

ROGÉRIO ANTONIO DA SILVA

**COMPORTAMENTO DA FUNÇÃO DE
PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE
INSTANTÂNEA FRENTE A
DISTRORÇÕES HARMÔNICAS NOS
RELÉS DE PROTEÇÃO NUMÉRICOS**

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. Tit. Denis Vinícius Coury

São Carlos

2008

Dedico este trabalho ao meu querido pai Severino, pelo exemplo de força de vontade e dedicação que me dá, no modo com que conduz sua vida. A ele devo muito do que sou. Meu eterno agradecimento.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Severino e Maria, por me oferecerem todas as oportunidades de estudo na vida, e sempre me dando conselhos e carinho para seguir em frente, mesmo nos tempos mais adversos.

À minha irmã, Rosângela, pelos bons momentos e críticas construtivas.

Ao professor Tit. Denis Vinícius Coury, pela oportunidade de realizar meu trabalho na área de proteção de sistemas elétricos de potência, área em que iniciei minha trajetória profissional e que tanto admiro.

Aos amigos do LSEE Ulisses Chemin Netto e Daniel Barbosa, pela imensa ajuda, orientação e paciência no desenvolvimento e revisão deste trabalho.

Aos professores Dr. Mário Oleskovicz e Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior, por fornecerem dados importantes para o desenvolvimento do trabalho e pela ajuda nos momentos de dúvida.

Ao grande amigo da ABB, Alexandre Piatniczka, a quem devo muito, por todo o suporte dado neste ano de 2008.

Aos amigos da minha república, que se tornaram minha segunda família na graduação, aos grandes amigos do curso de Engenharia Elétrica do ano de 2004, aos grandes irmãos de Limeira e aos amigos de trabalho da ABB.

A todos os professores e funcionários da EESC que, de alguma forma, contribuíram para minha formação.

E sempre, sobretudo, a Deus.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SIGLAS.....	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Disposição do Texto	2
2. Proteção e Seus Conceitos.....	3
2.1. Elementos do Sistema de Proteção	4
2.2. Zonas de proteção	5
2.3. Principais Equipamentos Protegidos por Relés.....	6
3. Evolução Tecnológica dos Relés de Proteção.....	9
3.1. Relés Eletromecânicos.....	9
3.1.1. Relés de atração eletromagnética	9
3.1.2. Relés de indução eletromagnética	10
3.1.3. Relés de D´Arsonval.....	12
3.1.4. Relés Térmicos	12
3.2. Relés Eletrônicos Estáticos	12
3.3. Relés Numéricos	14
3.3.1. Entradas Analógicas.....	16
3.3.2. Entradas Digitais	16
3.3.3. Alimentação Auxiliar	17
3.3.4. Contatos de Saída	17
3.3.5. Parametrização	18
3.3.6. Interface Homem-Máquina (IHM)	18
3.3.7. Registro de Eventos	20

3.3.8. Relógio de tempo real	20
3.3.9. Oscilografia	21
3.3.9.1. O Formato COMTRADE	23
3.3.10. Auto-Supervisão	24
3.3.11. Comunicação.....	25
3.3.11.1. Topologias de Rede	25
3.3.11.2. Protocolos.....	27
4. Proteção de Sobrecorrente em Relés Numéricos	29
4.1. Curvas de Tempo Inverso IEC (IEC 60255-3)	29
4.2. Curvas de Tempo Inverso ANSI (IEEE C37.112).....	31
4.3. Curvas de Tempo Definido	33
4.4. Estágios de Proteção e Sobreposição de Curvas	34
5. Harmônicas e Distorções Harmônicas	37
5.1. Cabos.....	40
5.2. Transformadores	41
5.3. Motores de Indução	42
5.4. Máquinas Síncronas	43
5.5. Bancos de Capacitores	44
5.6. Equipamentos de Proteção.....	45
6. Sistema de Distribuição Estudado	47
6.1. Cálculo dos Parâmetros de Falta do Sistema	51
6.1.1. Cálculo dos Valores Base.....	52
6.1.2. Falta Trifásica	53
6.2. Simulação dos Casos de Falta no Software ATP	54
6.3. Ensaio da Função 50 em um Relé Digital de Proteção Comercial	57
6.3.1. Cálculo dos Ajustes do Relé.....	58
6.3.2. Metodologia de Análise e Resultados Obtidos	59

7. Conclusões.....	63
7.1. Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	64
8. Referencias Bibliográficas	65
9. Bibliografia.....	67
A. Anexo I – Curvas de Tempo Inverso para Proteção de Sobrecorrente.....	69
B. Anexo II – Código-Fonte do Programa ATP.....	77
C. Anexo III – Formas de Onda dos Casos Simulados no <i>Software</i> ATP	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de zonas de proteção	5
Figura 2 - Falta no ponto X e função da zona de proteção sobreposta	6
Figura 3 - Exemplo de relés eletromecânicos.....	10
Figura 4 - Componentes de um relé do tipo disco de indução	11
Figura 5 - Diagrama de funcionamento de um relé estático	13
Figura 6 - Exemplo de diagrama de blocos internos de um relé numérico.....	15
Figura 7 - Relé de proteção numérico Pextron.....	19
Figura 8 - Relé de proteção numérico ABB	19
Figura 9 - Exemplo de oscilografia.....	22
Figura 10 - Exemplos de topologia de rede	26
Figura 11 - Curva IEC Normal Inversa.....	31
Figura 12 - Curva ANSI Inversa.....	33
Figura 13 - Curva de atuação por tempo definido.....	34
Figura 14 - Sobreposição das curvas de atuação dos três estágios de sobrecorrente	35
Figura 15 - Formas de onda distorcidas por harmônicas de 3ª e 5ª ordem, respectivamente	37
Figura 16 - Vida útil de um transformador em função da distorção harmônica de corrente... 42	42
Figura 17 - Perdas elétricas de um motor de indução trifásico em função da distorção total de tensão	43
Figura 18 - Vida útil em função da sobre-temperatura em capacitores	44
Figura 19 - Vida útil em função da sobretemperatura em capacitores.....	45
Figura 20 - Sistema de distribuição estudado.....	47
Figura 21 - Espectro harmônico da corrente de uma estação de trabalho.....	49
Figura 22 - Espectro harmônico da corrente de um microcomputador	49
Figura 23 - Espectro harmônico da corrente de um inversor de freqüência	50
Figura 24 - Espectro harmônico da corrente de um <i>DC drive</i>	50

