrente no momento atual e em seguida compara esse valor com o valor de *pick up* definido. Esta comparação está simbolizada no bloco amarelo da figura. Se o valor medido for maior que o valor de *pick up*, o relé opera, caso contrário o relé continua efetuando as medições de corrente.

A curva característica de operação de um relé desse tipo é mostrada na Figura 6, a qual ilustra claramente a operação instantânea deste tipo de dispositivo.

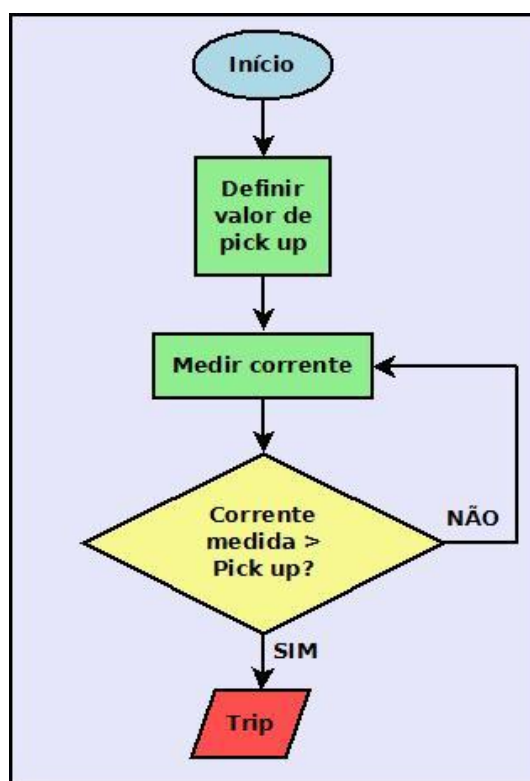


Figura 5: Fluxograma da atuação de um relé digital de sobrecorrente instantâneo.

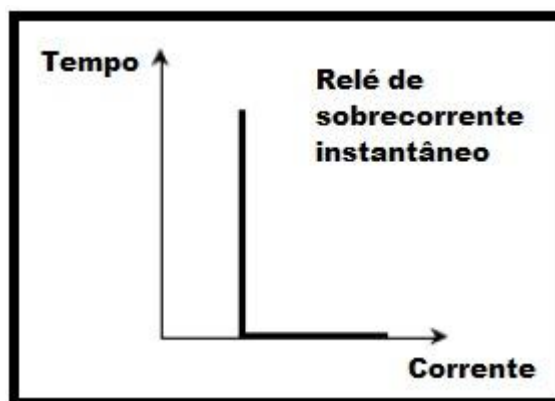


Figura 6: Curva característica de operação de um relé de sobrecorrente instantâneo.

#### 4.3.2 - O Relé de Sobrecorrente de Tempo Definido

Para este tipo de relé também deve ser estabelecido previamente um valor de *pick up* para a corrente e, além disso, também deve ser definido um tempo de atuação. Assim, uma vez ajustados os valores de corrente e de tempo, o relé só atuará quando as duas condições forem satisfeitas ao mesmo tempo, ou seja, quando a corrente ultrapassar o valor predeterminado e quando esse valor de corrente que ultrapassou permanecer por um tempo igual ou maior ao tempo predefinido.

A curva característica de operação desse tipo de relé é mostrada na Figura 7, onde pode ser observado o tempo  $t_1$ , que é o tempo ajustado.

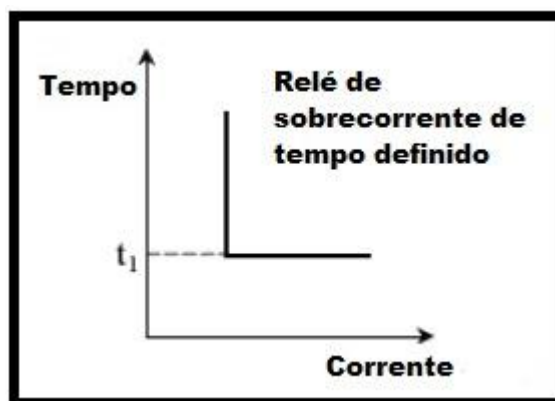


Figura 7: Curva característica de operação de um relé de sobrecorrente de tempo definido.

#### 4.3.3 - O Relé de Sobrecorrente de Tempo Inverso

Este tipo de relé, como o próprio nome já define, possui a característica de operar em tempo inversamente proporcional à magnitude da corrente de falta, ou seja, quanto

maior a corrente, menor será o tempo de atuação. Essa é a grande vantagem desse tipo de relé, já que possibilita maior flexibilidade de ajustes no sentido de garantir a coordenação e seletividade em comparação aos outros casos (instantâneo e tempo definido).

Um exemplo da forma da curva característica de operação deste tipo de relé pode ser observado na Figura 8. A classificação desse tipo de relé é feita de acordo com sua curva característica, a qual indica sua velocidade de operação. Basicamente a classificação dessas curvas é dada da seguinte forma [17]:

- Inversa
- Muito Inversa
- Extremamente Inversa

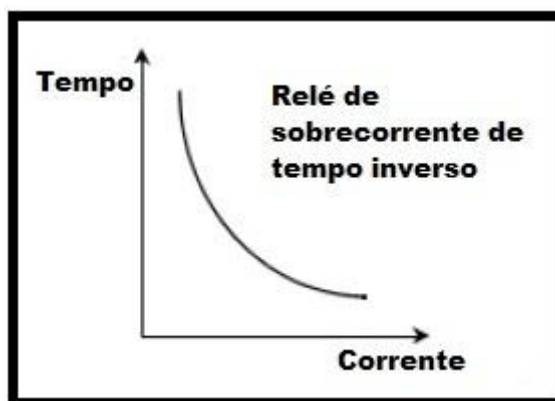


Figura 8: Curva característica de operação de um relé de sobrecorrente de tempo inverso.

Porém, mais adiante outros tipos de classificação de curvas serão apresentados, já que dependem da norma que esta classificação segue. No caso dos relés de tecnologia analógica, apenas uma dessas curvas poderia ser implementada, já que estes eram baseados em discos de indução. Assim se mais de uma curva fosse necessária, deveria ser usado outro relé com a curva de atuação desejada. Tal limitação foi eliminada com a tecnologia digital, pois diferentes curvas podem estar programadas em um mesmo relé digital.



## Capítulo 5

# Desenvolvimento da Função de Proteção

Neste capítulo será apresentada a função de proteção bem como a teoria envolvida para a sua criação e, além disso, uma explicação de como funciona a biblioteca na qual esta função foi inserida.

## 5.1 - A biblioteca *Open Relay*

*Open Relay* é o nome da biblioteca desenvolvida por Renato Machado Monaro no Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica - LSEE. Esta biblioteca foi desenvolvida usando a linguagem de programação C++, por isso a função de proteção desenvolvida neste trabalho também utilizou a linguagem em questão.

Esta biblioteca constitui-se de um *software* para um sistema embarcado seguindo os padrões PC104, o qual comparativamente seria uma das partes físicas de um relé digital em si, mas isso será explicado mais adiante, pois o objetivo deste tópico é explicar como funciona a biblioteca e tudo o que ela contém.

A biblioteca é constituída por seis grandes classes, cada uma com suas características funcionais e são definidas por Canais, Aquisição, Medição, Proteção, Oscilografia e Impressão. A forma como estas classes estão organizadas neste *software* é mostrada na Figura 9. É possível notar nesta figura que o relacionamento entre as classes é todo realizado pela classe Canais e dado através de relações de escrita e leitura, as quais ficarão mais claras à medida que as classes forem sendo explicadas.

### 5.1.1 - Canais

Os canais são os responsáveis por ser o meio de transmissão das informações entre as partes constituintes do *software* em questão (aquisição, medição, proteção, oscilografia e impressão), por isso todas as relações de escrita e leitura passam por ele, como a Figura 9 mostra.

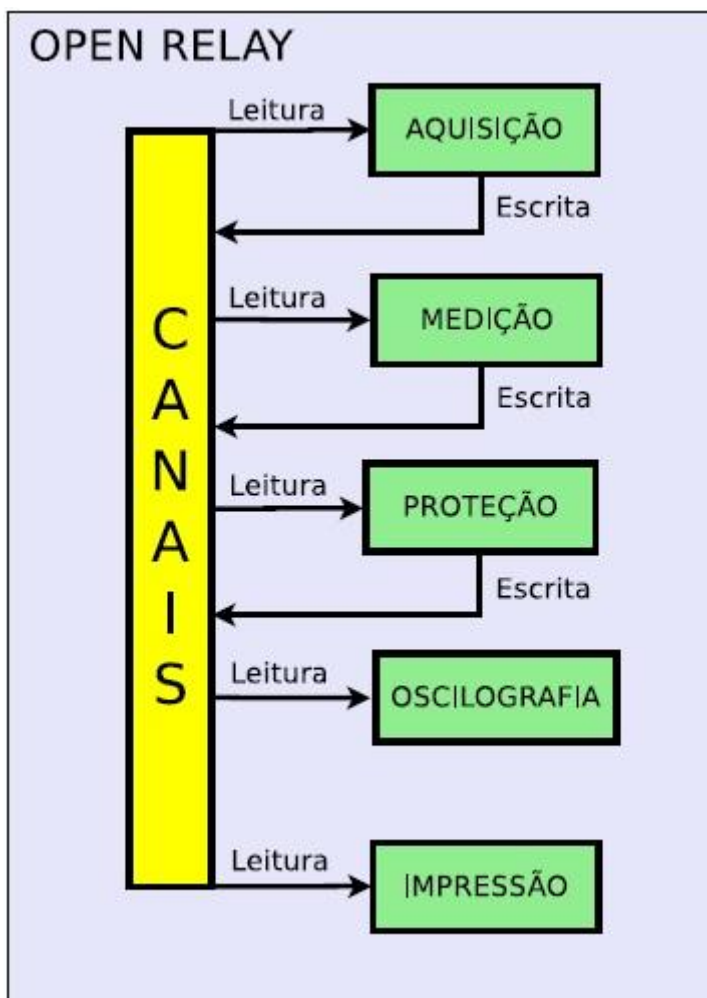


Figura 9: Organização da Biblioteca *Open Relay*.

Para auxiliar nessa atividade de escrita e leitura entre os blocos e os canais, esta biblioteca possui um *buffer* circular, onde os dados contidos nos canais serão armazenados. Seu funcionamento é muito simples: ao receber uma nova amostra, ele descarta a mais antiga existente, a qual ocupa a última posição no *buffer*. O seu tamanho é definido pelo usuário do *software*, para que este seja adequado à aplicação que se deseja.

Os canais podem ser do tipo digital ou analógico e, além disso, cada canal digital ou analógico pode ser de um dos três tipos a seguir:

1. Entrada
2. Saída



### 3. Interno

Portanto fazendo as combinações possíveis, há um total de seis tipos diferentes de canais. Quem define a quantidade e quais canais a serem utilizados é o usuário do *software* em questão.

#### 5.1.2 - Aquisição

Esta classe tem a função de obter os valores de entrada tanto de correntes quanto de tensões necessários para que o *software* realize as funções para a qual foi programado. A aquisição segue de acordo com uma taxa de amostragem, a qual é definida pelo usuário.

Nesta biblioteca, a aquisição pode ser dada de duas maneiras: através de *Hardware* ou de Arquivo. Porém, é importante dizer que o programa funcionará da mesma maneira tanto com os dados obtidos através de *hardware* quanto com aqueles obtidos de um arquivo, ou seja, a diferença constitui-se apenas na forma de aquisição.

Na aquisição em *Hardware*, os dados são provenientes de sinais de tensão e/ou corrente que passam por uma placa de condicionamento de sinal e em seguida pela placa de aquisição de dados do PC 104. A aquisição em Arquivo, como o próprio nome sugere, é feita utilizando-se um arquivo que contém todos os dados necessários para que o *software* possa realizar suas funções.

A relação da Aquisição com os Canais é de Leitura, pois a Aquisição “lê” os dados que há nos canais de aquisição e Escrita, pois também “escrevem” os dados em canais.

#### 5.1.3 - Medição

A classe de medição é responsável pelos cálculos necessários para transformar os valores dos sinais de entrada (tensão e corrente) em valores significativos ao sistema de proteção. Por exemplo, calcular o valor eficaz de um sinal de corrente ou tensão. Assim, essa classe possui algumas funções de medição cujos resultados são utilizados em outras partes desta biblioteca. As funções que estão presentes são as seguintes:

- Cálculo do valor eficaz (RMS);
- Cálculo da frequência de um sinal;

- Cálculo de potência monofásica e trifásica;
- Soma de valores contidos nos canais;
- Detecção de zero;
- Transformada Discreta de Fourier;

A medição também possui relações de leitura e escrita com a classe Canais. A leitura ocorre antes de a medição ser realizada, ou seja, é preciso “ler” as informações contidas no canal especificado para realizar a medição desejada. Assim que o cálculo foi feito, esse resultado é “escrito” em outro canal.

#### 5.1.4 - Proteção

A classe Proteção constitui o conjunto de todas as funções de proteção que a biblioteca *Open Relay* possui e, portanto, é dentro dele que a função desenvolvida neste trabalho se encontra.

Uma hierarquia de classes foi construída até chegar efetivamente nas funções de proteção. Essa hierarquia pode ser apresentada na seguinte estrutura:

### 1. PROTEÇÃO

#### 1.1 Diferencial

##### 1.1.1 – Diferencial

#### 1.2 Magnitude

##### 1.2.1 – Sobremagnitude

###### 1.2.1.1 – Sobretenção

###### 1.2.1.1.1 – Instantânea

###### 1.2.1.1.2 – Temporizada

###### 1.2.1.1.2.1 – Tempo definido

###### 1.2.1.1.2.2 – Tempo inverso

###### 1.2.1.2 – Sobrecorrente

###### 1.2.1.2.1 – Instantânea

#### 1.2.1.2.2 – Temporizada

##### 1.2.1.2.2.1 – Tempo definido

##### 1.2.1.2.2.2 – Tempo inverso

#### 1.2.2 – Submagnitude

##### 1.2.2.1 – Subtensão

##### 1.2.2.1.1 – Instantânea

##### 1.2.2.1.2 – Temporizada

##### 1.2.2.1.2.1 – Tempo definido

##### 1.2.2.1.2.2 – Tempo inverso

##### 1.2.2.2 – Subcorrente

##### 1.2.2.2.1 – Instantânea

##### 1.2.2.2.2 – Temporizada

##### 1.2.2.2.2.1 – Tempo definido

##### 1.2.2.2.2.2 – Tempo inverso

Esta hierarquia pode ser vista também na Figura 10. A função de proteção desenvolvida neste trabalho está localizada em vermelho tanto na hierarquia acima quanto na figura mostrada. Vê-se que existem diversas funções de proteção cada uma dentro de uma área específica. A proteção de sobrecorrente temporizada de tempo inverso segue o seguinte caminho: Proteção – Magnitude – Sobremagnitude – Sobrecorrente – Temporizada – Tempo inverso, sendo que apenas o último nível representa de fato a função de proteção em si. Os itens marcados em azul nesta hierarquia constituem as outras funções que a biblioteca possui.

A proteção possui, assim como as anteriores, as relações de leitura e escrita com o bloco Canais. A leitura é dada a partir dos canais que devem ser monitorados pela proteção e a escrita ocorre devido à “resposta” que a proteção deve dar, por exemplo, um sinal de *trip* em um canal exclusivo para esse fim.

A explicação de como a função de proteção foi desenvolvida será realizada em breve, ainda neste capítulo.

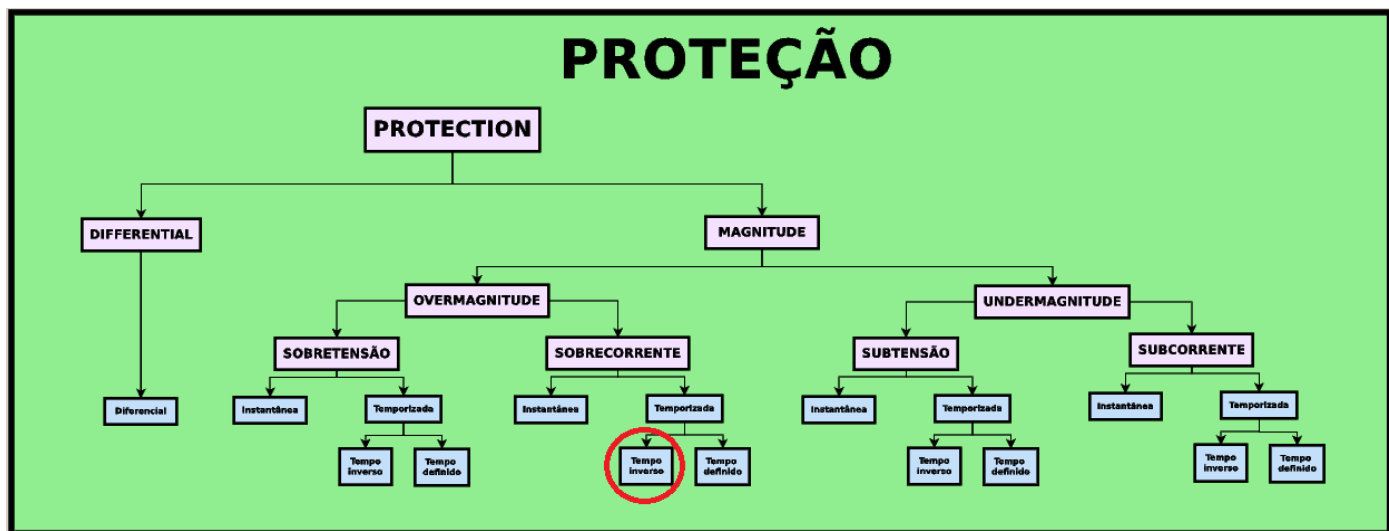


Figura 10: Hierarquia de classes da Proteção

### 5.1.5 - Oscilografia

A oscilografia em si consiste na medição de grandezas elétricas, principalmente tensão e corrente, ao longo do tempo. Ela constitui uma etapa relativamente importante, pois é através dela que os sinais monitorados são registrados em um arquivo de dados, para posteriormente serem estudados e podendo auxiliar na compreensão do que ocorreu durante o período registrado. Assim, esta é a classe desta biblioteca responsável por registrar os sinais que o usuário desejar.

Esta classe possui apenas a relação de leitura, já que ele apenas “lê” o que está no(s) canal(is) solicitado(s) pelo usuário e registra essa informação num arquivo de dados.

### 5.1.6 - Impressão

Esta é a classe mais simples do *Open Relay*, a qual tem o único fim de imprimir as informações que o usuário desejar visualizar. Assim como a oscilografia, esta classe só possui uma relação de leitura, já que também neste caso apenas ocorre a leitura das informações contidas no(s) canal(is) solicitado(s) pelo usuário.

### 5.1.7 – Fluxo do Programa

Para entender melhor como o programa funciona, uma explicação sobre o fluxo do programa será aqui apresentada. Tomando como base a Figura 11, o fluxo é dado da seguinte forma: primeiramente, antes de qualquer outra operação ser realizada, o programa realiza uma análise dos canais, ou seja, faz-se uma verificação entre os canais solicitados e os que realmente existem. O programa só continuará depois que todos os canais tiverem sido verificados. Depois dessa operação o programa segue o fluxo principal, o qual ocorre em tempo real no fluxograma.

Uma questão muito importante a destacar é o fato de que o programa possui três *Threads*, ou seja, três linhas de execução, como é possível ver no fluxograma, cada uma com sua respectiva cor – azul, verde e vermelho. No caso desta biblioteca, uma dessas três *Threads* é a principal, a qual está representada dentro do bloco azul. Ela é a principal pois as funções que estão contidas nela são vitais para o processo de releamento, por isso ela acontece em tempo real enquanto que as outras duas acontecem periodicamente. A *Thread* para salvar a oscilografia (cor verde no fluxograma) é ativada dentro da linha de execução principal quando existe oscilografia para ser salva, porém ela é apenas executada quando solicitada e após salvar a oscilografia, ela se encerrará e só ocorrerá novamente quando for ativada. A terceira *Thread* é ativada assim que a análise dos canais termina, porém ela é executada periodicamente. Quando chega o período de execução dessas duas *Threads* secundárias, do ponto de vista do usuário elas serão executadas simultaneamente com a *Thread* principal, por isso no fluxograma as três aparecem em paralelo umas às outras, porém é importante deixar claro que em sistemas com apenas uma unidade de processamento, elas serão executadas serialmente, ou seja, cada linha de execução é processada por vez.