Figura 25 - Espectro harmônico da corrente de um forno a arco	50
Figura 26 - Espectro harmônico da corrente de um forno de indução	51
Figura 27 - Circuito equivalente do sistema.....	52
Figura 28 - Situação de regime, sem a presença de harmônicas.....	55
Figura 29 - Situação de regime, com a presença de harmônicas.....	56
Figura 30 - Situação de falta trifásica (00, 0°), sem a presença de harmônicas	56
Figura 31 - Situação de falta trifásica (00, 0°), com a presença de harmônicas	57
Figura 32 - Esquema de testes.....	58
Figura 33 - Relatório gerado pela caixa de testes.....	59
Figura 34 - Oscilografia do relé (caso 2 da tabela 8).....	60
Figura 35 - Oscilografia do relé (caso 7 da tabela 8).....	60
Figura 36 - Curva IEC Normal Inversa.....	69
Figura 37 - Curva IEC Muito Inversa.....	70
Figura 38 - Curva IEC Extremamente Inversa.....	71
Figura 39 - Curva IEC Inversa de Tempo Longo	72
Figura 40 - Curva ANSI Extremamente Inversa	73
Figura 41 - Curva ANSI Muito Inversa	74
Figura 42 - Curva ANSI Inversa.....	75
Figura 43 - Situação de regime, sem a presença de harmônicas.....	93
Figura 44 - Situação de falta trifásica (00, 0°), sem a presença de harmônicas	93
Figura 45 - Situação de falta trifásica (00, 90°), sem a presença de harmônicas.....	94
Figura 46 - Situação de falta trifásica (400, 0°), sem a presença de harmônicas.....	94
Figura 47 - Situação de falta trifásica (400, 90°), sem a presença de harmônicas.....	95
Figura 48 - Situação de regime, com a presença de harmônicas.....	95
Figura 49 - Situação de falta trifásica (00, 0°), com a presença de harmônicas	96
Figura 50 - Situação de falta trifásica (00, 90°), com a presença de harmônicas.....	96
Figura 51 - Situação de falta trifásica (400, 0°), com a presença de harmônicas.....	97

Figura 52 - Situação de falta trifásica (400, 90°), com a presença de harmônicas.....	97
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Detecção de faltas por comparação de amostras	22
Tabela 2 - Classificação de curvas segundo a norma IEC 60255-3	30
Tabela 3 - Classificação de curvas segundo a norma IEEE C37.112	32
Tabela 4 - Nomenclatura dos estágios de sobrecorrente segundo normas IEC e ANSI	34
Tabela 5 - Dados dos transformadores particulares	48
Tabela 6 - Dados dos transformadores de distribuição	48
Tabela 7 - Dados de impedância do sistema	52
Tabela 8 - Lista de casos simulados no <i>software</i> ATP.....	54
Tabela 9 - Resultados de tempo obtidos no ensaio.....	61

LISTA DE SIGLAS

- A/D – Analógico/Digital
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANSI – *American National Standards Institute*
- ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*
- ATP – *Alternative Transients Program*
- CA – Corrente Alternada
- CC – Corrente Contínua
- CLP – Controlador Lógico Programável
- COMTRADE – *Common Format for Transient Data Exchange for Power Systems*
- CSMA – *Collision-Sensing Multiple Access*
- EEPROM – *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*
- EPROM – *Erasable Programmable Read-Only Memory*
- fp – Fator de Potência
- GPS – *Global Positioning System*
- IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
- IHM – Interface Homem-Máquina
- NOVRAM – *Non-volatile RAM*
- pu – por unidade
- QEE – Qualidade da Energia Elétrica
- RAM – *Random Access Memory*
- ROM – *Read-Only Memory*
- RTD – *Resistive Thermal Device*
- SEP – Sistema Elétrico de Potência
- TC – Transformador de Corrente
- TP – Transformador de Potencial

RESUMO

SILVA, R. A. (2008). *Comportamento da Função de Proteção de Sobrecorrente Instantânea Frente a Distorções Harmônicas nos Relés de Proteção Numéricos.* Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Relés de proteção são amplamente usados nos sistemas de proteção de energia elétrica. Este trabalho visa estudar o desempenho da função de proteção de sobrecorrente instantânea existente nos relés de proteção numéricos frente a distorções harmônicas, tópico da qualidade de energia que vem sendo considerado com cada vez maior importância dentro do sistema elétrico. Para a realização dos testes, inicialmente foi feita uma simulação de um sistema de distribuição no *software* ATP (*Alternative Transients Program*). As formas de onda obtidas por essa simulação foram então aplicadas em um relé de proteção comercial, para observação do comportamento da função de proteção de sobrecorrente instantânea. Efetuaram-se diversas simulações cujos resultados representam o comportamento dos relés de proteção frente a diferentes níveis de distorção harmônica, gerados por cargas não-lineares. Concluiu-se, após os testes, que a interferência de distorções harmônicas não foi um fator significativo para o desempenho dessa função de proteção, nos casos estudados.

Palavras chave: ATP, Distorções Harmônicas, Proteção de Sobrecorrente, Relés de Proteção, Sistemas Elétricos de Potência.

ABSTRACT

SILVA, R. A. (2008). *Behavior of the Instantaneous Overcurrent Protection Facing Harmonic Distortion in the Numerical Protection Relays.* Under Graduation Monograph – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Protection relays are widely used in the protection of Electrical Power Systems, and this study aims to examine the performance of the instantaneous overcurrent protection facing harmonic distortion, a topic of Power Quality that is being considered with increasing importance within the electrical systems. For the tests, a simulation of a distribution system was performed in the software ATP (Alternative Transients Program). The wave forms obtained by the simulation were then tested in an overcurrent protection relay, for observation of the behavior of the instantaneous overcurrent protection. Several simulations were carried, whose results represent the behavior of protective relays facing different levels of harmonic distortion, generated by nonlinear loads. It was concluded, after the tests, that the interference of harmonic distortion was not a significant factor for the performance of this protection function, in the studied cases.

Key words: ATP, Electrical Power Systems Harmonic Distortion, Overcurrent Protection, Protection Relays.

1. Introdução

Atualmente, o capital investido em um sistema de potência para geração, transmissão e distribuição de energia é tão grande que é necessário tomar precauções para garantir que os equipamentos trabalhem o mais próximo possível da sua capacidade máxima, mas fora de condições em que possam ocorrer acidentes.

O caminho normal para a corrente elétrica é da fonte de potência para a carga através dos condutores. No entanto, uma falta pode ser causada por falha na isolação, efeitos do tempo ou por algum acidente físico de forma que a corrente elétrica fuja do seu caminho normal.

Na maioria das vezes os efeitos de uma falta, em que uma enorme quantidade de energia é dispersada, podem levar à destruição dos equipamentos envolvidos, severas quedas de tensão e perda do faturamento devido a interrupção do serviço.

Dessa forma, faz-se necessária a utilização do sistema de proteção para que na existência de uma falta, os equipamentos envolvidos sejam desligados rapidamente. Os relés de proteção são elementos cruciais no sistema de proteção, sendo responsáveis por monitorar grandezas elétricas e decidir quanto à operação de disjuntores para desligar um determinado circuito ou parte dele.

Várias tecnologias foram empregadas na construção e aplicação dos relés de proteção, iniciando com os relés eletromecânicos. Após os relés eletromecânicos, surgiram os relés estáticos, e com eles o início do uso da tecnologia de semicondutores. Com o desenvolvimento das tecnologias, foram criados os relés numéricos, dotados de velocidades altas de resposta, capazes de acumular diversas funções em um só equipamento ou ainda trabalhar em redes de comunicação possibilitando tanto a sua monitoração quanto intervenções de engenharia e acesso remoto às funções do relé.

Paralelamente a esse crescimento na tecnologia de relés, e impulsionado pela desregulamentação do setor elétrico brasileiro, que promoveu a abertura do mercado de energia e incentivou a concorrência entre empresas, cresceu nos últimos anos o termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE).

Este termo está relacionado a novas técnicas de análise de energia elétrica, e o interesse em mantê-la dentro de padrões pré-definidos, de forma a ter um produto final (energia) de melhor qualidade, o que influencia diretamente no preço de contratos de fornecimento e compra de energia.

Além disso, atualmente grande parte dos equipamentos industriais, comerciais ou até mesmo residenciais são fortemente baseados em cargas não lineares, podendo provocar distúrbios nos sinais elétricos responsáveis pela circulação da energia, influenciando negativamente na qualidade da energia da rede.

Um desses distúrbios é a presença de distorções harmônicas na forma onda. Será abordada nesse trabalho a influência desse tipo de distúrbio na atuação da função de proteção de sobrecorrente instantânea dos relés numéricos, e até que ponto o funcionamento do equipamento pode ser afetado.

Assim, os temas desse trabalho são Proteção e Qualidade da Energia Elétrica, buscando contribuir com os estudos existentes no sentido de apresentar o desempenho da função de proteção de sobrecorrente instantânea frente a essa nova abordagem do sistema elétrico.

1.1. Disposição do Texto

No Capítulo 2, é feita uma introdução ao Sistema de Proteção e aos seus conceitos principais, abordando quais são os requisitos essenciais de um sistema de proteção, o conceito de zona de proteção, os equipamentos necessários para um sistema de proteção e finalmente quais são os elementos do sistema elétrico que são protegidos pelos relés.

Já no Capítulo 3, é feita uma análise do desenvolvimento tecnológico dos relés. Os relés eletromecânicos e estáticos são abordados de forma sucinta, sendo citados seus tipos e o princípio de funcionamento dos mesmos, com o uso de diagramas descritivos. Logo após, é feita uma abordagem dos relés numéricos, iniciada pelo funcionamento a partir do diagrama de blocos. Em seguida são abordados itens que fazem parte da construção física desse tipo de relé, como entradas e saídas digitais, para então serem analisados os itens de *software*, como oscilografia e lista de eventos.

O Capítulo 4 trata do funcionamento da proteção de sobrecorrente nos relés numéricos, mostrando a implementação nesse tipo de relé das curvas de proteção dos relés eletromecânicos.

No Capítulo 5 o tema Qualidade de Energia é abordado através do estudo de componentes harmônicas, resultantes de cargas não-lineares e responsáveis pelas distorções harmônicas nas formas de onda do sistema elétrico.

O Capítulo 6 é dedicado à apresentação do sistema elétrico estudado e dos testes realizados em laboratório, desde a arquitetura montada até a apresentação dos resultados obtidos nesses testes.

Finalmente, no Capítulo 7 são feitas as conclusões obtidas através da realização deste trabalho, bem como possíveis pontos de continuidade no estudo.

2. Proteção e Seus Conceitos

Inicialmente, para que possamos fundamentar a análise sobre o comportamento das proteções de sobrecorrente frente a distorções harmônicas, serão abordados, de forma sucinta, alguns conceitos sobre filosofia de proteção, elementos do sistema de proteção, zonas de proteção, diagramas unifilares e alguns principais equipamentos protegidos por relés de proteção. Entretanto, os relés de proteção de sobrecorrente serão descritos com maior propriedade no capítulo 4.

O termo proteção pode ser definido como: “Ação automática provocada por dispositivos sensíveis a determinadas condições anormais que ocorrem em um circuito, no sentido de evitar ou limitar danos a um sistema ou equipamento elétrico” (ABNT/NBR 5459, 1987).

Em todas as aplicações onde é empregada a energia elétrica observa-se a utilização de dispositivos de proteção para limitar a extensão ou evitar danos permanentes a sistemas ou equipamentos elétricos, seja na indústria, comércio, residência, etc. Os dispositivos de proteção são elementos que devem passar despercebidos durante a operação normal do sistema ou equipamento elétrico, até que ocorra uma situação anormal ou intolerável que venha a solicitar sua atuação. Situações anormais ou intoleráveis, podem ser exemplificadas por variações de frequência, aumento de temperatura acima da tolerada, sobrecorrente causada, seja por sobrecarga ou curto-circuito, sobretensão, etc. A aplicação de dispositivos de proteção é denominada sistema de proteção, cujo objetivo é isolar o mais rápido possível a área do sistema onde ocorreu a falha.

Dentro desse contexto, espera-se que um sistema protegido por relés apresente cinco qualidades básicas (MASON, 1956).

a) Confiabilidade: indica o grau de certeza em que o sistema de proteção irá atuar consistentemente para todas as falhas para as quais foi previsto e ignorar todas as demais;

b) Seletividade: é a “coordenação das características de operação de dois ou mais dispositivos de proteção contra sobrecorrentes, de modo que, no caso de ocorrerem sobrecorrentes entre limites especificados, somente opere o dispositivo previsto para operar dentro desses limites (ABNT/NBR 5459, 1987).

c) Velocidade: é o tempo necessário para interromper o sistema onde tenha ocorrido alguma falta. A velocidade de atuação é qualidade essencial, pois quanto mais rápida a atuação, menores serão os danos ao sistema;

d) Sensibilidade: indica a capacidade em perceber variações dentro de sua zona de atuação. Quanto maior a sensibilidade, menor a amplitude das variações que o dispositivo é capaz de perceber;

e) Escalabilidade: é a capacidade de permitir evoluções. Como os sistemas elétricos industriais e comerciais são raramente desligados, minimizando perdas de produção, o sistema de proteção deve permitir expansões sem necessidade de manutenções ou, caso seja necessário, que sejam de curta duração (VERSCHOORE, 1986).

2.1. Elementos do Sistema de Proteção

Os elementos do sistema de proteção são diretamente responsáveis pelo correto funcionamento do SEP (Sistema Elétrico de Potência), isolando as áreas afetadas por possíveis faltas.

A seguir serão apresentados, brevemente, os principais elementos que constituem um sistema de proteção.

a) Disjuntor: “Dispositivo de manobra (mecânico) capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, assim como estabelecer, conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito (ABNT/NBR 5459, 1987);

b) Relé: um dispositivo elétrico que é projetado para responder às condições de entrada de forma pré-estabelecida e, depois que condições especificadas são atingidas, causar a operação do contato ou mudança abrupta similar em circuitos elétricos de controle. [...] As entradas são usualmente elétricas, mas podem ser mecânicas, térmicas, ou outras grandezas ou associações destas (ANSI C37.90, 1989);

c) Transformador de Corrente (TC): São equipamentos capazes de reduzir, proporcionalmente, a corrente do elemento que se deseja medir (primário), para valores compatíveis com o instrumento de medição, controle ou proteção (secundários) e são divididos em dois tipos principais:

- **TC para serviço de medição:** Esse tipo de TC mede uma faixa menor de valores, porém com uma taxa de precisão maior, e é adequado para o uso com equipamentos de medição, que exigem essa característica (ABNT/NBR 6856, 1992);

- **TC para serviço de proteção:** Esse tipo de TC mede uma faixa maior de valores, porém com uma precisão menor, e é adequado para o uso com relés de proteção, que pelo fato de medirem grandes correntes de curto-circuito, necessitam dessa característica (ABNT/NBR 6856, 1992).

d) Transformador de Potencial (TP): São equipamentos capazes de reduzir, proporcionalmente a tensão do circuito para níveis compatíveis com as tensões nominais dos instrumentos de medição, controle ou proteção (ABB SWITCHGEAR AB DEPARTMENT TSA, 1999).