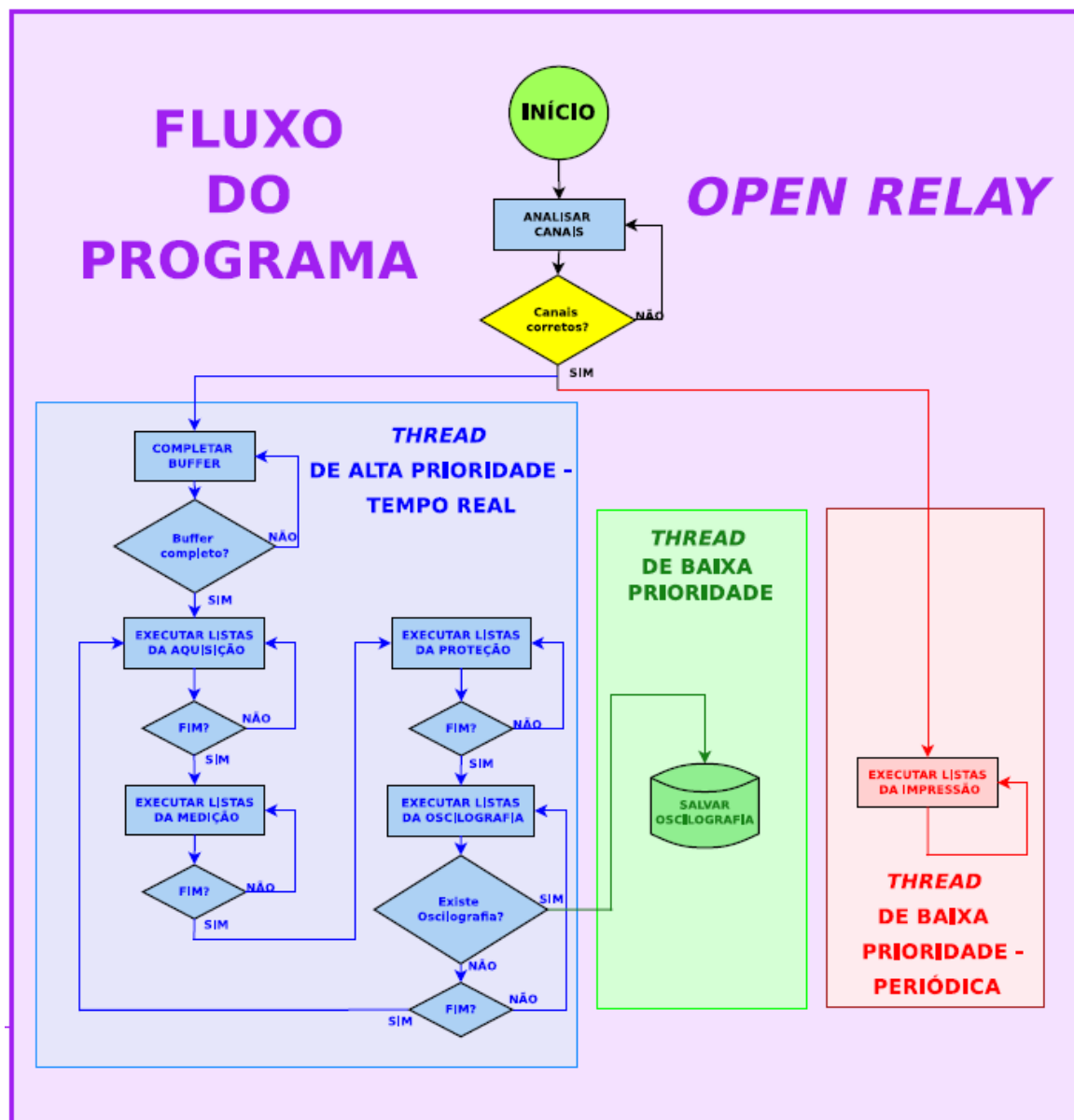


Figura 11: Fluxo do programa.

Dentro da *Thread* principal, primeiramente o *buffer* circular precisa estar completo para dar sequência ao programa, só então ocorre a aquisição, cuja lista - feita pelo usuário em seu programa - será totalmente executada, e enquanto essa lista não terminar o programa não continua. Encerrada a lista da aquisição, o programa parte para executar a lista de medições que o usuário determinou. Da mesma forma que o caso anterior, o programa só continuará quando toda essa lista for executada.

Seguindo adiante, o próximo passo é executar a lista de proteção (também definida pelo usuário). Terminada essa lista, a próxima a ser executada é a lista da oscilografia. Neste ponto, quando uma oscilografia precisa ser salva, dispara-se uma *Thread* e esta será

executada periodicamente. Terminada a lista de execução da oscilografia, o programa volta para a etapa da aquisição, fechando assim o laço do programa.

Com relação às *Threads* secundárias, uma delas é a de salvar a oscilografia. Ela é gerada assim que uma oscilografia precisa ser salva, e como o próprio nome sugere, sua única função é salvar a oscilografia. Assim que a oscilografia é salva, essa *Thread* se encerra e só iniciará novamente quando for ativada.

A outra *Thread* secundária é a de execução da lista de impressão, que é gerada assim que a análise de canais é feita, porém sua execução está limitada a certos períodos de tempo. Sua função é a impressão dos valores que o usuário determinou e diferentemente da anterior, ela não se encerra, pois fica dentro de um *loop* que se realiza periodicamente.

## 5.2 - A função de proteção de sobrecorrente temporizada

A função desenvolvida neste trabalho fez uso da teoria envolvida nos trabalhos de mestrado e de conclusão de curso, já citados anteriormente nas referências [11] e [12] respectivamente. Uma explicação a respeito da teoria aplicada, usando-se as referências acima apresentadas, encontra-se na seqüência.

### 5.2.1 - Teoria utilizada para desenvolver a função de proteção

A implementação da função de sobrecorrente temporizada em relés digitais se baseia no comportamento dos relés baseados em disco de indução, ou seja, a intenção é substituir digitalmente o deslocamento do disco de indução e para isso, é preciso ter claro o conceito de integração aplicado aos relés eletromecânicos. Para tanto, uma análise do deslocamento do disco será feita usando dois exemplos: um para o caso de corrente com magnitude constante e o outro com corrente variável.

#### 5.2.1.1 - Deslocamento do disco a partir de corrente com magnitude constante

Um relé de sobrecorrente temporizado, com um ajuste da corrente de *pick up*  $I_p$  e um dial de tempo  $D$ , tem uma curva de operação na qual o tempo de atuação é diretamente

proporcional à corrente aplicada. A característica de operação desse relé é mostrada no gráfico da Figura 12.

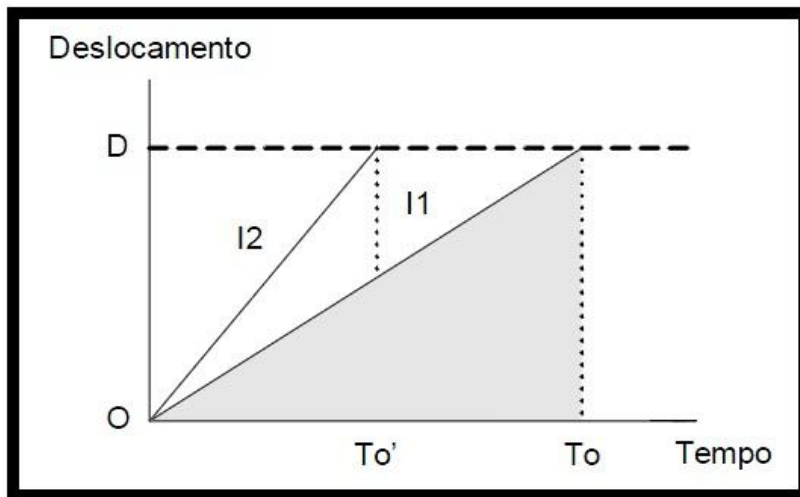


Figura 12: Curva de Tempo-Deslocamento para correntes de magnitude constante.

Neste gráfico, em  $t = 0$  s, o deslocamento do disco é zero. Assim que uma corrente se torna maior que o ajuste da corrente  $I_p$ , o disco começa a avançar em direção ao dial de tempo ajustado, seguindo a característica tempo-deslocamento mostrada na Figura 12. Pode-se notar que a corrente  $I_2$  é maior do que a corrente  $I_1$ , devido ao fato de o tempo de atuação  $T_o$  ser menor para  $I_2$  do que para  $I_1$ .

Ao final do percurso do disco, quando o dial de tempo é alcançado e o contato de saída se fecha, é enviado um sinal de disparo para o respectivo disjuntor. A condição de operação é representada pela seguinte equação:

$$\frac{I}{I_p} T_o = D \quad (5.1)$$

Assumindo que  $I/I_p = M$  é o múltiplo da corrente de *pick up*, a equação (5.1) pode ser normalizada como mostra a equação (5.2).

$$\frac{T_o}{D} = \frac{1}{M} \quad (5.2)$$

Agora, fazendo  $D/M = t(I)$  e substituindo em (5.2) tem-se:

$$\frac{T_o}{t(I)} = 1 \quad (5.3)$$

Tem-se que  $t(I)$  é função apenas da corrente aplicada e do dial de tempo ajustado, portanto basta conhecer o valor da corrente e o dial de tempo para determinar o tempo de atuação desse relé.



### 5.2.1.2 - Deslocamento do disco a partir de corrente com magnitude variável

Neste caso, a taxa de deslocamento do disco varia pois ocorre a variação da magnitude da corrente. Assim, para determinar o tempo de atuação, o relé precisa integrar os múltiplos segmentos de corrente até o momento em que o disco alcança o dial de tempo ajustado. A Figura 13 mostra as áreas que correspondem à integração dos três segmentos de corrente. A soma dessas áreas corresponde ao deslocamento total do disco.

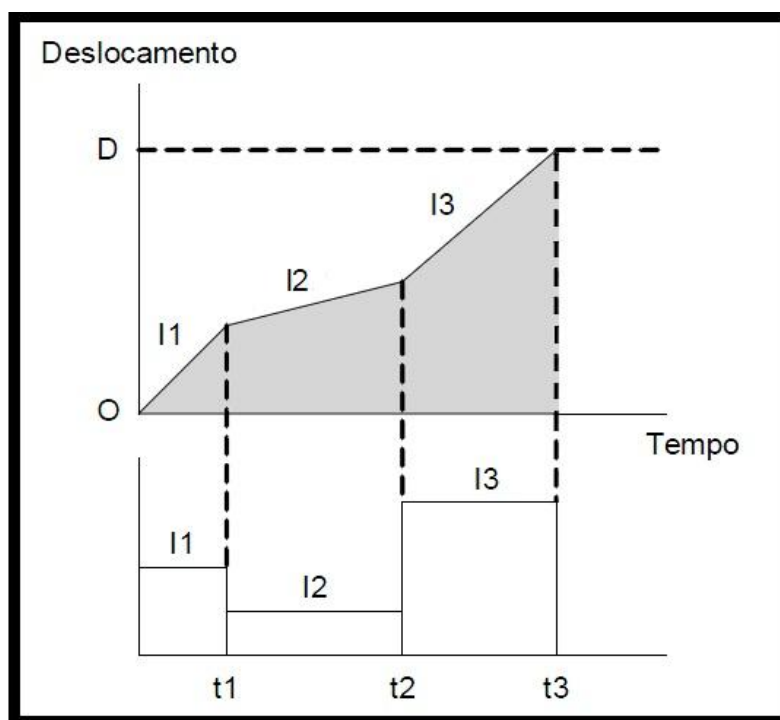


Figura 13: Curva de Tempo-Deslocamento para corrente de magnitude variável

Assim, no caso em que a magnitude da corrente varia, a equação de atuação será descrita da forma como mostrada em (5.4).

$$\int_0^{T_o} \frac{dt}{t(I)} = 1 \quad (5.4)$$

O exemplo apresentado nesta seção mostrou o efeito de variar a corrente, em passos discretos e constantes, no deslocamento do disco de um relé, o qual possui uma curva característica cujo tempo de atuação é diretamente proporcional à corrente aplicada. Em relés digitais de sobrecorrente com característica de tempo inverso, existe uma equação normalizada para o tempo de atuação, a qual depende do padrão que ela segue.

Neste trabalho, três diferentes normas foram utilizadas, mas essas equações serão vistas logo mais adiante.

Nesses relés digitais, o método para calcular o tempo de atuação, usando as equações normalizadas e de acordo com a corrente que entra, pode basear-se no princípio mostrado na equação (5.4), sendo que  $t(I)$  é uma dessas equações normalizadas. Esse princípio é mostrado na equação (5.5).

$$\int_0^{T_o} \frac{dt}{t(I)} > 1 \quad (5.5)$$

Essa equação tem o seguinte significado: em um ambiente de programação computacional, a função para cálculo da integral pode ser dada de algumas maneiras, por isso escolheu-se sua implementação através de um somador. Neste caso mostrado em (5.5), enquanto o resultado desse somador não for maior ou igual a um, o tempo de atuação ainda não foi alcançado, ou seja, o tempo de atuação será o mesmo tempo que este somador leva até atingir um valor maior do que um. Este somador é o que foi implementado no algoritmo deste trabalho. Uma explicação um pouco mais abrangente será dada em breve.

### 5.2.2 - A função desenvolvida

Como citado anteriormente, três normas foram utilizadas neste trabalho para as equações do tempo de atuação, essas equações foram baseadas no manual do relé G60 da *General Electric Industrial Systems* [18], são elas:

- IEEE C37.112-1996 [19] (equação 5.6);
- IEC 255-4 [20] equivalente a *British standard* BS142 [21] (equação 5.7);
- *General Electric Type* IAC [18] (equação 5.8);

As três fórmulas normalizadas para cada um dos padrões citados acima são respectivamente:

$$T = TDM \times \left[ \frac{A}{\left( \frac{I}{I_{pickup}} \right)^P - 1} + B \right] \quad (5.6)$$

onde:

$T$  = tempo de operação (em segundos)

$A, B, P$  = Constantes (ver Tabela 3);

$I$  = Corrente de entrada;

$I_{pickup}$  = Corrente de pick up;

$TDM$  = Time Dial Multiplier (multiplicador);

$$T = TDM \times \left[ \frac{K}{\left( \frac{I}{I_{pickup}} \right)^E - 1} \right] \quad (5.7)$$

onde:

$T$  = tempo de operação (em segundos)

$K, E$  = Constantes (ver Tabela 4);

$I$  = Corrente de entrada;

$I_{pickup}$  = Corrente de pick up;

$TDM$  = Time Dial Multiplier (multiplicador);

$$T = TDM \times \left[ A + \frac{B}{(I/I_{pickup}) - C} + \frac{D}{((I/I_{pickup}) - C)^2} + \frac{E}{((I/I_{pickup}) - C)^3} \right] \quad (5.8)$$

onde:

$T$  = tempo de operação (em segundos)

$A, B, C, D, E$  = Constantes (ver Tabela 5);

$I$  = Corrente de entrada;

$I_{pickup}$  = Corrente de pick up;

$TDM$  = Time Dial Multiplier (multiplicador);

Tabela 3: Tabela com os valores das constantes para a fórmula das Curvas IEEE

Tipo da Curva IEEE	A	B	P
IEEE <i>Extremely Inverse</i> (IEEE EI)	28,2	0,1217	2,0
IEEE <i>Very Inverse</i> (IEEE VI)	19,61	0,491	2,0
IEEE <i>Moderately Inverse</i> (IEEE MI)	0,0515	0,114	0,02

Tabela 4: Tabela com os valores das constantes para a fórmula das Curvas IEC / BS142

Tipo de Curva IEC / BS142	K	E
IEC <i>Curve A</i> (IEC A)	0,14	0,02
IEC <i>Curve B</i> (IEC B)	13,5	1,0
IEC <i>Curve C</i> (IEC C)	80,0	2,0
IEC <i>Short Inverse</i> (IEC SI)	0,05	0,04

Tabela 5: Tabela com os valores das constantes para a fórmula das Curvas GE Type IAC

Tipo de Curva GE Type IAC	A	B	C	D	E
IAC <i>Extremely Inverse</i> (IAC EI)	0,004	0,6379	0,62	17,872	0,2461
IAC <i>Moderately Inverse</i> (IAC MI)	0,09	0,8	0,1	-1,2885	79,586
IAC <i>Very Inverse</i> (IAC VI)	0,2	0,9	0,8	-0,4180	0,1947
IAC <i>Short Inverse</i> (IAC SI)	0,0428	0,0609	0,62	-0,0010	0,0221

Para desenvolver o algoritmo de proteção de sobrecorrente de tempo inverso, utilizou-se, como já dito anteriormente, o princípio da integral mostrada na equação (5.4), sendo que no lugar da integral, um somador foi utilizado. Além disso, no lugar de  $t(I)$ , as equações normalizadas foram utilizadas. Para isso, essas fórmulas foram implementadas no algoritmo, assim como todos os parâmetros para cada um dos onze tipos de curva mostrados anteriormente nas tabelas (três tipos de curva para a família de curvas IEEE e quatro para as outras duas famílias - IEC e IAC). No algoritmo desenvolvido, o usuário é capaz de escolher o tipo de curva, o multiplicador de tempo (TDM) e a corrente de *pick up*, já que esses três parâmetros constituem três variáveis no algoritmo.

A Figura 14 mostra de maneira muito simples um diagrama de blocos do algoritmo de proteção desenvolvido neste trabalho.

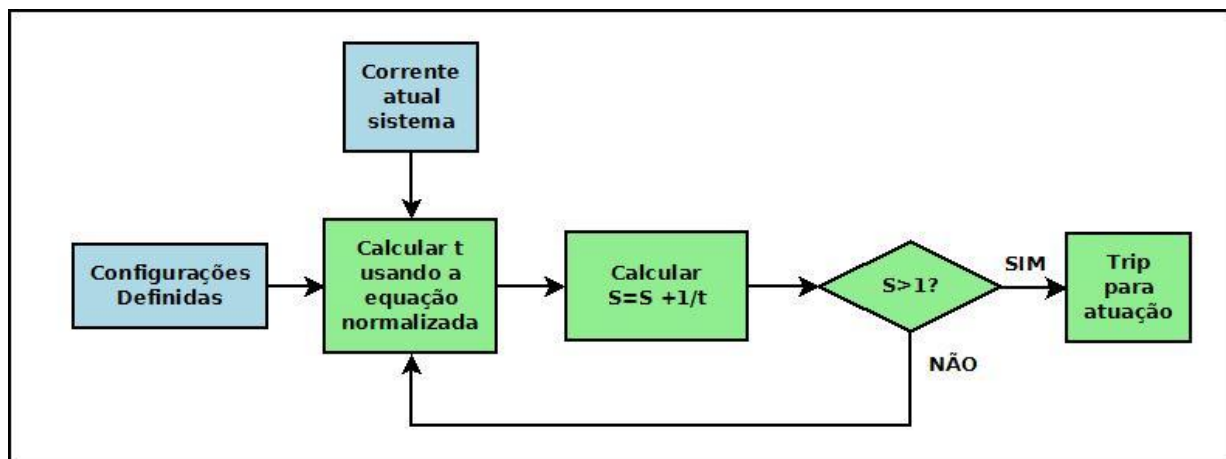


Figura 14: Diagrama de blocos mostrando simplificado o algoritmo de proteção desenvolvido.

No bloco “Configurações Definidas”, é de onde vêm os parâmetros definidos pelo usuário, são eles:

- Tipo da curva: nesta o usuário tem a opção de escolher entre os 11 tipos de curva possíveis. Escolhendo o tipo de curva, o usuário estará escolhendo, indiretamente, uma das fórmulas e seus respectivos parâmetros pré definidos (mostrados nas tabelas anteriores);
- TDM: o multiplicador, que será utilizado na fórmula para o cálculo do tempo  $t$ ;
- Corrente de *pick up*: também será utilizada na fórmula para o cálculo de  $t$ ;

O bloco “Corrente atual sistema” corresponde à corrente de entrada do sistema e que também será utilizada na fórmula do cálculo de  $t$ . O bloco “Calcular  $t$  usando a equação normalizada” faz o cálculo do tempo  $t$  de acordo com uma das equações normalizadas mostradas em (5.6), (5.7) e (5.8), com as configurações definidas e com a corrente de entrada do sistema. No próximo bloco, a variável  $S$  corresponde ao Somador. Esta variável começa em zero, recebe o valor inverso de  $t$ , já que é preciso somar-se os valores inversos de  $t$  até que esta soma atinja um valor maior do que um, como já explicado anteriormente. O bloco seguinte realiza a comparação, se o valor for menor do que um, o algoritmo volta para o cálculo de  $t$  baseando-se na nova corrente de entrada e nas configurações pré definidas, com isso o algoritmo continua realizando esse ciclo até que o valor do somatório seja maior do que um. Quando o valor do somatório é maior do que um, um sinal de *trip* indicando a atuação é ativado.

Esse algoritmo foi implementado em linguagem C++, porém não é necessário entrar nos méritos da programação em si. O importante é mostrar o que o algoritmo implementado

executa as funções explicadas anteriormente e apresentadas no diagrama de blocos da Figura 14.

## Capítulo 6

# Testes e Resultados

Devido ao fato de a biblioteca *Open Relay* possibilitar que a aquisição seja feita de duas maneiras, através de arquivo ou de *hardware*, os ensaios realizados para testar a função de proteção desenvolvida neste trabalho foram divididos em dois tipos de simulação baseados nessas características:

1. A primeira simulação foi feita utilizando-se a aquisição através de um arquivo de dados. Ela foi realizada apenas computacionalmente, utilizando o *software* que continha a função de proteção e outros *softwares* que se fizeram necessários, para gerar dados, por exemplo. Maiores detalhes sobre este teste serão dados em breve.
2. A segunda simulação foi realizada utilizando-se a aquisição através de *hardware*. Esta simulação envolveu diversos dispositivos, os quais serão apresentados em breve juntamente com todas as outras informações referentes a esse teste. Neste segundo tipo de teste, foram realizados na verdade dois testes, pois eles se deram utilizando a função de proteção desenvolvida e a mesma função de um relé digital disponível comercialmente. Isso foi feito para que fosse possível comparar os resultados e com isso, dar uma idéia muito clara e mais realista do desempenho da função desenvolvida.

## 6.1 – Teste Computacional

Primeiramente, é preciso apresentar as ferramentas que foram utilizadas para a realização deste teste. Utilizou-se um computador cujo sistema operacional é o *Linux*. Os *softwares* disponíveis neste computador que foram utilizados são basicamente:

- O próprio *software Open Relay*, o qual contém a função de proteção e todas as bibliotecas necessárias para compilar e testar a função.
- O *Octave*, que é um *software* funcionalmente similar ao *Matlab*.

Este foi o primeiro teste realizado com a função de proteção desenvolvida e o que permitiu a primeira impressão sobre o desempenho da mesma. Como o *software* não possui uma interface para que as configurações do relé fossem alteradas, foi preciso criar um arquivo com extensão *‘.cpp’*, que era salvo e compilado cada vez que era alterado. O arquivo criado era do tipo mostrado na Figura 15.

```
1 #include "relay.h"
2
3 int main(int argc, char* argv[]){
4 Channel<digital> CH_TRIP("Trip Sobrecorrente Temporizada",OUTPUT);
5 Channel<analogic> CH_IA("Corrente na fase A",INPUT,1,1);
6 Channel<analogic> CH_IA_RMS ("Corrente RMS da fase A");
7
8 FileAcquisition Acq(argv[1],960,9600);
9 Acq.Join_Channel(&CH_TRIP);
10 Acq.Join_Channel(&CH_IA);
11 Acq.Join_Channel(&CH_IA_RMS);
12
13 RMS Eficaz_IA(&CH_IA,&CH_IA_RMS);
14
15 InverseTimeOverCurrent SCorrenteTemporizada(&CH_IA_RMS, &CH_TRIP, 2, 1.0, IEC_A);
16
17 Oscillography Osc(&CH_TRIP,500,50,60,"/tmp/");
18 Osc.Join_Channel(&CH_IA);
19 Osc.Join_Channel(&CH_IA_RMS);
20 Osc.Join_Channel(&CH_TRIP);
21
22 Relay SobrecorrenteTemporizada;
23 SobrecorrenteTemporizada.Join(&Acq);
24 SobrecorrenteTemporizada.Join(&Tela);
25 SobrecorrenteTemporizada.Join(&Eficaz_IA);
26 SobrecorrenteTemporizada.Join(&SCorrenteTemporizada);
27 SobrecorrenteTemporizada.Join(&Osc);
28
29 SobrecorrenteTemporizada.List();
30 SobrecorrenteTemporizada.Execute();
31 }
```

Figura 15: Exemplo de arquivo utilizado para configurar o relé

As configurações necessárias a fazer, por ordem de aparição na figura acima, são basicamente as seguintes:

- Definir os canais que serão utilizados (linhas 4, 5 e 6);
- Definir o caminho para o arquivo de dados a serem utilizados, a taxa de amostragem e o tamanho do *buffer* respectivamente nessa ordem (linha 8);
- Definir o valor de *pick up* da corrente, o dial de tempo e a curva que será utilizada, também nessa ordem (linha 15);



- Definir o número de ciclos de pré e de pós falta, a frequência do sistema e o local onde será salva a oscilografia (linha 17).

Além desse arquivo, foi criado também um *script* do *Octave* para gerar arquivos com as correntes de falta de acordo com as situações escolhidas mostradas na Tabela 6.

Tabela 6: Situações escolhidas para realizar o teste

Nº Teste	Curva	Dial	$I_{pick\ up} (A)$	$I_{falta} (A)$	$I_{falta}/I_{pick\ up}$
1	IEEE EI	0,5	10	20	2
2	IEEE EI	4,00	10	60	6
3	IEEE VI	1,00	50	200	4
4	IEEE VI	8,00	50	400	8
5	IEEE MI	2,00	100	400	4
6	IEEE MI	6,00	100	800	8
7	IEC A	0,05	10	20	2
8	IEC A	1,00	25	100	4
9	IEC B	0,10	50	300	6
10	IEC B	0,80	100	800	8
11	IEC C	0,20	10	20	2
12	IEC C	0,40	25	100	4
13	IEC SI	0,40	50	300	6
14	IEC SI	0,60	100	800	8
15	IAC EI	0,50	10	20	2
16	IAC EI	10,00	25	100	4
17	IAC VI	1,00	50	300	6
18	IAC VI	8,00	100	800	8
19	IAC I	4,00	10	20	2
20	IAC I	6,00	25	100	4
21	IAC SI	1,00	50	300	6
22	IAC SI	8,00	100	800	8

Para a escolha dessas situações, primeiramente definiu-se que dois testes para cada tipo de curva deveriam ser feitos, o que culminou em 22 situações, já que existem 11 tipos de curvas. Então determinou-se que as relações  $I_{falta}/I_{pickup}$  utilizadas para todas as curvas seriam 2, 4, 6 e 8. Em seguida, foi a vez de escolher o *Dial* para cada uma dessas curvas tendo em vista obter pontos diferentes entre si para cada tipo de curva. A escolha

tanto da relação quanto do *Dial* se deu também tendo o conhecimento prévio dos resultados esperados para cada curva, pois estes eram fornecidos no manual do relé comercial (de acordo com tabela de constantes e a fórmula fornecida para cada tipo de curva). Além disso, definiu-se os valores para a corrente de *pick up* a serem utilizados e estes foram quatro: 10A, 25A, 50A e 100A. Por fim, conhecendo os valores de *pick up* e as relações de  $I_{falta}/I_{pickup}$  para cada curva, calcula-se a corrente de falta, com isso obteve-se uma faixa de 20 A até 800 A.

O arquivo gerado pelo *Octave* com os dados de corrente de falta possui duas colunas, a primeira é destinada ao tempo e a segunda é destinada à corrente associada àquele tempo. Nesse arquivo, existe um número de ciclos de pré-falta e um número de ciclos de pós-falta.

Cada caso da Tabela 6 foi simulado utilizando linhas de comando no terminal do computador. A cada simulação, as configurações do relé eram alteradas, salvas e compiladas, conforme as características do teste em questão. Os dados utilizados para medir o tempo de atuação foram gerados e salvos em um arquivo numa pasta no computador pela função de oscilografia. Esse arquivo continha uma coluna com o tempo, na outra com o canal de *trip*, o qual permanecia em 0 (zero) enquanto a proteção não atuasse. Uma outra coluna mostrava a corrente em questão. Bastou então realizar uma subtração entre o instante em que a proteção atuou (o valor do canal de *trip* passou de 0 para 1) e o instante em que a falta surgiu (momento em que a corrente assumiu o valor de falta para o caso de teste em questão), ambos mostrados na oscilografia.

Assim, foi possível obter os resultados mostrados na Tabela 7 para este primeiro teste. Esta tabela mostra o número do teste (coluna 1), o tipo da curva testada (coluna 2), o *Dial* e a relação de correntes (colunas 3 e 4 respectivamente), o valor esperado e o testado para o tempo de atuação (colunas 5 e 6 respectivamente) e por fim está o erro em porcentagem (coluna 7).

Analisando essa tabela, é possível notar que o erro porcentual entre o valor testado e o esperado não constitui um valor elevado. Os maiores erros em porcentagem, por volta de 1%, se deram quando os tempos de atuação eram muito pequenos, isso se explica pois qualquer atraso que se tenha em alguma das etapas do algoritmo, por menor que seja, faz uma pequena diferença nesses baixos tempos. No entanto, o erro porcentual médio em todo este teste fica por volta de 0,35%, o que caracteriza um erro baixo. Além disso, analisando apenas o erro absoluto dado em módulo, vemos que os erros são praticamente irrelevantes, ou seja, não influenciam muito no desempenho da função. Esse bom desempenho no primeiro teste proporcionou uma garantia inicial de que ela foi

implementada corretamente, e a partir de então seria possível iniciar o teste em *hardware*. Além disso, o teste computacional foi um passo muito importante para a validação da função de proteção desenvolvida.

Tabela 7: Resultados do primeiro teste

Nº Teste	Curva	Dial	$I_{pickup}$ (A)	$I_{falta}$ (A)	$I_{falta}/I_{pickup}$	Valor esperado (s)	Valor testado (s)	Erro (%)	Erro Absoluto
1	IEEE_EI	0,5	10	20	2	4,761	4,766666	0,119009	0,005666
2	IEEE_EI	4,00	10	60	6	3,710	3,714583	0,123531	0,004583
3	IEEE_VI	1,00	50	200	4	1,798	1,804166	0,342937	0,006166
4	IEEE_VI	8,00	50	400	8	6,418	6,420833	0,044141	0,002833
5	IEEE_MI	2,00	100	400	4	3,892	3,893749	0,044938	0,001749
6	IEEE_MI	6,00	100	800	8	7,960	7,962500	0,031407	0,002500
7	IEC_A	0,05	10	20	2	0,501	0,506249	1,047705	0,005249
8	IEC_A	1,00	25	100	4	4,980	4,983333	0,066928	0,003333
9	IEC_B	0,10	50	300	6	0,270	0,272916	1,080000	0,002916
10	IEC_B	0,80	100	800	8	1,543	1,545833	0,183603	0,002833
11	IEC_C	0,20	10	20	2	5,333	5,339583	0,123439	0,006583
12	IEC_C	0,40	25	100	4	2,133	2,139583	0,308626	0,006583
13	IEC_SI	0,40	50	300	6	0,269	0,270833	0,681413	0,001833
14	IEC_SI	0,60	100	800	8	0,346	0,347916	0,553757	0,001916
15	IAC_EI	0,50	10	20	2	0,749	0,756249	0,967824	0,007249
16	IAC_EI	10,00	25	100	4	3,555	3,560416	0,152349	0,005416
17	IAC_VI	1,00	50	300	6	0,227	0,229166	0,954185	0,002166
18	IAC_VI	8,00	100	800	8	1,490	1,491666	0,111812	0,001666
19	IAC_I	4,00	10	20	2	2,997	3,002082	0,169570	0,005082
20	IAC_I	6,00	25	100	4	2,656	2,658333	0,087839	0,002333
21	IAC_SI	1,00	50	300	6	0,054	0,054166	0,307407	0,000166
22	IAC_SI	8,00	100	800	8	0,409	0,408333	0,163081	0,000667

## 6.2 - Testes em *hardware* usando PC104 e relé comercial

Tendo realizado o teste computacional e analisado seu resultado, foi possível partir para o teste em *hardware* com a plataforma PC 104 o qual foi bem mais aprofundado que o anterior e tem o objetivo de proporcionar maior confiabilidade e garantir a validação do modelo desenvolvido. Além dos testes na plataforma PC 104 foram realizados os mesmos testes com um relé comercial, para que os resultados pudessem ser comparados. A metodologia dos testes é a mesma e por isso será explicada apenas uma vez.

Os materiais utilizados no laboratório para realizar os testes com o PC104 e o relé comercial estão apresentados a seguir.

## 1. Teste usando PC104:

- Plataforma PC 104, a qual continha o *software* com a função de proteção desenvolvida;
- Caixa simuladora de sistemas de potências *F6150* da *Doble Engineering*;
- Computador contendo o *software ProTest* de simulação para a caixa da *Doble*;
- Caixa de condicionamento de sinais;
- Um monitor e um teclado para ligar ao “Cubo PC104”;

## 2. Teste usando relé comercial:

- O relé T60 da *GE Industrial Systems*;
- Caixa simuladora de sistemas de potências *F6150* da *Doble Engineering*;
- Computador contendo o *software ProTest* de simulação para a caixa da *Doble* e o *software EnerVista* do relé T60, para realizar alterações na configuração do mesmo.

A caixa de condicionamento de sinais converte a corrente em sua entrada em um sinal de tensão em sua saída. Um sensor de efeito *Hall* foi utilizado para realizar essa conversão e, além disso, promover o isolamento com o sistema. Um amplificador operacional realiza o ajuste de ganho e *offset* e um filtro ativo é utilizado para evitar o efeito *Aliasing*.

PC104 (ou PC/104) é um padrão de computador embarcado controlado pelo *PC/104 Consortium* que define um padrão de formato e de barramento. O PC104 é destinado a aplicações de computação embarcada onde se depende de uma aquisição de dados confiáveis em ambientes extremos. A plataforma PC 104, é um gabinete que conta com o seguinte conjunto de placas PC104:

- Uma placa de aquisição de dados: taxa de amostragem máxima de 100kS/s; 16 canais de entrada analógica em modo comum ou 8 em modo diferencial; 8 canais de entrada/saída digital; *Buffer* de 512 amostras.
- Uma placa de processamento: processador *AMD Geode LX 800*; 512MB de Memória RAM DDR333; 1 GB de armazenamento em cartão; placa de rede *Ethernet* 10/100 Mb/s; 4 portas USB 2.0; 2 portas seriais RS232; 1 porta paralela.

- Fonte de energia: potência de saída 50W; tensão de entrada variável entre 6V e 40V; saídas em 5V e 12V.

A plataforma PC104 utilizada no teste pode ser visualizada na Figura 16.

O equipamento de simulação de sistemas de potência *F6150* da *Doble Engineering* utilizado possui três canais de saída de tensão e três corrente. Nestes testes apenas uma saída de corrente foi utilizada, já que a simulação se deu para a função de sobrecorrente em uma fase. Outro recurso deste equipamento utilizado foi uma de suas entradas lógicas. Estas entradas lógicas são capazes de monitorar os contatos de um relé e com esse monitoramento ela pode fornecer o tempo de atuação do relé, o qual é o objetivo de estudo dos testes. A Figura 17 mostra esse equipamento da *Doble*.



Figura 16: Plataforma PC104

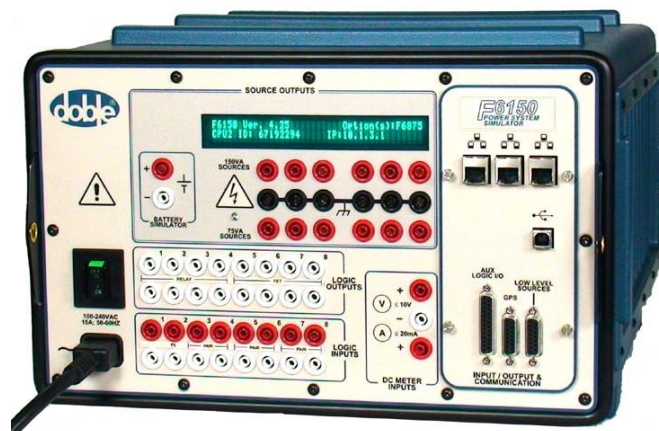


Figura 17: Equipamento de simulação de sistemas de potência da *Doble*

Para utilizar esse equipamento, fez-se necessário o uso do *software ProTest*, o qual possui comunicação com a “caixa” da *Doble*. Este *software* promovia o ajuste da intensidade das correntes que seriam utilizadas no teste e além disso, a partir do monitoramento citado anteriormente, ele também fornecia o tempo de atuação do relé. A Figura 18 mostra uma das telas deste *software*. Nesta figura, existem quatro partes destacadas em cores diferentes, as quais são as mais importantes para a realização das simulações usando o *software*. A área em preto corresponde à fonte do sinal que será utilizado. No caso do teste em questão, foi utilizado um sinal de corrente. A intensidade dessa corrente é alterada na aba destacada em verde na figura. Na área azul o valor do tempo de atuação da função é mostrado assim que o teste é realizado. Finalmente, a área em vermelho indica o botão que deve ser apertado para que o teste se inicie.

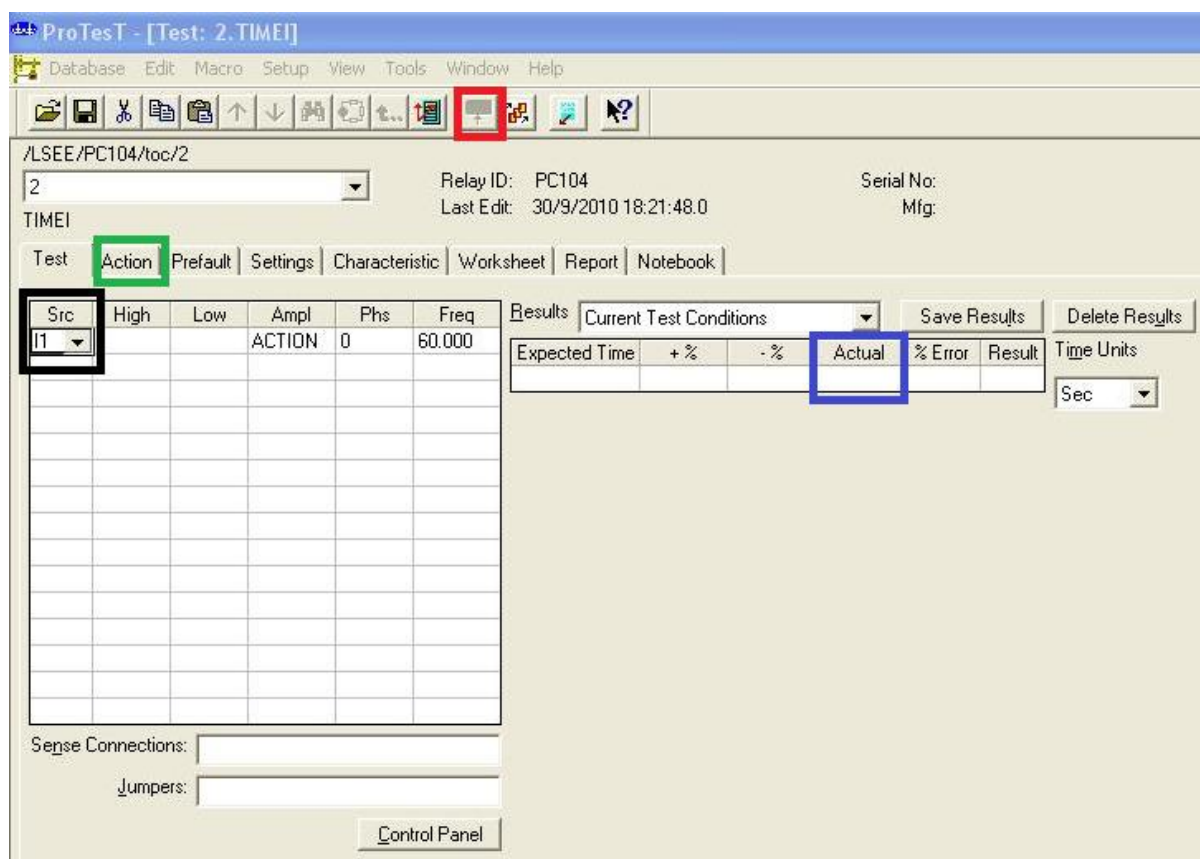


Figura 18: Uma das telas de operação do *software ProTest*.