2.2. Zonas de proteção

Zona de proteção é uma área do SEP protegida pelo sistema de proteção. Qualquer falta dentro dessa zona deverá resultar na atuação do sistema de proteção, de modo a isolá-la do restante do sistema de potência. A Figura 1 ilustra o diagrama unifilar de um sistema e suas respectivas zonas de proteção:

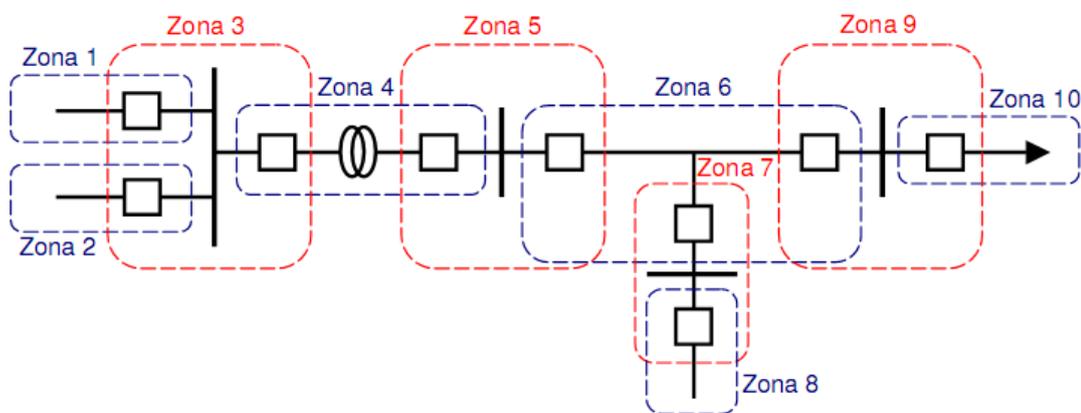


Figura 1 - Exemplo de zonas de proteção

Cada zona de proteção é composta por um ou mais componentes do sistema de potência e por um ou mais disjuntores. Como o isolamento em condições de falta é realizado por disjuntores, eles ajudam a definir os contornos da zona de proteção. Os disjuntores mais próximos às áreas de contorno passam a fazer parte de duas zonas de proteção, criando a área denominada sobreposição de zonas de proteção, que também é uma zona de proteção.

A sobreposição das zonas de proteção garante que não existirão pontos cegos entre as zonas de proteção, aumentando a confiabilidade do sistema de proteção, como mostra a Figura 2:

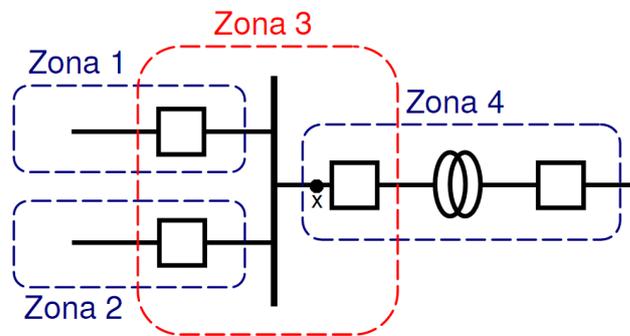


Figura 2 - Falta no ponto X e função da zona de proteção sobreposta

Nesse exemplo, a zona de proteção primária do barramento (zona 3) está sobreposta às zonas 1, 2 e 4, garantindo que o sistema de proteção irá atuar no caso de falta no ponto X.

2.3. Principais Equipamentos Protegidos por Relés

A proteção no SEP pode ser dividida por elementos do mesmo, sendo os principais tipos de proteção:

a) Proteção de Linhas de Transmissão: São muitas técnicas de proteção abordadas em linhas de transmissão. Os relés utilizados para essa proteção visam abertura dos disjuntores em caso de sobrecorrentes (abertura temporizada ou instantânea), alterações de impedância e variações de frequência, entre outras;

b) Proteção de Transformadores: Para essa proteção, os relés atuam em caso de variações na corrente diferencial (diferença entre correntes no primário e no secundário) tanto nas correntes de fase quanto nas correntes de neutro, além das proteções de sobrecorrente, sobretensão e térmica, entre outras. Aplicações adicionais podem incluir o uso do relé em associação com equipamentos medidores de temperatura e pressão, no caso de mudanças nessas grandezas (STEVENSON, 1986);

c) Proteção de Geradores: A proteção de geradores pode atuar, entre outros, nos caso de potência reversa, variação de frequência, sobrecorrente e variação na corrente diferencial;

d) Proteção de Barramentos: Na proteção de barramentos, o relé pode atuar devido a variações na corrente diferencial ou em casos de sobrecorrente, por exemplo. Podem ser utilizados para esse tipo de proteção relés diferenciais e direcionais de corrente;

e) Outras Aplicações: Outras aplicações para uso de relés incluem controle de tensão, e no caso dos relés numéricos, algumas funções de automação.

No caso dos relés eletromecânicos, cada relé é capaz de fazer um único tipo de proteção. Já os relés numéricos podem ser do tipo multifunção, sendo capazes de fazer mais de uma proteção.

3. Evolução Tecnológica dos Relés de Proteção

Neste capítulo será abordada a evolução da tecnologia construtiva dos relés de proteção, abrangendo o modo de funcionamento e as características que foram incorporadas a esses equipamentos.

Os relés de proteção já foram construídos com três tipos de tecnologias: eletromecânica, estática e numérica, que serão abordadas a seguir.

3.1. Relés Eletromecânicos

As primeiras aplicações de proteção de sistemas de potência baseadas em dispositivos eletromagnéticos, comumente conhecidos como relés eletromecânicos, datam de 1905 (HOROWITZ, 2008).

O seu funcionamento está relacionado com forças eletromagnéticas e contra esforços provocados por molas e movimentos mecânicos dos contatos. Apesar de sua construção delicada e complexa, estes possuem elevado grau de confiabilidade, entretanto, necessitam de manutenção e calibração periódicas.

Diante de uma possível situação de falta, as indicações de partida do elemento de proteção e atuação do relé são feitas por mecanismos mecânicos dotados de bandeirolas, comumente pintadas em amarelo para indicação de partida e vermelho para indicação de atuação. Quando alguma destas bandeirolas estiver caída, após a verificação do evento estas podem ser reposicionadas manualmente. O inconveniente é que não se sabe o momento exato em que houve a atuação.

Os relés eletromecânicos podem ser classificados em quatro tipos: relés de atração eletromagnética, relés de indução eletromagnética, relés de D'Arsonval e relés térmicos.