Este *software* apresenta também diversos tipos de testes que podem ser realizados. Dentre eles, o teste escolhido foi o “*TIMEI*”, o qual fornece o tempo de atuação para a função de proteção em questão. Esta escolha se deu a partir da análise do manual do equipamento da *Doble*.

O outro equipamento utilizado foi uma caixa de condicionamento de sinais, a qual também foi desenvolvida no LSEE. Ela possui dez circuitos de condicionamento de corrente e oito para condicionamento de tensão. Ela foi utilizada pois é necessário adequar o sinal da corrente de entrada para um nível elétrico compatível com a placa de aquisição de dados do PC104. Esta caixa, funcionalmente, constitui uma das partes do Módulo de Interface (já discutido anteriormente) do relé digital, porém essa parte não está integrada ao PC104, como acontece nos relés digitais. A caixa de condicionamento de sinal pode ser visualizada na Figura 19. Nesta figura, em amarelo estão os circuitos de condicionamento de tensão e em vermelho, os de corrente.



Figura 19: Caixa de condicionamento de sinais.

Outro equipamento utilizado nesses testes foi o relé T60 da *GE Industrial Systems*. Este foi utilizado no lugar do G60 em virtude da sua disponibilidade no LSEE e devido ao fato deste relé possuir a mesma função de proteção de sobrecorrente de tempo inverso que o relé G60, também da *GE Industrial Systems*, possui.

A Figura 20 mostra um relé T60 muito similar ao utilizado nos testes no laboratório.





Figura 20: Relé T60 da GE Industrial Systems.

Para alterar as configurações do relé T60, assim como no caso da caixa da *Doble*, há um *software* chamado *EnerVista*. A Figura 21 mostra sua interface. Neste *software* são alteradas as configurações do relé tais como o tipo da curva, o *dial* e o valor de *pick up*, os quais foram marcados em vermelho nesta figura.

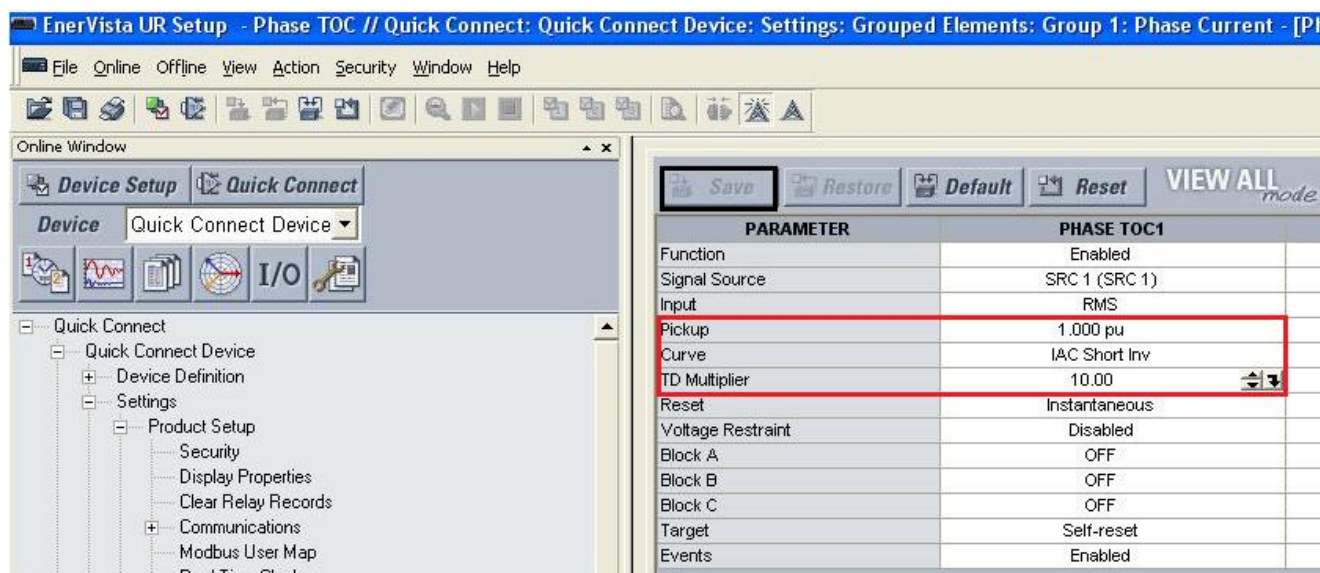


Figura 21: Interface do *software* do relé T60.

Como apenas uma fase era utilizada, as outras foram desabilitadas. Além disso habilitou-se a proteção de sobrecorrente de tempo inverso, e desabilitou-se todas as outras funções que o relé possui.



Para realização de ambos os testes, foi necessário montar dois esquemas diferentes. O primeiro deles compreende o teste com o PC 104 e é apresentado na Figura 22. Nesta figura estão mostradas as ligações entre os equipamentos descritos necessárias para realizar os testes para este caso. O monitor e o teclado ligados ao PC104 servem para atualizar as configurações do relé (curvas, dial e *pick up*). O sinal para a corrente de falta é gerado pelo equipamento da *Doble*, essa corrente deve passar pela caixa de condicionamento. Após passar pelo condicionamento o sinal chega ao PC104, onde a função desenvolvida está armazenada. Ela irá interpretar a situação e mandará um sinal lógico de atuação para a saída digital do PC104, essa saída está ligada na entrada lógica da caixa da *Doble*, onde ela é monitorada. Nessa caixa, assim que a corrente de falta é injetada na sua saída, dispara-se um contador de tempo, o qual irá parar assim que for detectado um sinal na entrada lógica que monitora os contatos do relé. A caixa *Doble* está ligada a um computador contendo o *software ProTest*, onde as correntes de falta são ajustadas - por isso a seta saindo do computador e indo em direção à caixa. Além disso, assim que o contador de tempo pára, esse valor de tempo medido é mandado para o computador - por isso a seta indicando na direção do computador.

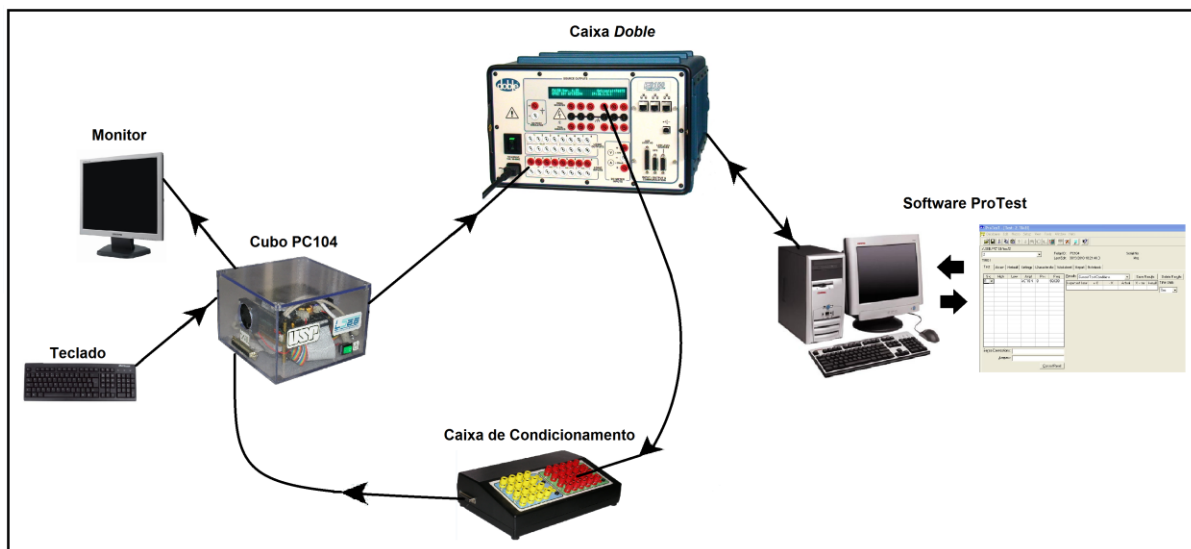


Figura 22: Sistema montado para realizar o teste com o "Cubo PC104" contendo a função desenvolvida

Para o teste com o relé T60, o sistema da Figura 23 foi montado. Neste caso, ao invés do conjunto PC104 – caixa de condicionamento de sinais – monitor – teclado tem-se o relé T60 e seu *software EnerVista*. O procedimento é muito similar ao descrito para o primeiro sistema. A corrente de falta é gerada pela caixa *Doble*, a partir do *software*

*ProTest*. Esta corrente é injetada diretamente ao relé T60, o qual possui seu próprio módulo de interface. Assim, com a função de proteção contida em sua memória, o relé analisa a situação e promove a atuação. Uma saída digital que mostra o estado dos seus contatos está ligada à entrada lógica da caixa de simulação, a qual faz o monitoramento desses contatos. A maneira de adquirir o tempo de atuação é a mesma descrita no primeiro sistema e o valor também aparece no *ProTest*. Outra diferença com relação ao sistema descrito anteriormente é o uso do *software EnerVista* para alterar as configurações do relé.

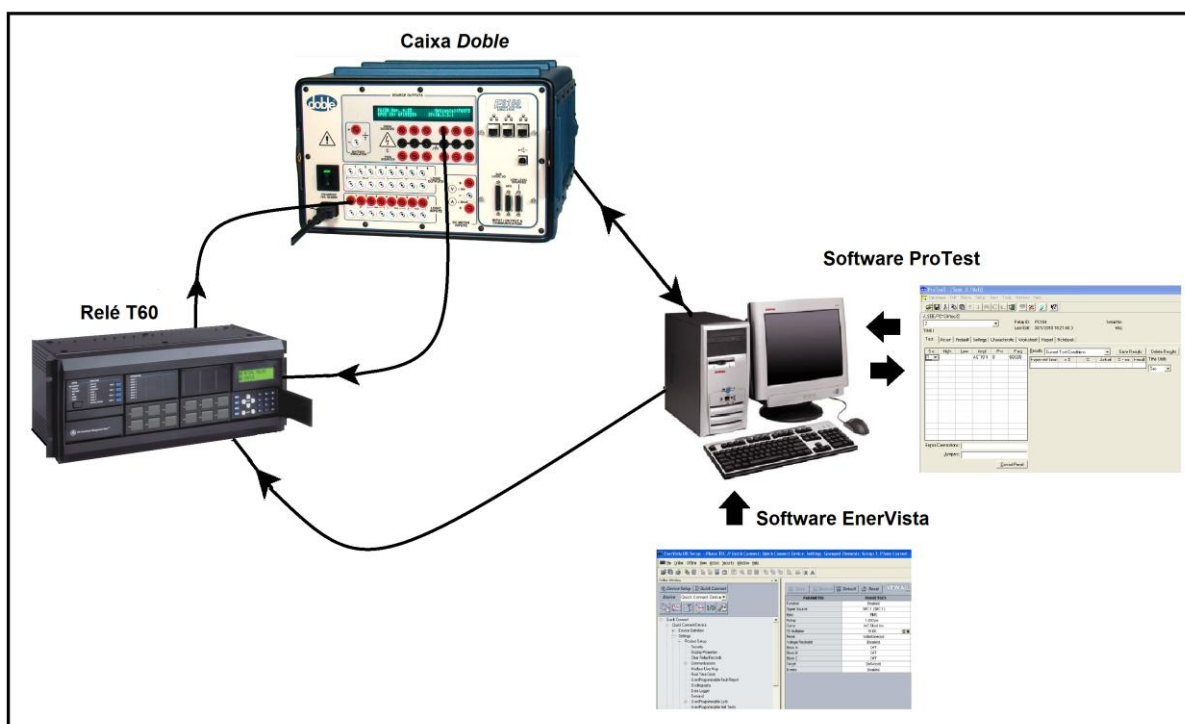


Figura 23: Sistema montado para realizar o teste com o relé T60 da GE.

Foram realizados dois tipos de testes usando o primeiro sistema descrito e em seguida os mesmos testes foram repetidos para o segundo sistema. As explicações sobre os dois tipos de teste encontram-se na sequência.

### 6.2.1 – Primeiro Teste

Este primeiro teste caracterizou-se basicamente como mostram as Tabelas 8, 9 e 10. Cada teste foi numerado, como mostra a primeira coluna e além disso todas as famílias de curvas (IEEE, IEC e IAC) são mostradas na segunda coluna das tabelas. Cada tipo de

curva foi testado cinco vezes e com diferentes *Dials*, como se pode observar na terceira coluna das tabelas.

Tabela 8: Tabela para testes com as curvas do padrão IEEE

Nº Teste	Curva	Dial	$I_{pickup}$ (pu)	$I_{falta}$ (pu)	$I_{falta}/I_{pickup}$	Valor Esperado (s)
1	IEEE EI	0,5	1	1,5	1,5	11,341
2	IEEE EI	2,0	1	3	3	7,293
3	IEEE EI	6,0	1	5	5	7,780
4	IEEE EI	10,0	1	7	7	7,092
5	IEEE EI	4,0	1	9	9	1,897
6	IEEE VI	0,5	1	1,5	1,5	8,090
7	IEEE VI	2,0	1	3	3	5,885
8	IEEE VI	6,0	1	5	5	7,849
9	IEEE VI	10,0	1	7	7	8,995
10	IEEE VI	4,0	1	9	9	2,945
11	IEEE MI	0,5	1	1,5	1,5	3,220
12	IEEE MI	2,0	1	3	3	4,864
13	IEEE MI	6,0	1	5	5	10,130
14	IEEE MI	10,0	1	7	7	14,117
15	IEEE MI	4,0	1	9	9	5,041

Tabela 9: Tabela para testes com as curvas do padrão IEC (BS142)

Nº Teste	Curva	Dial	$I_{pickup}$ (pu)	$I_{falta}$ (pu)	$I_{falta}/I_{pickup}$	Valor Esperado (s)
16	IEC A	0,05	1	2	2	0,501
17	IEC A	0,20	1	4	4	0,996
18	IEC A	0,40	1	6	6	1,535
19	IEC A	0,60	1	8	8	1,978
20	IEC A	1,00	1	10	10	2,971
21	IEC B	0,05	1	2	2	0,675
22	IEC B	0,20	1	4	4	0,900
23	IEC B	0,40	1	6	6	1,080
24	IEC B	0,60	1	8	8	1,157
25	IEC B	1,00	1	10	10	1,500
26	IEC C	0,05	1	2	2	1,333
27	IEC C	0,20	1	4	4	1,067
28	IEC C	0,40	1	6	6	0,914
29	IEC C	0,60	1	8	8	0,762
30	IEC C	1,00	1	10	10	0,808
31	IEC SI	0,05	1	2	2	0,089
32	IEC SI	0,20	1	4	4	0,175
33	IEC SI	0,40	1	6	6	0,269
34	IEC SI	0,60	1	8	8	0,346
35	IEC SI	1,00	1	10	10	0,518

Tabela 10: Tabela para testes com as curvas do padrão *GE Type IAC*

Nº Teste	Curva	Dial	$I_{pickup}$ (pu)	$I_{falta}$ (pu)	$I_{falta}/I_{pickup}$	Valor Esperado (s)
36	IAC EI	0,5	1	2	2	0,749
37	IAC EI	2,0	1	4	4	0,711
38	IAC EI	4,0	1	6	6	0,744
39	IAC EI	6,0	1	8	8	0,743
40	IAC EI	10,0	1	10	10	0,926
41	IAC VI	0,5	1	2	2	0,656
42	IAC VI	2,0	1	4	4	0,687
43	IAC VI	4,0	1	6	6	0,906
44	IAC VI	6,0	1	8	8	1,117
45	IAC VI	10,0	1	10	10	1,654
46	IAC I	0,5	1	2	2	0,375
47	IAC I	2,0	1	4	4	0,885
48	IAC I	4,0	1	6	6	1,439
49	IAC I	6,0	1	8	8	1,921
50	IAC I	10,0	1	10	10	2,969
51	IAC I	0,5	1	2	2	0,047
52	IAC I	2,0	1	4	4	0,123
53	IAC I	4,0	1	6	6	0,217
54	IAC I	6,0	1	8	8	0,307
55	IAC I	10,0	1	10	10	0,493

Além disso, como pode ser visto na quarta coluna, o valor de *pick up* foi fixado em 1 pu, o qual correspondia também a 1 A, pelo fato de poder alcançar toda a faixa de valores de corrente que deveriam ser injetados com o equipamento de simulação disponível, sem exceder o valor que o equipamento suporta, visando sua integridade. Foram escolhidos cinco valores diferentes para a relação entre as correntes, vistos na sexta coluna, com isso determinaram-se as correntes de falta, mostradas na quinta coluna de cada tabela. Definidos o tipo de curva, o *dial* e a relação de correntes, foi possível encontrar o valor esperado para cada caso, utilizando-se das tabelas e das fórmulas fornecidas no manual do relé G60, mostrado na sétima coluna.

Cada medição de tempo foi repetida dez vezes para cada caso, com o intuito de observar o valor médio e avaliar se ocorre algum desvio entre os tempos de atuação, causado por algum eventual erro na função desenvolvida. Os resultados desse teste para cada sistema encontram-se na sequência.

Primeiramente esse teste foi realizado com o sistema utilizando o PC104. Em relação às curvas IEEE, na Tabela 11 estão os dez valores medidos (VT1 a VT10) e na Tabela 12 são mostrados o valor médio para essas medidas, bem como o valor esperado

(ambos dados em segundos), o erro porcentual e absoluto (em módulo) do valor médio em relação ao esperado.

Tabela 11: Valores medidos para teste com o PC104 usando as curvas do padrão IEEE

Nº Teste	VT1 (s)	VT2 (s)	VT3 (s)	VT4 (s)	VT5 (s)	VT6 (s)	VT7 (s)	VT8 (s)	VT9 (s)	VT10 (s)
1	11,417	11,383	11,328	11,368	11,407	11,441	11,452	11,324	11,398	11,382
2	7,335	7,338	7,313	7,332	7,331	7,319	7,331	7,334	7,330	7,337
3	7,807	7,800	7,798	7,810	7,801	7,808	7,810	7,799	7,797	7,796
4	7,102	7,102	7,102	7,098	7,102	7,109	7,099	7,098	7,098	7,101
5	1,906	1,907	1,905	1,906	1,906	1,905	1,905	1,905	1,905	1,907
6	8,081	8,104	8,120	8,161	8,106	8,084	8,166	8,092	8,144	8,084
7	5,903	5,909	5,901	5,907	5,914	5,903	5,900	5,900	5,909	5,908
8	7,872	7,870	7,867	7,867	7,871	7,870	7,861	7,861	7,863	7,863
9	9,004	9,002	9,006	9,006	9,001	8,998	9,002	9,004	9,002	9,000
10	2,951	2,951	2,951	2,950	2,952	2,951	2,951	2,950	2,950	2,951
11	3,252	3,252	3,251	3,225	3,233	3,249	3,247	3,240	3,249	3,246
12	4,881	4,876	4,875	4,883	4,879	4,881	4,878	4,876	4,878	4,875
13	10,144	10,141	10,140	10,143	10,140	10,141	10,142	10,140	10,144	10,142
14	14,123	14,120	14,122	14,119	14,121	14,122	14,118	14,120	14,118	14,118
15	5,046	5,048	5,046	5,047	5,045	5,046	5,045	5,045	5,044	5,044

Tabela 12: Valor médio e erros do teste com PC104 para as curvas IEEE

Nº Teste	Esperado (s)	Médio (s)	Erro (%)	Erro Absoluto
1	11,341	11,3900	0,4321	0,04900
2	7,293	7,3300	0,5073	0,03700
3	7,780	7,8026	0,2905	0,02260
4	7,092	7,1011	0,1283	0,00910
5	1,897	1,9057	0,4586	0,00870
6	8,090	8,1142	0,2991	0,02420
7	5,885	5,9054	0,3466	0,02040
8	7,849	7,8665	0,2230	0,01750
9	8,995	9,0025	0,0834	0,00750
10	2,945	2,9508	0,1969	0,00580
11	3,220	3,2444	0,7578	0,02440
12	4,864	4,8782	0,2919	0,01420
13	10,130	10,1417	0,1155	0,01170
14	14,117	14,1201	0,0220	0,00310
15	5,041	5,0456	0,0913	0,00460

Assim como no teste anterior, os resultados para as curvas IEC estão apresentadas no mesmo formato anterior, nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13: Valores medidos para teste com o PC104 usando as curvas do padrão IEC (BS142)

Nº Teste	VT1 (s)	VT2 (s)	VT3 (s)	VT4 (s)	VT5 (s)	VT6 (s)	VT7 (s)	VT8 (s)	VT9 (s)	VT10 (s)
16	0,511	0,509	0,512	0,510	0,512	0,512	0,513	0,511	0,511	0,513
17	1,001	1,003	1,000	1,002	1,001	1,000	1,004	1,001	1,003	1,000
18	1,542	1,543	1,542	1,542	1,538	1,539	1,542	1,542	1,541	1,539
19	1,985	1,983	1,985	1,985	1,984	1,985	1,985	1,984	1,984	1,985
20	2,976	2,972	2,975	2,974	2,973	2,975	2,975	2,972	2,976	2,975
21	0,687	0,689	0,688	0,689	0,687	0,684	0,682	0,684	0,685	0,684
22	0,911	0,909	0,912	0,910	0,911	0,912	0,910	0,910	0,910	0,911
23	1,090	1,089	1,090	1,091	1,089	1,087	1,090	1,091	1,090	1,090
24	1,162	1,164	1,161	1,167	1,162	1,164	1,165	1,160	1,162	1,165
25	1,506	1,508	1,507	1,508	1,508	1,508	1,504	1,509	1,504	1,508
26	1,344	1,341	1,344	1,347	1,346	1,346	1,345	1,340	1,344	1,346
27	1,082	1,080	1,080	1,081	1,082	1,082	1,080	1,079	1,081	1,080
28	0,926	0,927	0,928	0,927	0,928	0,927	0,925	0,926	0,927	0,927
29	0,774	0,773	0,774	0,773	0,772	0,773	0,774	0,771	0,772	0,773
30	0,821	0,819	0,817	0,816	0,817	0,816	0,820	0,819	0,820	0,820
31	0,098	0,097	0,099	0,098	0,099	0,097	0,098	0,097	0,098	0,098
32	0,182	0,183	0,182	0,182	0,183	0,183	0,182	0,183	0,183	0,182
33	0,275	0,276	0,275	0,275	0,276	0,276	0,275	0,275	0,275	0,276
34	0,352	0,352	0,352	0,352	0,352	0,352	0,352	0,352	0,352	0,352
35	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524

Tabela 14: Valor médio e erros do teste com PC104 para as curvas IEC

Nº Teste	Esperado (s)	Médio (s)	Erro (%)	Erro Absoluto
16	0,501	0,5114	2,0758	0,0104
17	0,996	1,0015	0,5522	0,0055
18	1,535	1,5410	0,3909	0,006
19	1,978	1,9845	0,3286	0,0065
20	2,971	2,9743	0,1111	0,0033
21	0,675	0,6859	1,6148	0,0109
22	0,900	0,9106	1,1778	0,0106
23	1,080	1,0897	0,8981	0,0097
24	1,157	1,1632	0,5359	0,0062
25	1,500	1,5070	0,4667	0,007
26	1,333	1,3443	0,8477	0,0113
27	1,067	1,0807	1,2840	0,0137
28	0,914	0,9268	1,4004	0,0128
29	0,762	0,7729	1,4304	0,0109
30	0,808	0,8185	1,2995	0,0105
31	0,089	0,0979	10,0000	0,0089
32	0,175	0,1825	4,2857	0,0075
33	0,269	0,2754	2,3792	0,0064
34	0,346	0,3520	1,7341	0,006
35	0,518	0,5240	1,1583	0,006

E agora, encerrando-se o teste, os resultados para as curvas do padrão *GE Type* IAC são mostradas nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15: Valores medidos para teste com o PC104 usando as curvas do padrão *GE Type* IAC

Nº Teste	VT1 (s)	VT2 (s)	VT3 (s)	VT4 (s)	VT5 (s)	VT6 (s)	VT7 (s)	VT8 (s)	VT9 (s)	VT10 (s)
36	0,761	0,764	0,762	0,765	0,765	0,765	0,764	0,761	0,765	0,765
37	0,723	0,723	0,722	0,724	0,724	0,724	0,723	0,724	0,724	0,724
38	0,755	0,754	0,754	0,755	0,755	0,755	0,755	0,754	0,754	0,754
39	0,754	0,753	0,754	0,753	0,753	0,752	0,753	0,753	0,753	0,753
40	0,936	0,935	0,937	0,935	0,936	0,935	0,936	0,935	0,935	0,936
41	0,670	0,671	0,670	0,670	0,672	0,664	0,669	0,664	0,668	0,667
42	0,697	0,696	0,697	0,695	0,698	0,694	0,698	0,698	0,697	0,697
43	0,915	0,914	0,915	0,916	0,915	0,914	0,915	0,915	0,916	0,915
44	1,125	1,123	1,125	1,125	1,125	1,124	1,125	1,125	1,123	1,125
45	1,660	1,660	1,660	1,661	1,660	1,660	1,661	1,660	1,660	1,660
46	0,384	0,384	0,384	0,385	0,384	0,384	0,384	0,384	0,384	0,384
47	0,893	0,891	0,893	0,892	0,893	0,893	0,893	0,893	0,892	0,893
48	1,445	1,444	1,445	1,446	1,445	1,445	1,446	1,445	1,444	1,444
49	1,927	1,926	1,924	1,927	1,925	1,927	1,927	1,926	1,927	1,927
50	2,975	2,974	2,975	2,974	2,975	2,974	2,974	2,974	2,975	2,974
51	0,052	0,051	0,051	0,050	0,050	0,051	0,051	0,052	0,050	0,051
52	0,129	0,129	0,129	0,128	0,128	0,127	0,127	0,128	0,128	0,128
53	0,222	0,221	0,222	0,222	0,222	0,221	0,222	0,222	0,222	0,222
54	0,311	0,311	0,312	0,311	0,311	0,311	0,310	0,311	0,311	0,311
55	0,497	0,496	0,497	0,497	0,496	0,497	0,498	0,498	0,498	0,496

Tabela 16: Valor médio e erro do teste com PC104 para as curvas IAC

Nº Teste	Esperado (s)	Médio (s)	Erro (%)	Erro Absoluto
36	0,749	0,7637	1,9626	0,0147
37	0,711	0,7235	1,7581	0,0125
38	0,744	0,7545	1,4113	0,0105
39	0,743	0,7531	1,3594	0,0101
40	0,926	0,9356	1,0367	0,0096
41	0,656	0,6685	1,9055	0,0125
42	0,687	0,6967	1,4119	0,0097
43	0,906	0,9150	0,9934	0,009
44	1,117	1,1245	0,6714	0,0075
45	1,654	1,6602	0,3748	0,0062
46	0,375	0,3841	2,4267	0,0091
47	0,885	0,8926	0,8588	0,0076
48	1,439	1,4449	0,4100	0,0059
49	1,921	1,9263	0,2759	0,0053
50	2,969	2,9744	0,1819	0,0054
51	0,047	0,0509	8,2979	0,0039
52	0,123	0,1281	4,1463	0,0051
53	0,217	0,2218	2,2120	0,0048
54	0,307	0,3110	1,3029	0,004
55	0,493	0,4970	0,8114	0,004

Fazendo uma primeira análise das tabelas mostradas anteriormente, sem comparar com o desempenho do relé comercial, é possível notar que a função desenvolvida obteve resultados bastante satisfatórios. Destes testes, destacam-se os seguintes pontos:

- Valores Testados e Valor Médio: todos os valores testados apresentaram pouca variação em relação ao valor médio. Esse pequeno desvio entre si dos valores medidos dá confiabilidade à proteção e mais uma garantia de que ela foi corretamente implementada, ou seja, mais um passo para a sua validação.
- Valor Médio, Valor Esperado e Erro porcentual: em sua grande maioria, os valores médios também não tiveram muita disparidade em relação aos valores esperados, embora tenham existido algumas exceções, as quais são evidenciadas com erros porcentuais maiores. Nas tabelas, estão marcados em vermelho os erros mais altos e em verde os erros mais baixos para cada tipo de curva. Os erros porcentuais maiores são justificados devido ao fato de que eles acontecem quando o tempo de atuação é muito pequeno, assim, qualquer tipo de atraso que ocorrer em alguma etapa influencia diretamente no resultado. Porém, como já foi dito no item anterior, os valores testados não variam muito em relação ao valor médio, ou seja, apesar de haver um erro elevado em alguns casos, os valores são muito próximos entre si, o que é um fato importante.
- Erro absoluto: estudando-se os erros absolutos, dados em módulo nas tabelas acima é possível perceber que nenhum dos erros pode ser considerado alto, pois todos os erros encontram-se a partir da segunda ou terceira casa decimal, o que demonstra um bom resultado.

Em seqüência, serão mostrados os resultados do mesmo teste para o caso do relé T60 da GE *Industrial Systems*. Os resultados da função de proteção deste relé estão mostrados no mesmo formato utilizado para a mostrar os resultados da função desenvolvida.

Para realizar este teste, o segundo sistema descrito anteriormente foi montado e o procedimento também já descrito foi realizado. A ordem seguida também foi a mesma, ou seja, primeiro realizaram-se testes usando as curvas do padrão IEEE, em seguida usando as do padrão IEC (BS142) e por fim com o padrão *GE Type IAC*.

A Tabela 17 mostra os dez valores medidos para o caso da família de curvas IEEE e a Tabela 18 mostra a média dos dez valores medidos, os valores esperados e ainda, os



erros percentual e absoluto (em módulo) entre os valores médio e esperado. Na sequência, as Tabelas 19 e 20 se referem aos testes com a família de curvas IEC e por fim, encontram-se as Tabelas 21 e 22 que estão relacionadas ao teste com a família IAC.

Tabela 17: Valores medidos para teste com o T60 usando as curvas do padrão IEEE

Nº Teste	VT1 (s)	VT2 (s)	VT3 (s)	VT4 (s)	VT5 (s)	VT6 (s)	VT7 (s)	VT8 (s)	VT9 (s)	VT10 (s)
1	11,388	11,388	11,385	11,392	11,381	11,391	11,380	11,382	11,382	11,380
2	7,311	7,310	7,310	7,313	7,311	7,312	7,308	7,316	7,309	7,309
3	7,782	7,786	7,785	7,783	7,787	7,789	7,785	7,785	7,783	7,787
4	7,090	7,097	7,091	7,097	7,093	7,093	7,097	7,096	7,094	7,093
5	1,908	1,911	1,913	1,914	1,907	1,908	1,907	1,910	1,909	1,907
6	8,126	8,121	8,124	8,126	8,123	8,121	8,127	8,121	8,122	8,121
7	5,901	5,902	5,907	5,901	5,905	5,905	5,902	5,905	5,907	5,900
8	7,856	7,856	7,855	7,859	7,860	7,854	7,856	7,859	7,860	7,859
9	8,993	8,999	8,995	8,991	8,994	8,990	8,996	8,990	8,991	8,991
10	2,954	2,952	2,957	2,954	2,954	2,950	2,951	2,951	2,952	2,953
11	3,243	3,237	3,237	3,241	3,242	3,237	3,244	3,242	3,242	3,236
12	4,878	4,877	4,876	4,876	4,878	4,882	4,881	4,879	4,875	4,879
13	10,142	10,142	10,143	10,144	10,141	10,142	10,144	10,146	10,145	10,144
14	14,129	14,128	14,126	14,128	14,130	14,124	14,129	14,123	14,124	14,129
15	5,055	5,056	5,051	5,055	5,056	5,050	5,050	5,056	5,048	5,049

Tabela 18: Valor médio e erro para o teste com T60 para as curvas IEEE

Nº Teste	Esperado (s)	Médio (s)	Erro (%)	Erro Absoluto
1	11,341	11,3849	0,3871	0,04390
2	7,293	7,3109	0,2454	0,01790
3	7,78	7,7852	0,0668	0,00520
4	7,092	7,0941	0,0296	0,00210
5	1,897	1,9094	0,6537	0,01240
6	8,09	8,1232	0,4104	0,03320
7	5,885	5,9035	0,3144	0,01850
8	7,849	7,8574	0,1070	0,00840
9	8,995	8,993	0,0222	0,00200
10	2,945	2,9528	0,2649	0,00780
11	3,22	3,2401	0,6242	0,02010
12	4,864	4,8781	0,2899	0,01410
13	10,13	10,1433	0,1313	0,01330
14	14,117	14,127	0,0708	0,01000
15	5,041	5,0526	0,2301	0,01160

Tabela 19: Valores medidos para teste com o T60 usando as curvas do padrão IEC (BS142)

Nº Teste	VT1 (s)	VT2 (s)	VT3 (s)	VT4 (s)	VT5 (s)	VT6 (s)	VT7 (s)	VT8 (s)	VT9 (s)	VT10 (s)
16	0,518	0,519	0,526	0,522	0,523	0,523	0,522	0,518	0,518	0,520
17	1,009	1,013	1,011	1,009	1,010	1,012	1,013	1,009	1,015	1,010
18	1,551	1,551	1,555	1,551	1,551	1,549	1,552	1,557	1,553	1,556
19	1,992	1,992	1,997	1,994	1,993	1,995	1,992	1,994	1,997	1,998
20	2,985	2,988	2,986	2,984	2,981	2,987	2,983	2,987	2,985	2,981
21	0,694	0,696	0,699	0,696	0,697	0,695	0,695	0,699	0,701	0,698
22	0,915	0,911	0,912	0,914	0,913	0,913	0,916	0,912	0,911	0,912
23	1,094	1,091	1,095	1,097	1,098	1,097	1,095	1,097	1,098	1,094
24	1,165	1,166	1,166	1,167	1,170	1,168	1,167	1,173	1,172	1,165
25	1,509	1,507	1,508	1,513	1,514	1,510	1,508	1,511	1,510	1,508
26	1,351	1,352	1,356	1,356	1,359	1,359	1,352	1,353	1,354	1,355
27	1,085	1,085	1,079	1,082	1,082	1,081	1,084	1,077	1,084	1,081
28	0,924	0,925	0,925	0,928	0,930	0,925	0,926	0,929	0,926	0,925
29	0,774	0,778	0,780	0,777	0,774	0,774	0,777	0,774	0,778	0,776
30	0,824	0,821	0,823	0,822	0,818	0,823	0,821	0,822	0,818	0,823
31	0,109	0,101	0,101	0,109	0,109	0,102	0,109	0,101	0,106	0,104
32	0,191	0,197	0,198	0,194	0,196	0,196	0,195	0,196	0,194	0,196
33	0,286	0,285	0,289	0,287	0,287	0,286	0,284	0,285	0,282	0,285
34	0,363	0,364	0,363	0,358	0,359	0,360	0,363	0,363	0,363	0,361
35	0,535	0,533	0,539	0,536	0,534	0,535	0,533	0,537	0,538	0,535

Tabela 20: Valor médio e erro para o teste com T60 para as curvas IEC

Nº Teste	Esperado (s)	Médio (s)	Erro (%)	Erro Absoluto
16	0,501	0,5209	3,9721	0,0199
17	0,996	1,0111	1,5161	0,0151
18	1,535	1,5526	1,1466	0,0176
19	1,978	1,9944	0,8291	0,0164
20	2,971	2,9847	0,4611	0,0137
21	0,675	0,6970	3,2593	0,0220
22	0,900	0,9129	1,4333	0,0129
23	1,080	1,0956	1,4444	0,0156
24	1,157	1,1679	0,9421	0,0109
25	1,500	1,5098	0,6533	0,0098
26	1,333	1,3547	1,6279	0,0217
27	1,067	1,0820	1,4058	0,0150
28	0,914	0,9263	1,3457	0,0123
29	0,762	0,7762	1,8635	0,0142
30	0,808	0,8215	1,6708	0,0135
31	0,089	0,1051	18,0899	0,0161
32	0,175	0,1953	11,6000	0,0203
33	0,269	0,2856	6,1710	0,0166
34	0,346	0,3617	4,5376	0,0157
35	0,518	0,5355	3,3784	0,0175

Tabela 21: Valores medidos para teste com o T60 usando as curvas do padrão *GE Type IAC*

Nº Teste	VT1 (s)	VT2 (s)	VT3 (s)	VT4 (s)	VT5 (s)	VT6 (s)	VT7 (s)	VT8 (s)	VT9 (s)	VT10 (s)
36	0,764	0,770	0,769	0,772	0,772	0,762	0,763	0,769	0,767	0,774
37	0,726	0,724	0,732	0,729	0,730	0,729	0,731	0,729	0,725	0,726
38	0,760	0,761	0,759	0,762	0,758	0,758	0,761	0,763	0,760	0,758
39	0,753	0,749	0,754	0,749	0,748	0,752	0,751	0,756	0,750	0,748
40	0,932	0,938	0,931	0,936	0,937	0,932	0,935	0,936	0,934	0,932
41	0,675	0,674	0,672	0,674	0,675	0,671	0,674	0,674	0,675	0,673
42	0,704	0,706	0,700	0,700	0,705	0,701	0,706	0,704	0,700	0,700
43	0,923	0,921	0,919	0,917	0,923	0,920	0,916	0,920	0,919	0,920
44	1,134	1,133	1,129	1,127	1,130	1,131	1,129	1,134	1,129	1,133
45	1,672	1,671	1,669	1,672	1,672	1,664	1,672	1,665	1,665	1,664
46	0,395	0,390	0,388	0,397	0,398	0,395	0,393	0,398	0,392	0,395
47	0,901	0,907	0,901	0,899	0,902	0,903	0,899	0,904	0,905	0,905
48	1,456	1,448	1,453	1,449	1,457	1,452	1,452	1,451	1,454	1,454
49	1,939	1,939	1,935	1,936	1,934	1,934	1,933	1,936	1,939	1,939
50	2,974	2,977	2,976	2,974	2,974	2,974	2,981	2,979	2,978	2,979
51	0,064	0,067	0,063	0,065	0,066	0,066	0,065	0,067	0,061	0,064
52	0,139	0,137	0,135	0,136	0,136	0,137	0,133	0,137	0,138	0,134
53	0,231	0,231	0,232	0,225	0,225	0,224	0,229	0,229	0,225	0,230
54	0,316	0,320	0,322	0,315	0,323	0,319	0,322	0,315	0,315	0,321
55	0,502	0,503	0,499	0,504	0,505	0,501	0,506	0,506	0,500	0,501

Tabela 22: Valor médio e erro para o teste com T60 para as curvas IAC

Nº Teste	Esperado (s)	Médio (s)	Erro (%)	Erro Absoluto
36	0,749	0,7682	2,5634	0,0192
37	0,711	0,7281	2,4051	0,0171
38	0,744	0,7600	2,1505	0,0160
39	0,743	0,7510	1,0767	0,0080
40	0,926	0,9343	0,8963	0,0083
41	0,656	0,6737	2,6982	0,0177
42	0,687	0,7026	2,2707	0,0156
43	0,906	0,9198	1,5232	0,0138
44	1,117	1,1309	1,2444	0,0139
45	1,654	1,6686	0,8827	0,0146
46	0,375	0,3941	5,0933	0,0191
47	0,885	0,9026	1,9887	0,0176
48	1,439	1,4526	0,9451	0,0136
49	1,921	1,9364	0,8017	0,0154
50	2,969	2,9766	0,2560	0,0076
51	0,047	0,0648	37,8723	0,0178
52	0,123	0,1362	10,7317	0,0132
53	0,217	0,2281	5,1152	0,0111
54	0,307	0,3188	3,8436	0,0118
55	0,493	0,5027	1,9675	0,0097

Devido ao fato de o T60 ser um relé comercial, uma análise isolada dos seus resultados não será realizada mas sim, uma análise comparativa utilizando os resultados obtidos com o PC104. Essa comparação se dá nos seguintes pontos:

- Desvio entre os valores testados e o valor médio: é possível notar em todas as tabelas dos testes do T60 que os valores testados não diferem significativamente do valor médio. Essa característica também está presente nos testes com a função de proteção desenvolvida, isso mostra que a função tem um desempenho similar à função do relé comercial, o que é algo desejável.
- Valores médios e esperados: uma característica que pode ser notada tanto nos testes da função desenvolvida quanto da função do relé comercial é que os valores médios não apresentaram grandes variações em relação aos valores esperados, o que constitui em mais um passo rumo à validação do trabalho desenvolvido.
- Erros percentuais: também neste quesito existe uma similaridade entre as duas funções de proteção. Para ambas as funções, os maiores erros aconteceram nas mesmas situações, isso pode ser visto nos testes de número 31 e 51, os quais estão marcados em Vermelho nas tabelas das duas funções. Além disso, nessas duas situações – 31 e 51 – os erros percentuais no caso do relé comercial são bem maiores do que os erros no caso da função desenvolvida aplicada no PC104, porém não só apenas nesse caso, mas em diversas outras situações o erro da função do relé supera o erro da proteção desenvolvida, isso pode ser explicado por exemplo pelo fato de o relé comercial ter passos a mais antes de confirmar a atuação do que o PC104.
- Média dos erros em geral: fazendo o mesmo cálculo feito no outro teste, a média dos erros para o caso do relé comercial é de aproximadamente 2,8%, o que não constitui um valor alto, porém é um pouco mais do que o dobro do erro encontrado no teste da função desenvolvida, que era aproximadamente 1,3%. Este é mais um ponto a favor da validação deste trabalho.
- Erros absolutos: analisando no caso do T60, os resultados dos erros absolutos foram bem similares ao apresentado para o caso do PC104, já que todos os erros encontram-se a partir da segunda ou terceira casa decimal. Isso mostra que o comportamento do PC104 aproxima-se do apresentado pelo relé comercial.