3.1.1. Relés de atração eletromagnética

A Figura 3 ilustra os dois tipos mais comuns de relés de atração eletromagnética. Estes relés têm atuação instantânea e também são conhecidos por *all or nothing relays*. Essa denominação se deve à sua curva de atuação, que é a curva de tempo definido, abordada em detalhes no capítulo 4. Esses relés podem ser acionados tanto por CA (Corrente Alternada) ou CC (Corrente Contínua).

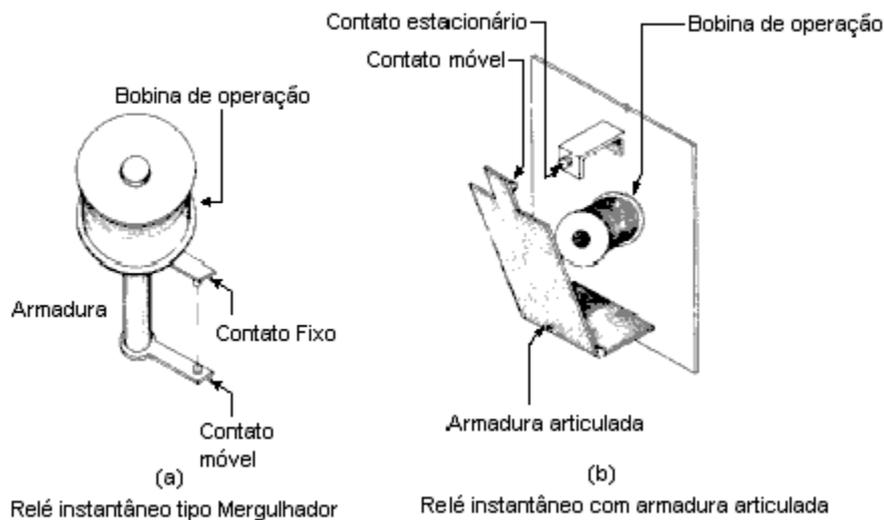


Figura 3 - Exemplo de relés eletromecânicos
(MELLO, 1983)

Para que haja o fechamento do contato da armadura é necessário que a grandeza circulante na bobina seja maior do que a força exercida por uma mola que mantém o contato aberto. Como a força de atração varia com o quadrado da distância, aumentando para distâncias menores, a grandeza necessária para atuar o relé deverá ser maior do que a necessária para manter o relé fechado, após a sua atuação.

O valor de corrente necessário para a sua atuação é conhecido como *pick-up* e o valor em que o relé deixa de atuar e tem a sua armadura aberta é chamado de *drop-out*.

Devido à sua característica de atuação rápida em situações em que a grandeza circulante exceda o valor de atuação, este relé é utilizado para proteção contra curtos circuitos, sobre ou subtensão de alta velocidade. Em aplicações onde seja necessário um atraso intencional de atuação, o relé pode comandar algum mecanismo temporizador.

3.1.2. Relés de indução eletromagnética

Os relés de indução eletromagnética têm seu funcionamento baseado no princípio de um motor de indução, no qual o torque do entreferro é desenvolvido por indução em um rotor. Estes relés são conhecidos por relés tipo indução e operam somente com CA.

Os relés de indução são divididos em dois tipos:

- **Retardado:** utiliza um disco de alumínio que serve como rotor;
- **Alta velocidade ou instantâneo:** possui um rotor no formato de um copo.

Os relés do tipo disco de indução possuem uma ou mais bobinas de atuação e ímã de freio que produz torque de retenção quando o disco é acionado pela bobina de operação. A velocidade de atuação deste relé é uma função da grandeza de operação e do torque causado pelo ímã.

Já os relés do tipo de alta velocidade, possuem apenas bobina de operação e mola de retenção. O torque de retenção é o resultado combinado da força do ímã, do torque motor produzido pela bobina de operação e da saturação na bobina de operação.

No relé tipo indução há um contato fixo montado em seu chassi e um contato móvel montado no eixo que suporta o disco de indução. Quando a bobina de operação é energizada, esta induz um torque no disco que acelera rapidamente até uma velocidade constante de regime permanente. Quando o disco atinge a velocidade de regime permanente, o tempo necessário para que os contatos normalmente abertos fechem é determinado pelo percurso que o contato móvel montado no eixo tem que realizar para atingir o contato fixo.

O ajuste de retardo de tempo pode ser feito com o dial de posicionamento inicial do disco aumentando ou diminuindo o comprimento do caminho a ser percorrido pelo contato móvel. A Figura 4 ilustra as principais partes componentes do relé a disco; o dial de posicionamento inicial não está representado. Observar que a peça polar é mostrada expandida, pois o entreferro entre o disco e os pólos é geralmente de alguns milímetros.

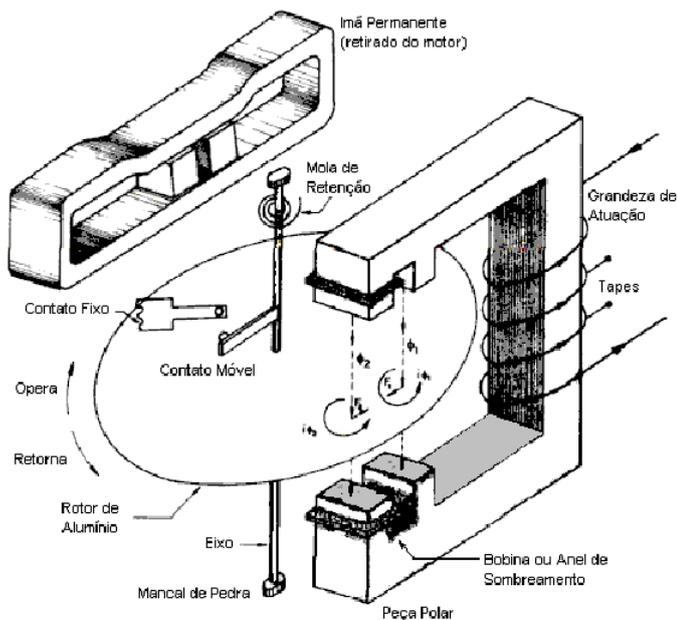


Figura 4 - Componentes de um relé do tipo disco de indução
(MELLO, 1983)

3.1.3. Relés de D'Arsonval

O funcionamento do relé de D'Arsonval é baseado em um ímã permanente centralizado em um conjunto de bobinas por onde uma corrente direta circula causando um torque.

Devido as suas características construtivas, este relé necessita de uma pequena quantidade de energia para o seu funcionamento, possibilitando assim a sua aplicação em retificadores CA, shunt's CC, miliamperímetros e milivoltímetros (ELMORE, 1997).

3.1.4. Relés Térmicos

A unidade térmica consiste em um par bi-metálico com um dos metais fixo em uma das extremidades e o outro metal livre.

Conforme a variação da temperatura, os diferentes coeficientes de expansão térmica de cada material causam um movimento na extremidade livre do bi-metálico e um contato pode ser atuado pelo mesmo.