Analisando de uma maneira geral essa comparação, é possível dizer que a função desenvolvida apresentou resultados muito satisfatórios na medida em que mostrou um

desempenho semelhante à mesma função contida no relé comercial. Além disso, neste teste, ela apresentou em média erros menores do que no caso do relé T60.

No intuito de continuar essa comparação, outro teste foi realizado e este é apresentado na próxima seção deste capítulo.

### 6.2.2 – Segundo Teste

Neste teste, novamente os dois sistemas mostrados anteriormente foram montados e a realização dos testes se deu na mesma ordem, ou seja, primeiramente usando o PC104 e depois o relé T60.

No manual do relé G60 e também do T60, além das fórmulas e tabelas para cada família de curvas, há também várias tabelas no formato da Tabela 23, a qual foi retirada do manual do relé G60. Nelas, para cada tipo de curva estão definidos valores para o *Dial* ou *Multiplier (TDM)* e ainda, valores de relações de corrente. Associados a esses valores definidos, estão os tempos de atuação teóricos.

Tabela 23: Tabela retirada do manual do relé G60 da GE *Industrial Systemss*

MULTIPLIER (TDM)	CURRENT ( $I / I_{pickup}$ )									
	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
<b>IEEE EXTREMELY INVERSE</b>										
0.5	11.341	4.761	1.823	1.001	0.648	0.464	0.355	0.285	0.237	0.203
1.0	22.682	9.522	3.647	2.002	1.297	0.927	0.709	0.569	0.474	0.407
2.0	45.363	19.043	7.293	4.003	2.593	1.855	1.418	1.139	0.948	0.813
4.0	90.727	38.087	14.587	8.007	5.187	3.710	2.837	2.277	1.897	1.626
6.0	136.090	57.130	21.880	12.010	7.780	5.564	4.255	3.416	2.845	2.439
8.0	181.454	76.174	29.174	16.014	10.374	7.419	5.674	4.555	3.794	3.252
10.0	226.817	95.217	36.467	20.017	12.967	9.274	7.092	5.693	4.742	4.065
<b>IEEE VERY INVERSE</b>										
0.5	8.090	3.514	1.471	0.899	0.654	0.526	0.450	0.401	0.368	0.345
1.0	16.179	7.028	2.942	1.798	1.308	1.051	0.900	0.802	0.736	0.689
2.0	32.358	14.055	5.885	3.597	2.616	2.103	1.799	1.605	1.472	1.378
4.0	64.716	28.111	11.769	7.193	5.232	4.205	3.598	3.209	2.945	2.756
6.0	97.074	42.166	17.654	10.790	7.849	6.308	5.397	4.814	4.417	4.134
8.0	129.432	56.221	23.538	14.387	10.465	8.410	7.196	6.418	5.889	5.513
10.0	161.790	70.277	29.423	17.983	13.081	10.513	8.995	8.023	7.361	6.891
<b>IEEE MODERATELY INVERSE</b>										
0.5	3.220	1.902	1.216	0.973	0.844	0.763	0.706	0.663	0.630	0.603
1.0	6.439	3.803	2.432	1.946	1.688	1.526	1.412	1.327	1.260	1.207
2.0	12.878	7.606	4.864	3.892	3.377	3.051	2.823	2.653	2.521	2.414
4.0	25.756	15.213	9.729	7.783	6.753	6.102	5.647	5.307	5.041	4.827
6.0	38.634	22.819	14.593	11.675	10.130	9.153	8.470	7.960	7.562	7.241
8.0	51.512	30.426	19.458	15.567	13.507	12.204	11.294	10.614	10.083	9.654
10.0	64.390	38.032	24.322	19.458	16.883	15.255	14.117	13.267	12.604	12.068

Este teste teve como objetivo, testar em todos os 11 tipos de curvas possíveis, os tempos de atuação para diversos valores de relação de correntes em uma mesma curva, para analisar se variando apenas essas relações, a função iria apresentar algum erro. Tendo em vista a impossibilidade de testar todos os *Dials* para cada uma das 11 curvas, fez-se necessário escolher apenas um *Dial* para cada tipo de curva. Essa escolha teve como base a tabela mostrada anteriormente, pois o valor 4,0 foi escolhido, devido ao fato de ser o valor mais intermediário da tabela. Feita essa escolha, os testes usando o PC104 e o T60 foram realizados. Os resultados para o teste utilizando o PC104 estão apresentados na Tabela 24 e os resultados para o T60 estão na Tabela 25.

Tabela 24: Resultados do teste usando o PC104

I/pick up	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>IEEE EI</b>										
Esperado	90,727	38,087	14,587	8,007	5,187	3,710	2,837	2,277	1,897	1,626
Medido	91,534	38,270	14,676	8,049	5,217	3,732	2,854	2,292	1,909	1,636
Erro (%)	0,889	0,480	0,610	0,525	0,578	0,593	0,599	0,659	0,633	0,615
<b>IEEE VI</b>										
Esperado	64,716	28,111	11,769	7,193	5,232	4,205	3,598	3,209	2,945	2,756
Medido	64,873	28,179	11,841	7,234	5,251	4,219	3,610	3,219	2,953	2,764
Erro (%)	0,243	0,242	0,612	0,570	0,363	0,333	0,334	0,312	0,272	0,290
<b>IEEE MI</b>										
Esperado	25,756	15,213	9,729	7,783	6,753	6,102	5,647	5,307	5,041	4,827
Medido	25,951	15,276	9,754	7,799	6,769	6,114	5,656	5,314	5,048	4,832
Erro (%)	0,757	0,414	0,257	0,206	0,237	0,197	0,159	0,132	0,139	0,104
<b>IEC A</b>										
Esperado	6,878	4,012	2,521	1,992	1,712	1,535	1,411	1,319	1,247	1,188
Medido	6,907	4,028	2,532	2,003	1,721	1,542	1,419	1,326	1,253	1,195
Erro (%)	0,422	0,399	0,436	0,552	0,526	0,456	0,567	0,531	0,481	0,589
<b>IEC B</b>										
Esperado	10,800	5,400	2,700	1,800	1,350	1,080	0,900	0,771	0,675	0,600
Medido	10,863	5,442	2,722	1,814	1,361	1,091	0,910	0,781	0,683	0,609
Erro (%)	0,583	0,778	0,815	0,778	0,815	1,019	1,111	1,297	1,185	1,500
<b>IEC C</b>										
Esperado	25,600	10,667	4,000	2,133	1,333	0,914	0,667	0,508	0,400	0,323
Medido	25,791	10,677	4,039	2,145	1,349	0,920	0,680	0,514	0,409	0,333
Erro (%)	0,746	0,094	0,975	0,563	1,200	0,656	1,949	1,181	2,250	3,096
<b>IEC SI</b>										
Esperado	1,223	0,711	0,445	0,351	0,301	0,269	0,247	0,231	0,218	0,207
Medido	1,245	0,724	0,454	0,358	0,308	0,275	0,254	0,236	0,224	0,213
Erro (%)	1,799	1,828	2,022	1,994	2,326	2,230	2,834	2,165	2,752	2,899
<b>IAC EI</b>										
Esperado	13,591	5,993	2,423	1,422	0,983	0,744	0,595	0,495	0,424	0,370
Medido	13,731	6,020	2,445	1,436	0,997	0,755	0,606	0,505	0,433	0,379

<b>Erro (%)</b>	<b>1,030</b>	<b>0,451</b>	<b>0,908</b>	<b>0,985</b>	<b>1,424</b>	<b>1,478</b>	<b>1,849</b>	<b>2,020</b>	<b>2,123</b>	<b>2,432</b>
<b>IAC VI</b>										
<b>Esperado</b>	<b>11,605</b>	<b>5,248</b>	<b>2,150</b>	<b>1,374</b>	<b>1,065</b>	<b>0,906</b>	<b>0,810</b>	<b>0,745</b>	<b>0,698</b>	<b>0,662</b>
<b>Medido</b>	<b>11,672</b>	<b>5,271</b>	<b>2,170</b>	<b>1,386</b>	<b>1,076</b>	<b>0,915</b>	<b>0,817</b>	<b>0,752</b>	<b>0,704</b>	<b>0,670</b>
<b>Erro (%)</b>	<b>0,577</b>	<b>0,438</b>	<b>0,930</b>	<b>0,873</b>	<b>1,033</b>	<b>0,993</b>	<b>0,864</b>	<b>0,940</b>	<b>0,860</b>	<b>1,208</b>
<b>IAC I</b>										
<b>Esperado</b>	<b>4,621</b>	<b>2,997</b>	<b>2,128</b>	<b>1,770</b>	<b>1,569</b>	<b>1,439</b>	<b>1,348</b>	<b>1,280</b>	<b>1,229</b>	<b>1,188</b>
<b>Medido</b>	<b>4,664</b>	<b>3,013</b>	<b>2,139</b>	<b>1,780</b>	<b>1,577</b>	<b>1,443</b>	<b>1,354</b>	<b>1,286</b>	<b>1,235</b>	<b>1,192</b>
<b>Erro (%)</b>	<b>0,931</b>	<b>0,534</b>	<b>0,517</b>	<b>0,565</b>	<b>0,510</b>	<b>0,278</b>	<b>0,445</b>	<b>0,469</b>	<b>0,488</b>	<b>0,337</b>
<b>IAC SI</b>										
<b>Esperado</b>	<b>0,573</b>	<b>0,379</b>	<b>0,279</b>	<b>0,245</b>	<b>0,228</b>	<b>0,217</b>	<b>0,210</b>	<b>0,204</b>	<b>0,200</b>	<b>0,197</b>
<b>Medido</b>	<b>0,584</b>	<b>0,388</b>	<b>0,286</b>	<b>0,251</b>	<b>0,233</b>	<b>0,221</b>	<b>0,214</b>	<b>0,208</b>	<b>0,204</b>	<b>0,201</b>
<b>Erro (%)</b>	<b>1,920</b>	<b>2,375</b>	<b>2,509</b>	<b>2,449</b>	<b>2,193</b>	<b>1,843</b>	<b>1,905</b>	<b>1,961</b>	<b>2,000</b>	<b>2,030</b>

Tabela 25: Resultados do teste usando o T60

I/pick up	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>IEEE EI</b>										
Esperado	90,727	38,087	14,587	8,007	5,187	3,710	2,837	2,277	1,897	1,626
Medido	90,899	38,147	14,599	8,015	5,195	3,716	2,845	2,286	1,91	1,636
Erro (%)	0,190	0,158	0,082	0,100	0,154	0,162	0,282	0,395	0,685	0,615
<b>IEEE VI</b>										
Esperado	64,716	28,111	11,769	7,193	5,232	4,205	3,598	3,209	2,945	2,756
Medido	64,812	28,148	11,781	7,196	5,239	4,215	3,612	3,216	2,957	2,764
Erro (%)	0,148	0,132	0,102	0,042	0,134	0,238	0,389	0,218	0,407	0,290
<b>IEEE MI</b>										
Esperado	25,756	15,213	9,729	7,783	6,753	6,102	5,647	5,307	5,041	4,827
Medido	25,788	15,235	9,741	7,794	6,76	6,113	5,651	5,318	5,053	4,840
Erro (%)	0,124	0,145	0,123	0,141	0,104	0,180	0,071	0,207	0,238	0,269
<b>IEC A</b>										
Esperado	6,878	4,012	2,521	1,992	1,712	1,535	1,411	1,319	1,247	1,188
Medido	6,909	4,033	2,537	2,007	1,724	1,557	1,428	1,337	1,264	1,2
Erro (%)	0,451	0,523	0,635	0,753	0,701	1,433	1,205	1,365	1,363	1,010
<b>IEC B</b>										
Esperado	10,800	5,400	2,700	1,800	1,350	1,080	0,900	0,771	0,675	0,600
Medido	10,829	5,422	2,716	1,81	1,362	1,091	0,910	0,784	0,688	0,614
Erro (%)	0,269	0,407	0,593	0,556	0,889	1,019	1,111	1,686	1,926	2,333
<b>IEC C</b>										
Esperado	25,600	10,667	4,000	2,133	1,333	0,914	0,667	0,508	0,400	0,323
Medido	25,66	10,692	4,013	2,144	1,348	0,927	0,681	0,519	0,415	0,334
Erro (%)	0,234	0,234	0,325	0,516	1,125	1,422	2,099	2,165	3,750	3,406
<b>IEC SI</b>										
Esperado	1,223	0,711	0,445	0,351	0,301	0,269	0,247	0,231	0,218	0,207
Medido	1,242	0,728	0,459	0,368	0,32	0,287	0,261	0,24	0,233	0,223
Erro (%)	1,554	2,391	3,146	4,843	6,312	6,691	5,668	3,896	6,881	7,729
<b>IAC EI</b>										
Esperado	13,591	5,993	2,423	1,422	0,983	0,744	0,595	0,495	0,424	0,370
Medido	13,622	6,010	2,44	1,434	1,00	0,755	0,613	0,507	0,433	0,386
Erro (%)	0,228	0,284	0,702	0,844	1,424	1,478	3,025	2,424	2,123	4,324
<b>IAC VI</b>										
Esperado	11,605	5,248	2,150	1,374	1,065	0,906	0,810	0,745	0,698	0,662
Medido	11,634	5,269	2,165	1,39	1,079	0,918	0,819	0,763	0,711	0,679
Erro (%)	0,250	0,400	0,698	1,164	1,315	1,325	1,111	2,416	1,862	2,568
<b>IAC I</b>										
Esperado	4,621	2,997	2,128	1,770	1,569	1,439	1,348	1,280	1,229	1,188
Medido	4,64	3,013	2,144	1,785	1,582	1,451	1,359	1,292	1,243	1,204
Erro (%)	0,411	0,534	0,752	0,847	0,829	0,834	0,816	0,938	1,139	1,347
<b>IAC SI</b>										
Esperado	0,573	0,379	0,279	0,245	0,228	0,217	0,210	0,204	0,200	0,197
Medido	0,590	0,394	0,293	0,265	0,243	0,227	0,224	0,216	0,216	0,214
Erro (%)	2,967	3,958	5,018	8,163	6,579	4,608	6,667	5,882	8,000	8,629

Assim como no caso do teste anterior, o desempenho mostrado pela função de proteção desenvolvida em comparação com a função do relé comercial foi muito bom. Este



teste mostra mais uma vez a confiabilidade da função de proteção desenvolvida, uma vez que os valores medidos não tiveram uma grande diferença em relação ao valor esperado e ainda, tiveram uma boa proximidade com os valores do relé digital.

Para comprovar essa proximidade dos resultados, tanto do valor teórico, quanto do valor para o relé comercial, curvas foram traçadas, usando-se as fórmulas para cada uma das curvas e os pontos obtidos mostrados nas tabelas acima foram colocados no mesmo gráfico.

Primeiramente os gráficos relacionados à curva com padrão IEEE são mostrados nas Figuras 24, 25 e 26.

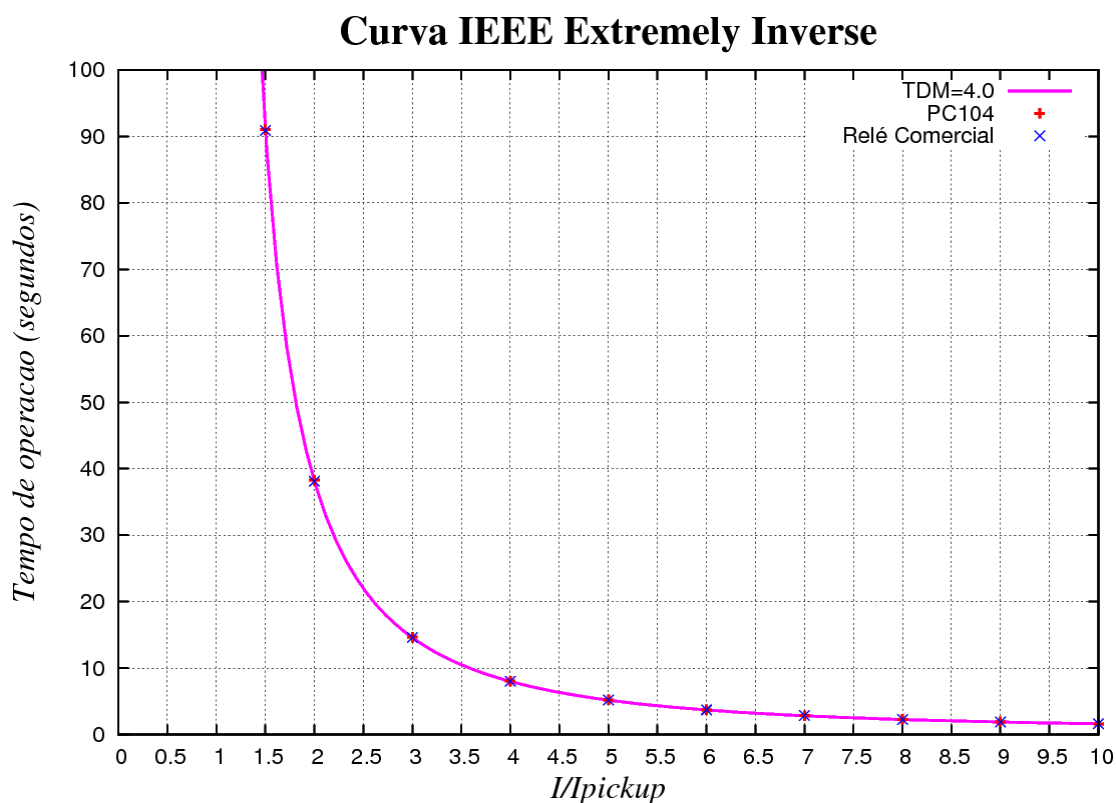
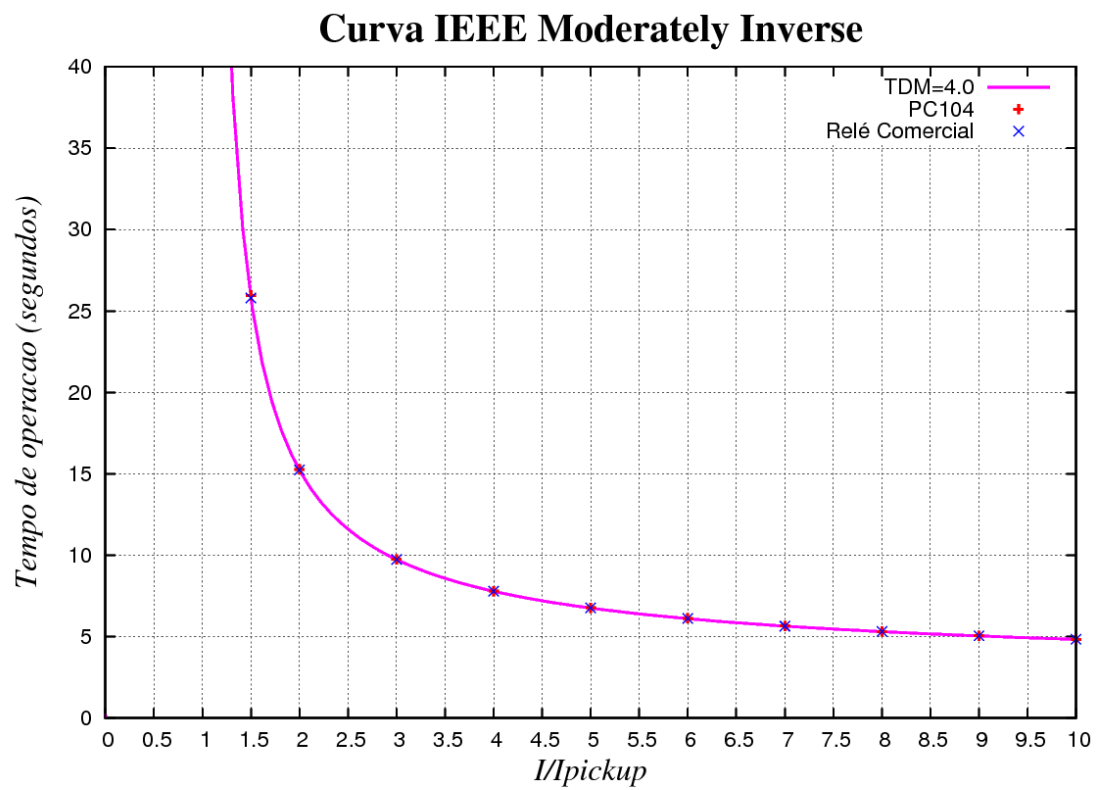
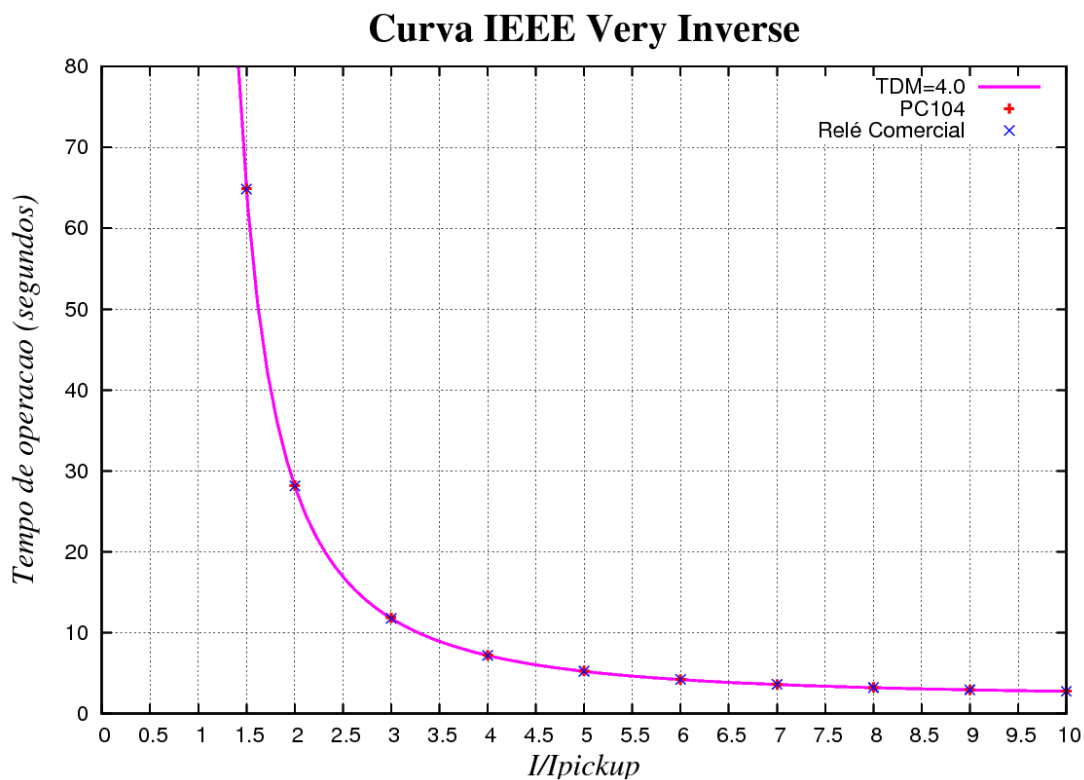


Figura 24: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEEE *Extremely Inverse*

Figura 25: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEEE *Moderately Inverse*Figura 26: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEEE *Very Inverse*

Analisando-se os três gráficos mostrados anteriormente, é possível notar que tanto os pontos testados usando o relé comercial quanto os pontos usando o PC104 estão praticamente em cima da curva teórica. Isso mostra que para as curvas da família IEEE, os resultados foram extremamente satisfatórios, pelo fato de o desempenho da função aqui desenvolvida estar próximo tanto do relé comercial quanto da curva teórica.

Nas Figuras 27, 28, 29 e 30 apresentam-se os resultados para as curvas da família IEC (BS142).

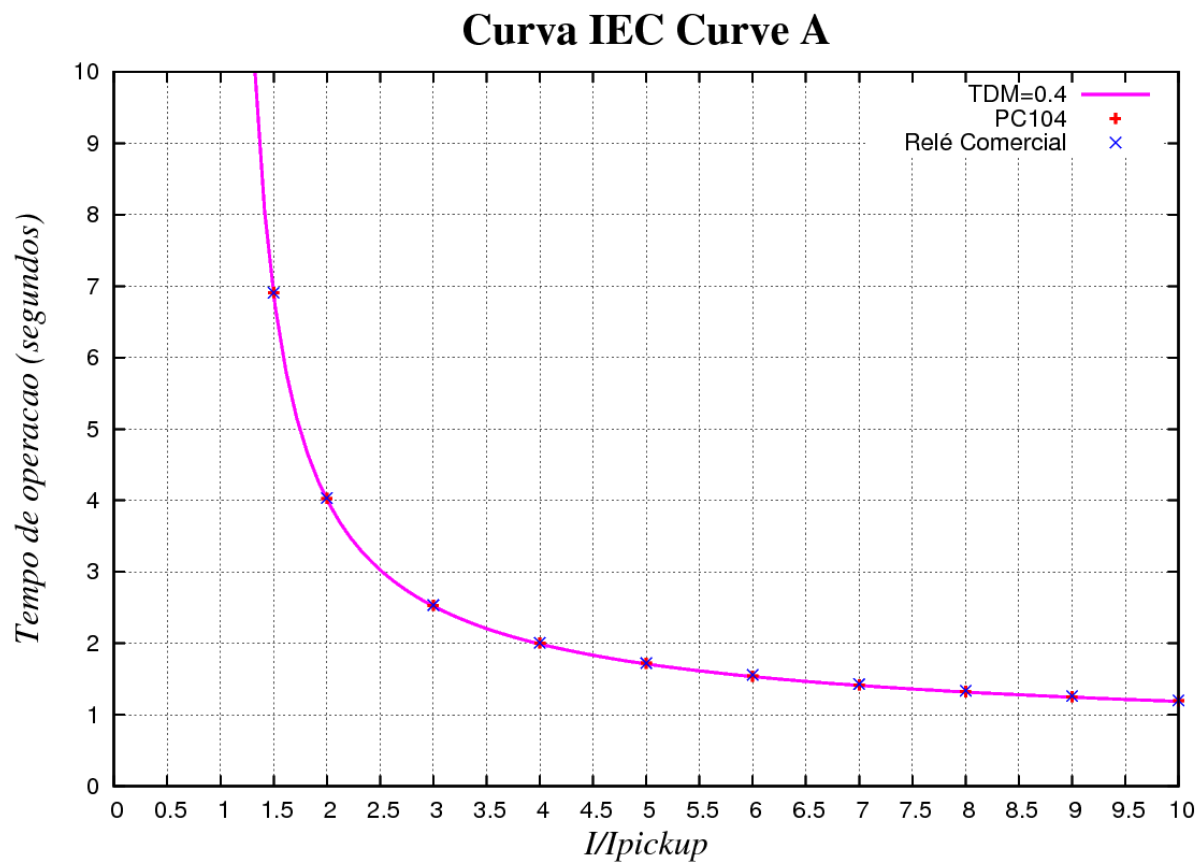


Figura 27: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEC A

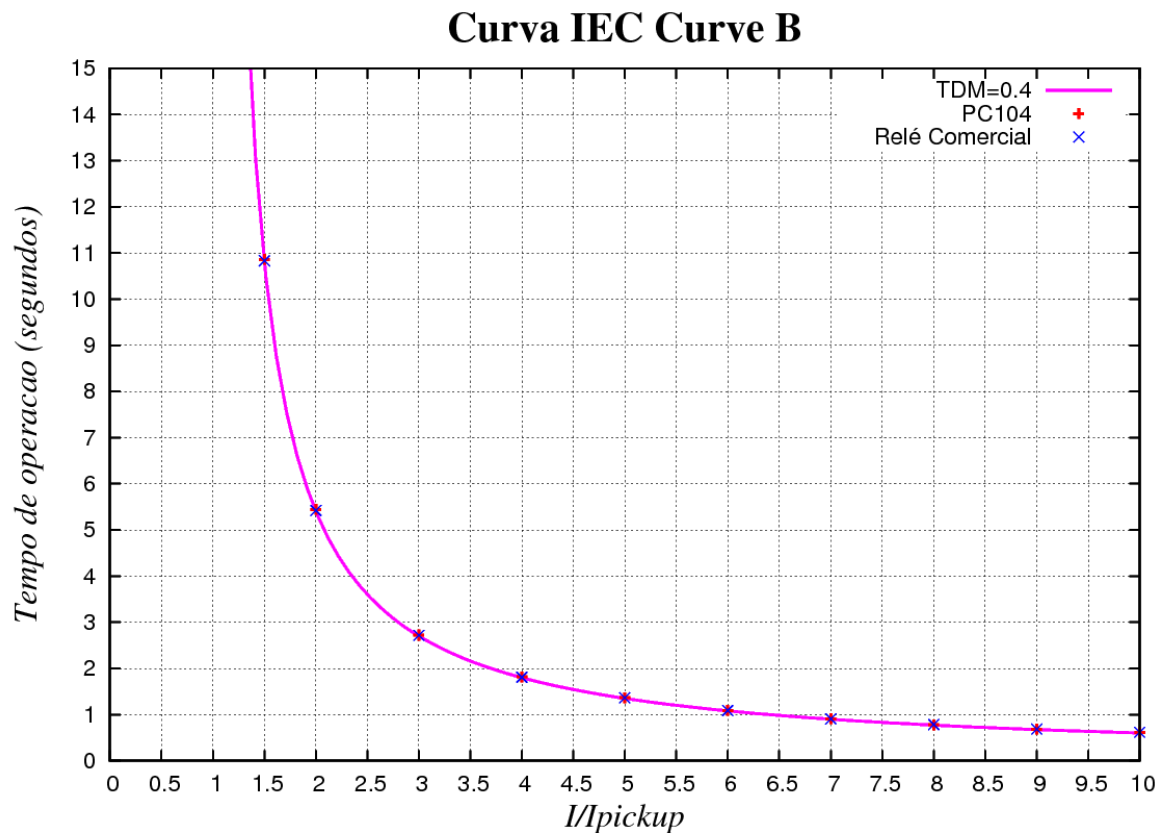


Figura 28: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEC B

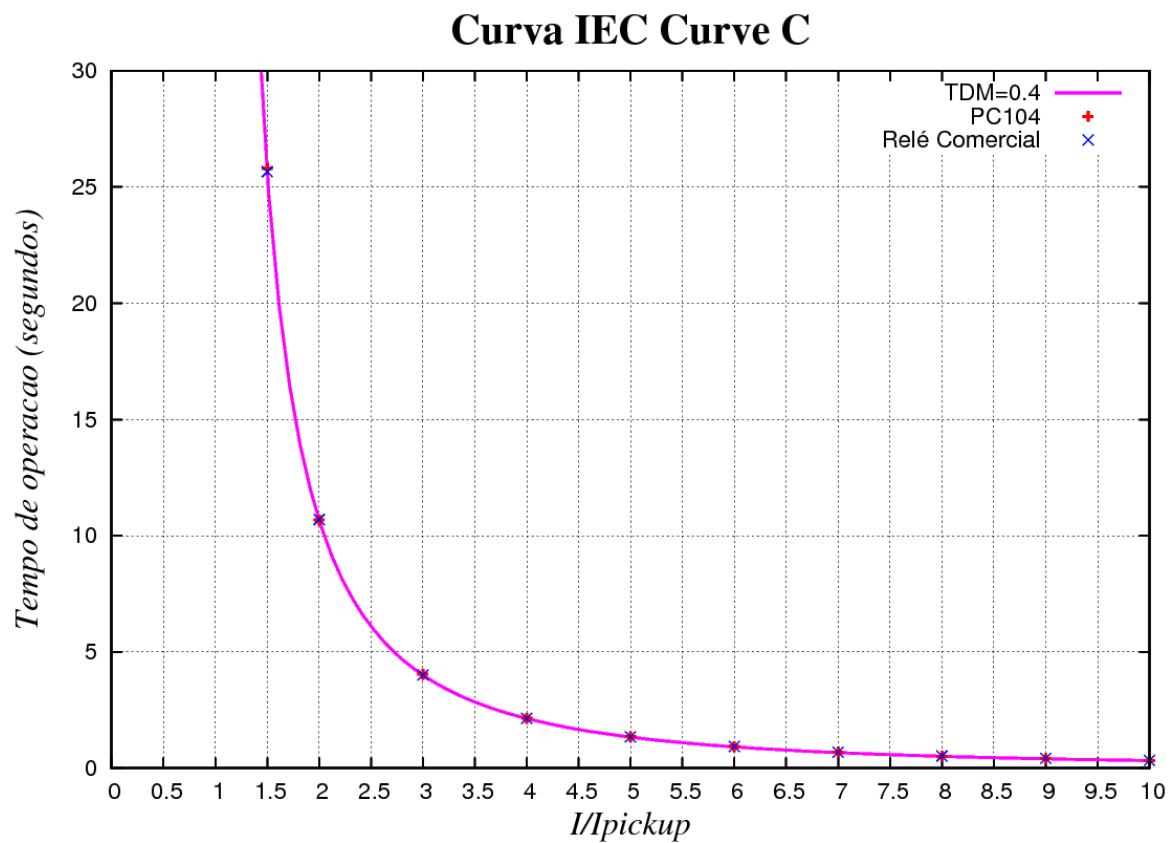
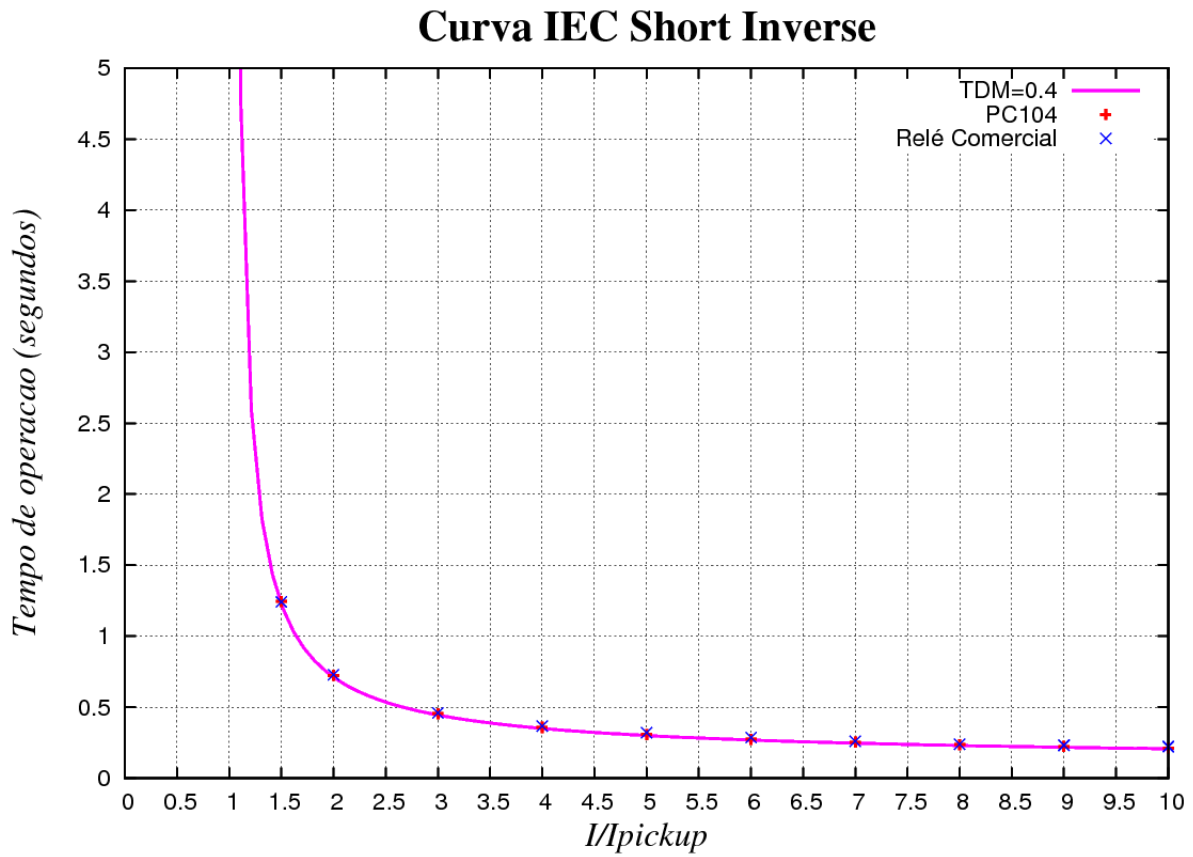