3.2. Relés Eletrônicos Estáticos

Os primeiros relés de proteção estáticos, ou eletrônicos, surgiram por volta de 1930 com a percepção de que os dispositivos eletrônicos poderiam fornecer as funções requeridas para a proteção dos sistemas de potência (MELLO, 1983).

Estes relés utilizavam válvulas termo-iônicas que eram pouco confiáveis devido à sua fragilidade. Estas válvulas necessitavam de aquecedores, que consumiam uma grande potência e eram muito sensíveis à vibração, porém foram utilizados em aplicações onde os relés eletromecânicos não conseguiam atender às funcionalidades necessárias.

Com o advento da tecnologia dos semicondutores, os relés estáticos passaram a ser mais confiáveis e robustos, solicitando menores potências para o funcionamento.

Uma vez que este tipo de relé não possuía mais peças móveis e frágeis fez com que esta tecnologia ficasse mais resistente a choques e vibrações reduzindo a manutenção em relação aos eletromecânicos, desprezando necessidade de limpeza ou ajuste de contatos, verificação de folgas, verificação ou limpeza de mancais, além do que pontos específicos do circuito podiam ser facilmente monitorados por instrumentos simples de medição como voltímetros ou por osciloscópios. Como as entradas de tensão e corrente necessitavam de menores potências, o tamanho dos transformadores de corrente e potencial puderam ser reduzidos.

A precisão e seletividade foram melhoradas, possibilitando a modelagem das curvas de atuação da proteção, adquirindo características mais próximas das curvas dos equipamentos protegidos, além disso, a velocidade de atuação instantânea aumentou, causando a diminuição do estrago dos equipamentos em situações de falta. O tempo de atuação de um relé estático depende do instante do ciclo de tensão onde a falta ocorre, e não da magnitude da corrente ou tensão de falta, desta forma, o tempo de atuação da unidade estática não varia mais do que meio ciclo para qualquer condição de falta.

Na entrada de tensão e corrente dos relés estáticos, existem transformadores de tensão e corrente para atenuar as amplitudes das informações recebidas pelos TPs e TCs respectivamente, para níveis que possam ser trabalhados dentro do relé.

Um relé estático possui diversos circuitos analógicos para fazer as funções de proteção. Os principais tipos de circuitos utilizados são os filtros de frequências harmônicas indesejáveis, retificadores de tensão ou corrente alternada para contínua, amplificadores, comparadores e temporizadores.

Os ajustes de referência são feitos com potenciômetros e tapes. Apesar dos relés estáticos apresentarem diversas vantagens em relação aos eletromecânicos, esta tecnologia quase não é mais utilizada visto que em condições de elevadas correntes de falta e operações de manobra, acabam induzindo tensões transitórias elevadas nos condutores e os relés estáticos podem ser atuados inadvertidamente, além disso, seu funcionamento pode ser comprometido com interferência eletromagnética, variações de temperatura e efeito de envelhecimento dos componentes.

A figura 5 mostra o diagrama de funcionamento de um relé de proteção estático:

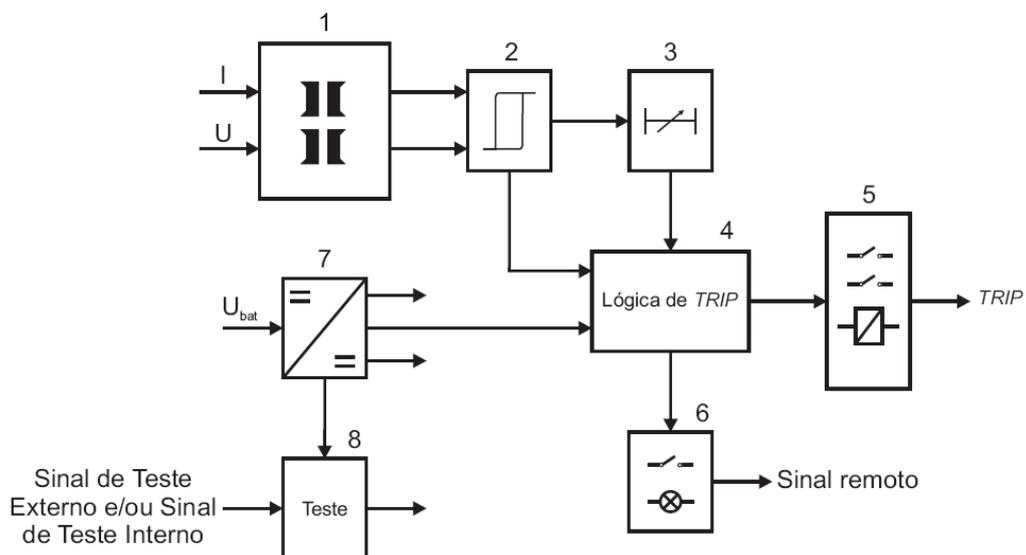


Figura 5 - Diagrama de funcionamento de um relé estático

(CHEMIN NETTO, 2008)

Os sinais de tensão e corrente são lidos pelo bloco 1, e em seguida comparados com valores de referência no bloco 2. Caso esses valores ultrapassem um valor pré-ajustado nesse bloco, pode ser disparado um mecanismo temporizador no bloco 3 ou enviado um sinal diretamente para a Lógica de TRIP, no bloco 4. A lógica de TRIP verifica se o valor lido no bloco 1 continua superior ao valor pré-ajustado (caso acionada pelo bloco temporizador, após o término da contagem de tempo) e então envia o sinal de abertura do disjuntor ao bloco 5, e um sinal de sinalização ao bloco 6. O bloco 7 representa a fonte de alimentação auxiliar do relé, enquanto o bloco 8 é usado em rotinas de teste com informações internas ou externas ao equipamento (CHEMIN NETTO, 2008).

3.3. Relés Numéricos

Os relés de proteção numéricos têm sua operação baseada em algoritmos que são processados em um ou mais processadores.

Todas as informações manipuladas por esses relés são tratadas numericamente, desta forma, grandezas analógicas como, por exemplo, tensão e corrente são amostradas e convertidas em dados inteligíveis pelo processador e serão comparadas com valores de ajuste, também conhecidos como *set point*. Além das informações analógicas de corrente e tensão, a maioria dos relés numéricos recebem outras informações como: posição de disjuntor (aberto ou fechado), posições de chaves seccionadoras e outros sinais de sensores, para, por exemplo, a criação de intertravamentos diversos, sinais de temperaturas provenientes de sensores, sinais de comunicação nos mais diversos protocolos entre outros tipos de informações.

Para análise e gerenciamento dessas informações, são incorporados ao processador do relé outros elementos eletrônicos, tais como filtros, multiplexadores, conversores A/D, memórias EPROM (*Erasable Programmable Read-Only Memory*), RAM (*Random Access Memory*), *Flash*, EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*), circuitos de isolamento galvânica e etc. A Figura 6 ilustra através de um diagrama de blocos genérico a arquitetura de um relé digital de proteção.