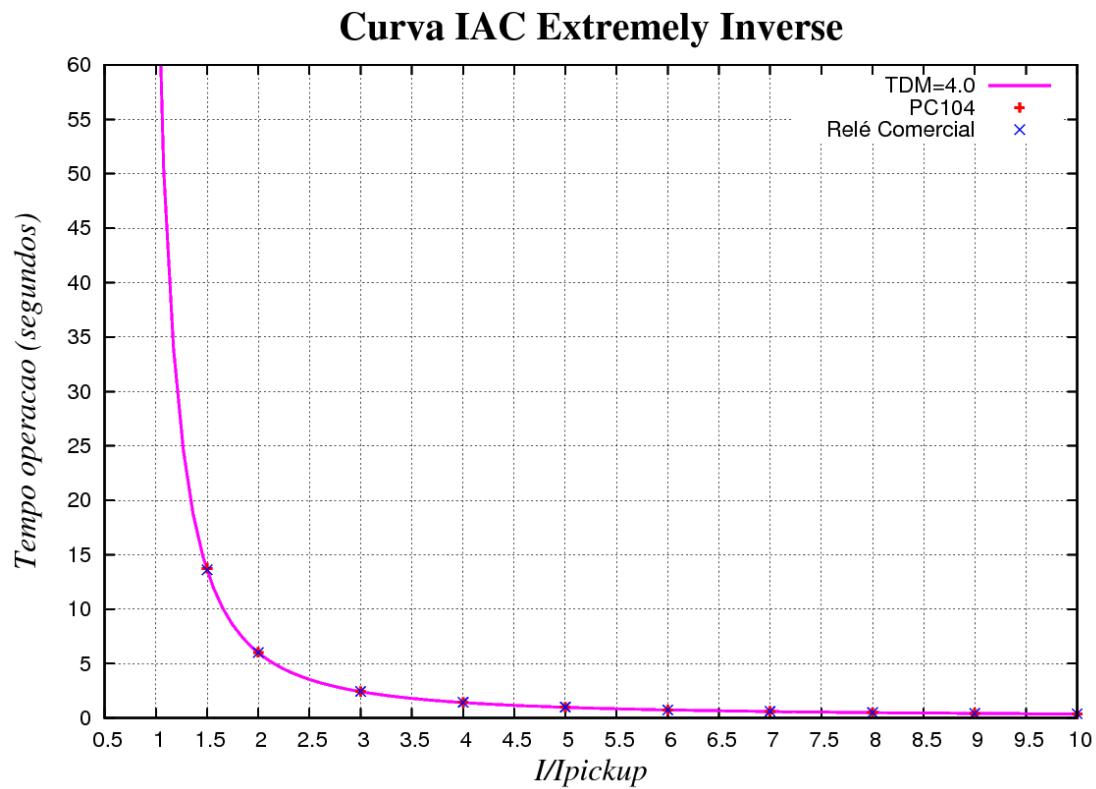
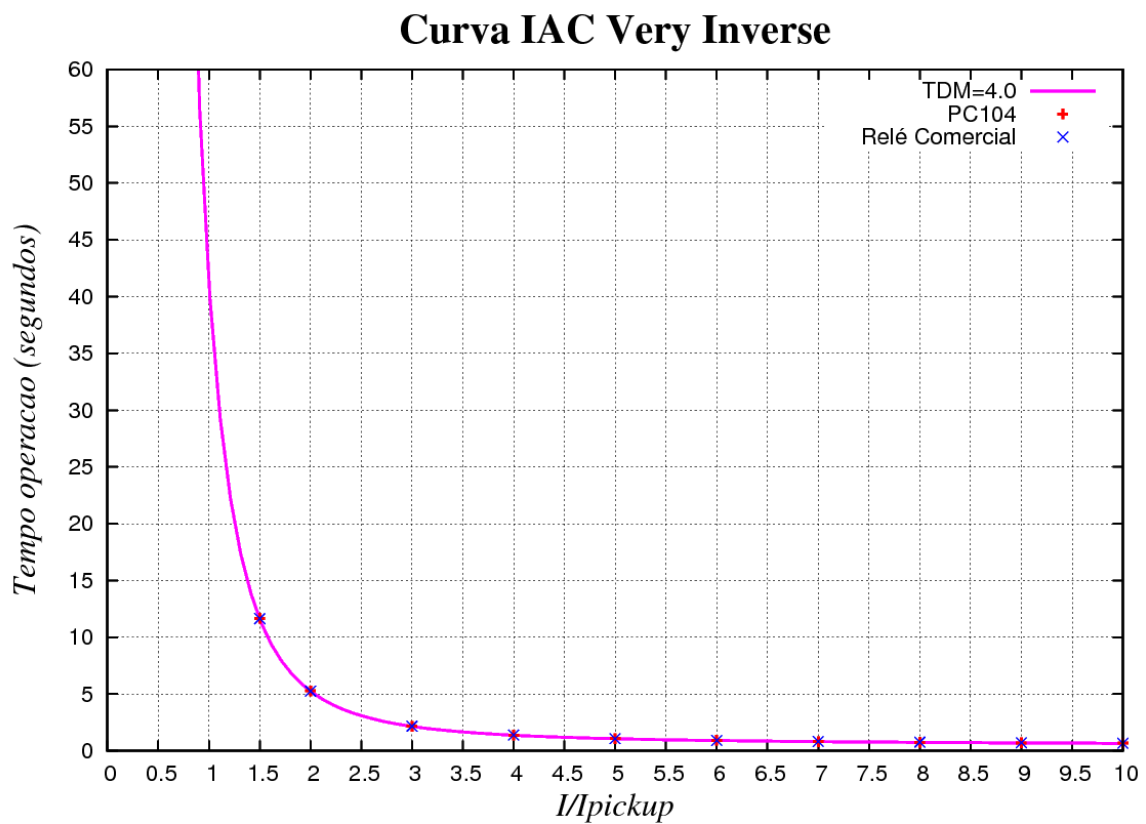
Figura 29 : Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEC C



**Figura 30:** Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IEC *Short Inverse*

Mais uma vez, analisando-se as quatro curvas do padrão IEC, nota-se que os pontos testados para o caso do PC104 estiveram muito próximos dos pontos para o relé comercial e também da curva teórica. Pode-se então afirmar que também para o caso das curvas da família IEC o desempenho da função desenvolvida foi altamente satisfatório.

Por fim, estão mostrados nas Figuras 31, 32, 33 e 34 os resultados para as curvas do padrão GE *Type IAC*. Nas Figuras 31 e 32, a mesma análise dos resultados anteriores pode ser aplicada, já que mais uma vez os pontos de ambos os testes estão próximos entre si e também estão praticamente dentro da curva teórica. O resultado para o caso da Figura 33, foi, entre todos os casos, o único a apresentar dois pontos que não atingiram a curva teórica. Isso ocorreu também com os mesmos pontos para o caso do relé comercial, logo tal comportamento não deve ser considerado um resultado não aceitável, pelo contrário, pois ele está de acordo com a atuação do relé digital disponível no mercado. Além disso, na Figura 34, é possível notar uma pequena diferença entre os pontos dos dois testes, vê-se que os pontos do PC104 estão ligeiramente mais próximos à curva teórica do que os pontos do relé comercial, mostrando mais uma vez o bom desempenho da função desenvolvida neste trabalho.

Figura 31: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IAC *Extremely Inverse*Figura 32: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IAC *Very Inverse*

### Curva IAC Inverse

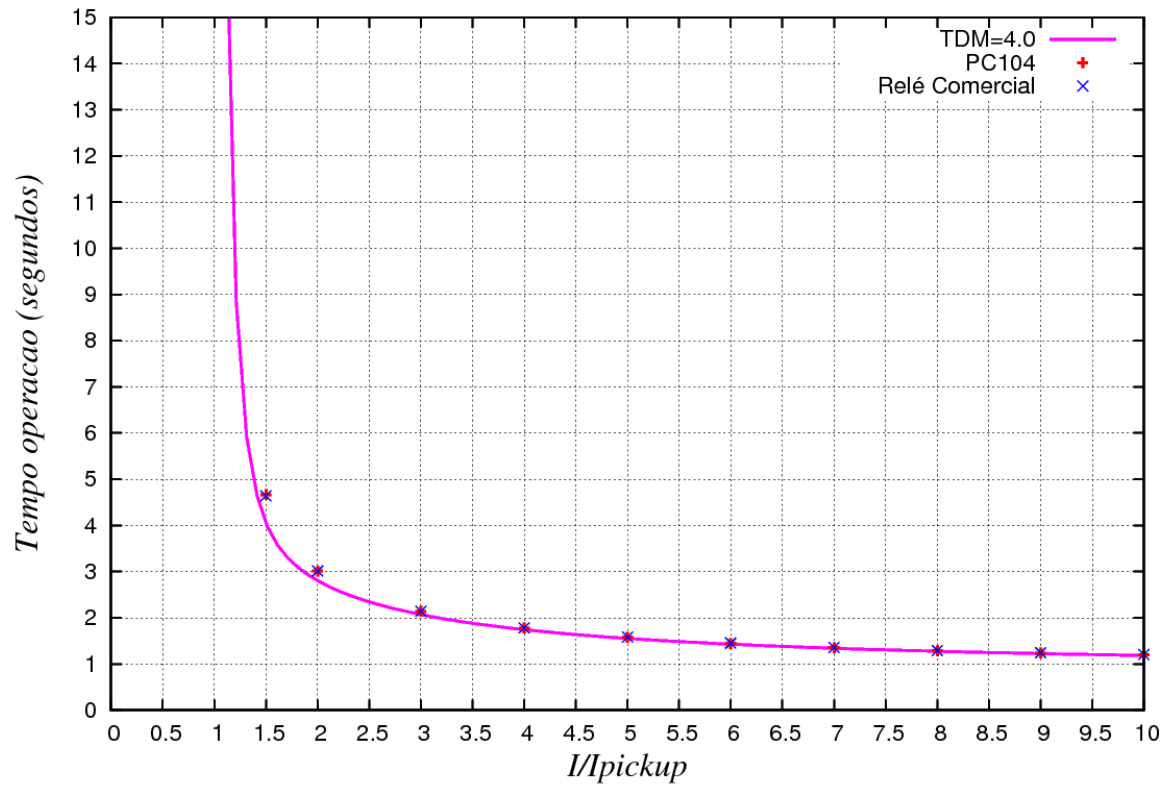


Figura 33: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IAC *Inverse*

### Curva IAC Short Inverse

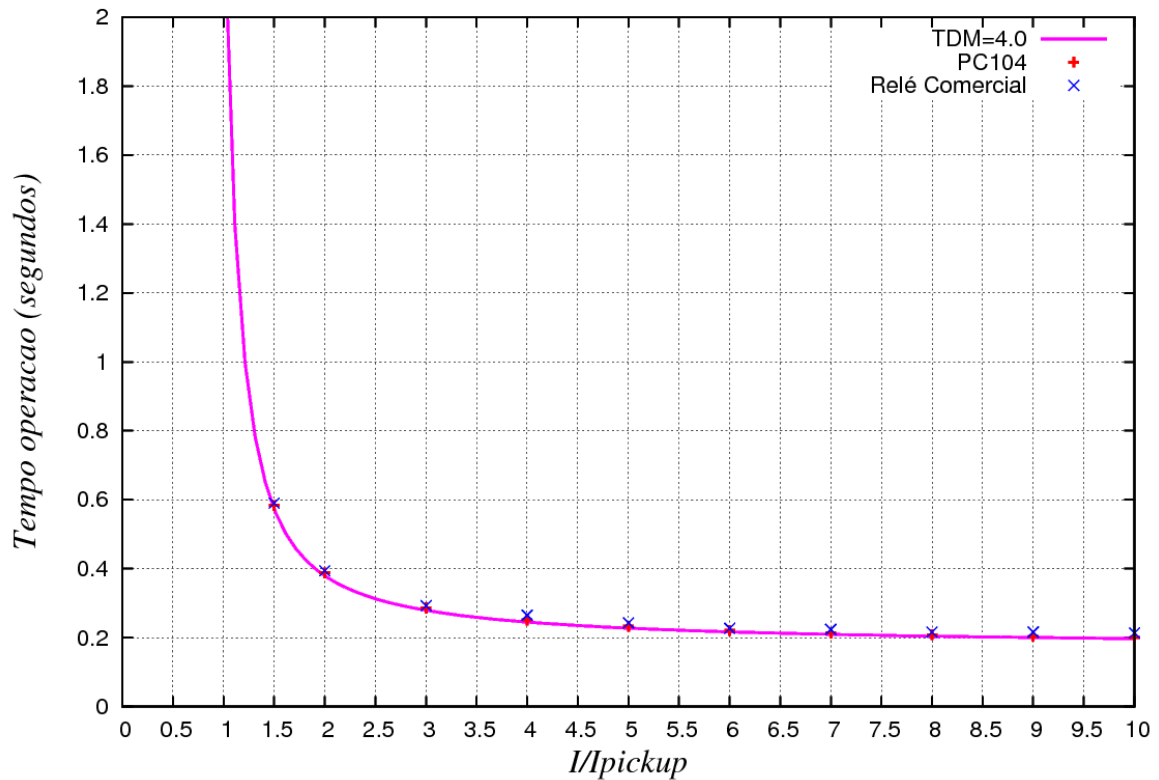


Figura 34: Gráfico mostrando o resultado dos testes para a curva IAC *Short Inverse*

Todos esses testes foram importantes na validação da função desenvolvida neste trabalho, pois à medida em que eles foram sendo realizados, acrescentou-se cada vez mais credibilidade à função, mostrando com clareza todo o seu desempenho e constância nos resultados. Além disso, o primeiro teste computacional proporcionou uma validação da função desenvolvida. Os testes seguintes, utilizando a plataforma PC104 deram sua contribuição para a validação da função de proteção atuando em tempo real.

Fazendo-se uma análise geral, incluindo todos os testes realizados, pode-se afirmar que a função de proteção aqui desenvolvida utilizando a plataforma PC104 obteve um desempenho muito bom, semelhante à função do relé digital disponível comercialmente, o qual constitui o melhor parâmetro para servir de comparação ao trabalho desenvolvido. A comparação com a atuação de um relé comercial tornou os resultados obtidos com a função desenvolvida muito confiáveis. Esses resultados mostram também a possibilidade de se utilizar a plataforma PC104 para realizar testes de outros algoritmos de funções de proteção que possam ser desenvolvidas no futuro.



## Capítulo 7

# Conclusão

O desenvolvimento deste projeto concentrou-se na elaboração de uma função de proteção de sobrecorrente temporizada de tempo inverso, a qual é aplicada na proteção de geradores, e sua validação a partir de testes em laboratório. Mas para tanto, alguns passos precisaram ser tomados durante o caminho até culminar na função de proteção em si e na sua validação.

Inicialmente, foi necessário fazer um estudo bibliográfico sobre relés em geral e ainda mais especificamente, relés de sobrecorrente. A partir deste estudo, um grande aprendizado foi alcançado por parte do aluno, referente a esse tipo de proteção, o que permitiu iniciar o desenvolvimento da função de proteção propriamente dita.

Além desse estudo bibliográfico, fez-se necessário também realizar um estudo sobre o cenário no qual esta função seria aplicada, este cenário é o da proteção de geradores. Com esse estudo foi possível compreender melhor, por parte do aluno, a importância dos geradores síncronos para o sistema elétrico bem como a importância da proteção desses equipamentos.

Um aprendizado em relação à biblioteca *Open Relay*, na qual a função de proteção desenvolvida foi inserida, também foi realizado. Com esse aprendizado, foi possível entender a biblioteca como um todo, o que foi muito importante para a implementação da função de sobrecorrente de tempo inverso.

Além disso, foi realizado um aprendizado em relação aos *softwares* utilizados durante todo este trabalho, tais como *Gnuplot*, *Octave*, *ProTest*, e *EnerVista*. Foi realizado também, um aprendizado em relação aos equipamentos utilizados durante os testes deste trabalho. Portanto, até aqui, é possível notar que um grande conhecimento foi adquirido durante a elaboração deste projeto. Assim, em relação ao aprendizado, é possível concluir que este trabalho agregou muitos conhecimentos ao aluno e que com certeza serão muito importantes no seu futuro.

Em relação à função de proteção desenvolvida algumas conclusões podem ser feitas a seu respeito, levando em consideração todos os testes realizados. Inicialmente,

referindo-se ao primeiro teste, é possível concluir que já neste momento a função apresentou bons resultados, o que foi determinante para validar a função de proteção.

Referindo-se agora, especificamente aos outros dois testes, pode-se concluir que os resultados da função desenvolvida apresentados neles foram satisfatórios, pois sua comparação com a função do relé comercial mostrou um desempenho muito próximo entre os dois. Até mesmo nos erros apresentados, houve uma proximidade entre o PC104 e o relé T60. Porém, em relação aos erros relativos altos encontrados em algumas medidas testadas, pode-se concluir que esses erros não são tão preocupantes, devido ao fato de essas medidas estarem associadas a tempos de atuação muito pequenos, e por esse motivo, atrasos de qualquer origem podem influenciar diretamente nesse tempo de atuação, caracterizando esse erro elevado. Em contrapartida, analisando os erros absolutos, estes mostraram-se relativamente baixos para ambos os sistemas montados (PC104 e T60). Assim, esses testes foram decisivos para a validação da função de proteção atuando em tempo real, o que é um resultado importante a ser alcançado, visto que as funções de proteção devem atender este requisito.

Portanto, analisando de uma forma geral, pode-se concluir que o objetivo deste trabalho foi atingido, pois a função de proteção desenvolvida apresentou bons resultados e um desempenho muito bom tanto para o teste computacional quanto em *hardware* (dado em tempo real), e até mesmo quando esta função foi comparada com a de um reconhecido relé comercial disponível no mercado.

# Referências Bibliográficas

[1] Almeida, M. A. D. "Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos", Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2000.

[2] Coury, D. V.; Oleskovicz, M.; Giovanini, R. "Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes" São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007.

[3] Caminha, A. C. "Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos" São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1977.

[4] Lima, J. C. M. "Aspectos de proteção e controle do gerador síncrono subexcitado". Belo Horizonte: Dissertação de mestrado pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2002.

[5] Rockefeller, G. D. "*Fault Protection with a Digital Computer*". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88, No. 4, pp. 438-464, Abril de 1969.

[6] Mann, B. J.; Morrison, I. F. "*Digital calculation of impedance for transmission line protection*". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-90, No.1, pp. 270-279, Janeiro/Fevereiro de 1971.

[7] Poncelet, R. "The use of digital computers for network protection". *CIGRÉ Paper no. 32-08*, Paris, 1972.

[8] Rammamoorthy, M. "*Application of digital computers to power system protection*". *Journal of Institution of Engineers Vol. 52 No. 10*, Índia, 1972.

[9] McLaren, P. G.; Redfern, M. A. “*Fourier series techniques applied to distance protection*”. *Proceedings of IEE* Vol. 122 No. 11, 1975.

[10] “*Central Computer Control and Protection Functions*”. *Power System Relaying Committee. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Jan/Feb 1978.

[11] Salles, N. J. “*Modelagem e Análise Dinâmica de Sistemas de Proteção de Redes de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geradores Síncronos*”. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

[12] Breda, J. F. D. “*Um Modelo Computacional para o Relé Digital de Sobrecorrente Empregado na Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*”. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, 2009.

[13] Elmore, W. A. “*Protective Relaying Theory and Applications*” Marcel Dekker, Inc., New York, NY, 2004.

[14] CIGRÉ Working Group SC 34.05, “*Results of CIGRÉ Survey on the Electrical Protection of Synchronous Generators*”, 1995.

[15] IEEE Std.C37.102-1987. “*IEEE Guide for AC Generator Protection*”, New York, 2007.

[16] Newton-Evans Research Company Inc. “*Worldwide Study of Protective Relay Marketplace in Electric Utilities: 2009-2011*” Volume 1, 2009.

[17] IEC Std 60255-3. “*Electrical relays - Part 3: Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time*”, 1989.

[18] GE Industrial Systems. “*G60 Generator Protection System – UR Series Instruction Manual*”, GE Multilin, 2009.

[19] IEEE Std.C37.112-1996, "IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays", *IEEE Standards Board – Power System Relaying Committee*, 1996.

[20] IEC Std.60255-4, "Electrical Relays – Part 4: Single input energizing quantity measuring relays with dependent specified time", *IEC Standard 60255-4*, 1976.

[21] *British Standard Std.BS142 - Part 3 - Section 3.2 "Electrical Protection Relays - Requirements for single input energizing quantity relays - Specification for single input energizing quantity measuring relays with dependent specified time"*, BSi, 1990.