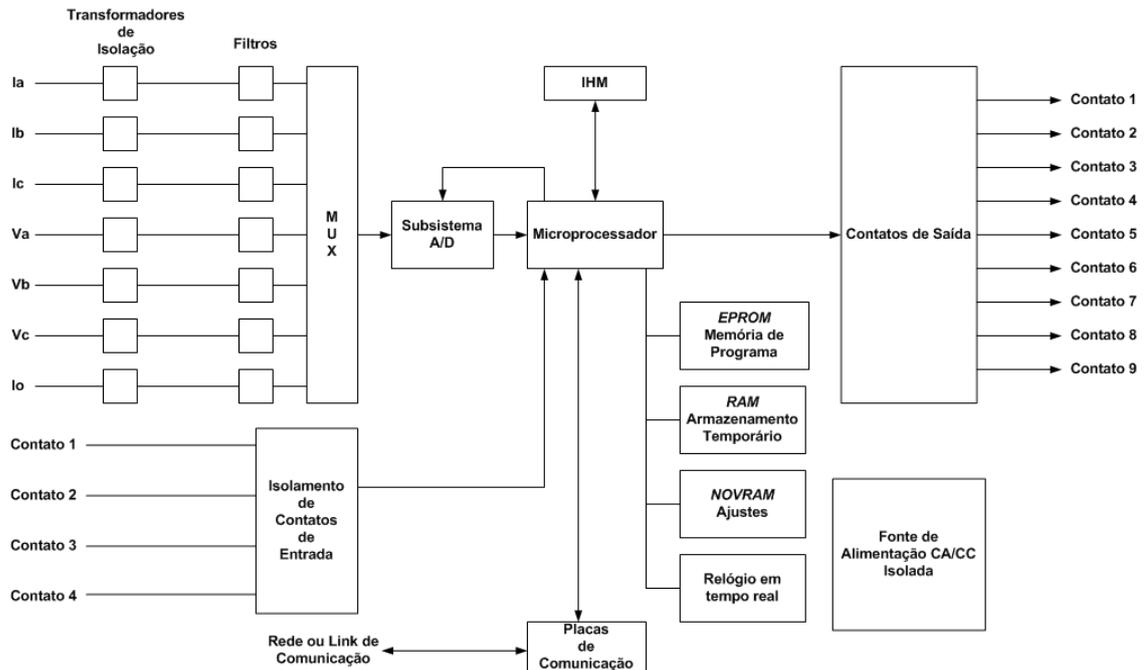


Figura 6 - Exemplo de diagrama de blocos internos de um relé numérico
(ELMORE, 1997)

As informações de tensão e corrente provenientes dos transformadores de potencial (TP) e transformadores de corrente (TC), ao entrarem no relé, passam por transformadores de isolamento e em seguida por filtros que irão deixar passar apenas a frequência fundamental e as frequências harmônicas desejáveis para a perfeita proteção do sistema (ELMORE, 1997).

Essas informações de medição são do tipo analógico, incapaz de ser interpretadas pelo processador do relé. Assim, é necessário o uso de conversores de sinal A/D (analógico/digital) para que essa informação seja apresentada ao processador em forma digital.

Após a conversão de sinais analógicos para digitais, a informação é armazenada temporariamente em memória volátil RAM para ser processada pelo algoritmo de proteção.

O programa que contém o algoritmo de proteção está gravado em memória não volátil ROM (*Read-Only Memory*) ou EPROM do processador e é chamado de *firmware*. Uma vez que as informações de tensão e corrente chegaram até o microprocessador, é necessário que este obtenha informações de ajustes para que possa comparar com os dados amostrados.

É desejável que estes valores possam ser alterados para uma maior flexibilidade de aplicação dos relés, porém eles não devem ser apagados caso a tensão auxiliar do relé seja desligada. Estes ajustes e parametrizações estão gravados em memórias não voláteis do tipo NOVRAM (*Non-Volatile Random Access Memory*), EEPROM ou Flash.

Os relés podem medir as grandezas de diversas formas, entre elas:

- Medição RMS (*Root Mean Square*);
- Filtros digitais (por exemplo, filtros de Fourier);
- Cálculo de componentes simétricas.

Além do comando de desligamento aplicado sobre a bobina de abertura do disjuntor, o relé de proteção pode ainda apresentar outras saídas, como por exemplo sinalização de alarme, acendimento de *leds* no seu painel frontal, envio de mensagens ou alteração de posições de desenhos unifilares no *display*, transmissão de informações via protocolos de comunicação entre outros, além de registrar todos os eventos acompanhados de estampa de tempo em memória não volátil.

A seguir serão abordadas mais detalhadamente algumas características dos relés numéricos.

3.3.1. Entradas Analógicas

As entradas analógicas dos relés numéricos podem ser entradas de corrente, tensão ou transdutores.

As correntes nominais de entrada provenientes dos TCs de proteção são normalmente de 1A ou 5A e as tensões nominais de entrada mais comuns são de 100, 110 ou 115 V_{CA} (Volts em corrente alternada). Em alguns relés é possível para o usuário definir qual será o valor nominal utilizado, enquanto em outros esse valor é pré-fixado e não pode ser alterado. (ABB, 2004; SIEMENS, 2008).

As entradas que medem resistência são freqüentemente utilizadas quando se deseja medir temperaturas informadas por sensores resistivos como, por exemplo, os RTD's (*Resistive Thermal Devices*).

Existem ainda algumas entradas de corrente de 4 a 20mA utilizadas para controle, provenientes de transdutores

3.3.2. Entradas Digitais

As entradas digitais são também chamadas de entradas binárias e servem como via de acesso a informações externas ao relé, possibilitando tarefas como bloquear determinadas funções do relé, alterar os grupos de ajuste das proteções, receberem comandos externos para que o relé comande a abertura ou fechamento do disjuntor,

disparar a gravação de arquivos de oscilografias, fazer a sincronização do relógio de tempo real entre outros.

Os relés de proteção que são capazes de executar ações de controle através de lógicas de usuário fazem uso das entradas binárias para receber informações de posição de disjuntores e chaves seccionadoras de forma que possam fazer lógicas de intertravamento e seqüência de manobras.

Normalmente o nível de tensão para comando das entradas binárias é de 125VCC, mas existem relés que podem funcionar com diversas faixas de tensão sejam elas CC ou CA.

3.3.3. Alimentação Auxiliar

Uma vez que o funcionamento dos relés numéricos é baseado em microprocessadores e elementos eletrônicos auxiliares, é necessário que haja uma alimentação auxiliar, diferentemente dos relés eletromecânicos que não necessitavam desta para seu funcionamento. Essa alimentação pode ser tanto em CC como em CA (ABB, 2004; SIEMENS, 2008).

3.3.4. Contatos de Saída

Os contatos de saída podem ser utilizados para dois fins distintos:

- **Energização da bobina de abertura dos disjuntores:** ao enviar o comando de abertura (*trip*), o relé de proteção energiza o contato de saída correspondente, que deve estar ligado à bobina de abertura do disjuntor;
- **Alarmes e sinalização:** os contatos de saída podem servir também para energizar equipamentos de sinalização ou alarmes, caso seja necessário alertar sobre algum *status* do sistema ou mesmo sobre um *trip*.

Uma funcionalidade agregada aos contatos de saída que pode ser encontrada no mercado é a supervisão do circuito de comando de abertura do disjuntor. Essa supervisão pode ser feita de várias formas, dependendo do fabricante.

Um exemplo para esse mecanismo de supervisão consiste em um circuito em que o próprio relé de proteção aplica uma tensão de saída no circuito de *trip* e uma pequena corrente flui pela fiação que conecta a saída do relé à bobina de abertura do disjuntor. Esta

corrente é calculada de forma que não seja excessivamente grande para evitar a atuação inadvertida do disjuntor. No caso de ocorrer uma oxidação nos contatos do disjuntor ou um mau contato no circuito de comando, a corrente injetada diminui e o relé alarma a falha no circuito do disjuntor minimizando, assim, o risco da falha de abertura do disjuntor no momento de uma falta (ABB, 2004).

3.3.5. Parametrização

Para que o relé de proteção tenha um funcionamento adequado, é necessário fazer ajustes nos valores das proteções, bem como em diversos parâmetros de funcionamento.

O termo parametrização está relacionado com os ajustes das proteções bem como com as demais funcionalidades disponíveis. São exemplos de parametrização: os valores de sensibilização das proteções (*pick-up*), tempos de atuação, seleção de curvas, seleção da frequência fundamental do sistema para 50 ou 60Hz, quais estágios de proteção serão sinalizados em quais relés de saída e se estes permanecerão fechados após sua atuação, definição da função de cada entrada binária, taxa de amostragem do arquivo de oscilografia, inibição de determinados estágios da proteção, determinação do comportamento de determinadas proteções, etc.

Na maioria dos relés numéricos, é possível fazer a parametrização pela interface homem-máquina (IHM) ou através de *software*.

3.3.6. Interface Homem-Máquina (IHM)

Para que o usuário possa programar, operar e interpretar os eventos do relé é necessário haver uma interface homem-máquina, comumente conhecido por IHM. Os relés de proteção numéricos mais simples, como o que é mostrado na Figura 7, possuem um *display* com caracteres de sete segmentos e uma ou mais linhas para apresentação de informações, alguns botões e vários *leds*, e às vezes até potenciômetros no painel frontal.



Figura 7 - Relé de proteção numérico Pextron
(PEXTRON, 2008)

Os relés mais avançados, como o que é mostrado na Figura 7, possuem *display* de cristal líquido que podem ser do tipo caracteres ou matriz gráfica.

Nos relés equipados com *display* de módulo gráfico pode-se, por exemplo, desenhar os diagramas unifilares do sistema protegido e mostrar dinamicamente informações do sistema, como posicionamento de disjuntores e chaves seccionadoras, valores medidos de tensão, corrente, valores calculados de kWh (Quilowatt-hora), kVar (Quilovolt-ampere Reativo), fp (Fator de Potência), impedância, temperatura obtida via RTDs, entre outros.



Figura 8 - Relé de proteção numérico ABB
(ABB, 2008)

É comum encontrar na maioria dos relés *leds* para indicação de funcionamento, partida e atuação dos elementos de proteção. Estes *leds* substituem as bandeirolas dos relés eletromecânicos. Alguns modelos possuem *leds* que podem ser programados para indicar diferentes estados e alarmes dos relés tais como religamento em processo, partida de motores, correntes de sobrecarga, entradas binárias ativas entre outros.

Para inserir valores, navegar nos menus e alterar os parâmetros e configurações, os relés possuem uma série de botões e alguns possuem até teclados numéricos.

3.3.7. Registro de Eventos

Uma vez que os relés numéricos são dotados de processadores e memórias, é relativamente simples implementar a funcionalidade de registradores de eventos. Todas as mudanças detectadas ou geradas pelos relés são consideradas eventos. Exemplos de eventos podem ser: partida dos elementos de proteção, energização de uma entrada binária, reconhecimento de energização do barramento, partida de um motor, comando remoto ou manual de abertura de um disjuntor entre outros.

Dependendo do tipo do evento o relé guarda na memória diversas informações que são lidas naquele dado instante como, por exemplo, valores de corrente e tensão de todas as fases e de neutro, temperaturas de todos os RTD's, quanto tempo um estágio de proteção permaneceu ativo, quais eram os estados de todas as entradas binárias, qual a máxima corrente de partida de um motor e outras informações disponíveis que possam futuramente ser analisadas pela engenharia para entender o comportamento do sistema em situações consideradas críticas ou que possuam uma determinada relevância operacional.

3.3.8. Relógio de tempo real

Alguns relés de proteção possuem internamente, relógios de tempo real usados nos registros de eventos e marcação de data e hora em oscilografias. Como já visto anteriormente, é comum haver interpolação de zonas de proteção de forma que determinados pontos de falta são detectados por mais do que um relé.

Assim, quando ocorre um evento no sistema, vários relés acabam registrando este evento. Para facilitar uma análise posterior, é ideal que estes eventos possuam a data e horário com precisão de milissegundos e que todos os relógios estejam sincronizados. Desta forma fica mais fácil entender se um relé atuou devidamente ou se ele deveria ter aguardado por mais tempo para fazer a coordenação com outros relés.

A sincronização dos relógios dos relés pode ser feita via protocolos de comunicação através do envio de mensagens que contêm a data e hora correta e a cada segundo ou minuto enviar um pulso de sincronização. Outra maneira é utilizar a sincronização por GPS (*Global Positioning System*). Esse sistema consiste de um equipamento receptor com antena que recebe a cada segundo o sinal de tempo de um satélite e envia pulsos de sincronismo para uma das entradas do relé, que sincroniza seu relógio a partir desses pulsos.

3.3.9. Oscilografia

Uma ferramenta poderosa para a análise mais assertiva e rápida de faltas é o registro oscilográfico. Os relés providos desta tecnologia gravam tanto os sinais analógicos de tensão e corrente, como sinais binários advindos das entradas binárias, temperaturas de RTDs quando disponíveis e estágios de proteção, antes, durante e após a falta.

Em caso de falta ou qualquer situação previamente configurada, o relé grava uma cópia da oscilografias em sua memória interna, gravando inclusive alguns instantes antes desse comando, o que é chamado de situação de pré-falta.

Uma vez que estes arquivos são gravados no relé, estes podem ser transferidos para computadores e abertos por *softwares* específicos para análise oscilográfica. Alguns destes *softwares* conseguem medir para cada instante ou dentro de um período selecionável os valores eficazes e instantâneos das grandezas, níveis de harmônicos, podem montar um diagrama fasorial além de ser possível medir os tempos dos eventos registrados do relé, como por exemplo, o tempo de abertura de um disjuntor após a falta.

Existem ainda *softwares* de análise oscilográfica que são capazes de manipular as grandezas matematicamente, assim, é possível visualizar a cada instante as grandezas derivadas das tensões e corrente, como por exemplo, impedância, potência ativa, potência reativa, energia e como estas grandezas evoluíram durante a falta.

A Figura 9 traz um exemplo de arquivo de oscilografia. Nesse exemplo foram medidos os sinais referentes às três correntes de fase (I1, I2 e I3) e também à corrente de neutro (I0), com suas respectivas formas de onda representadas. Abaixo dessas ondas se encontram sinais digitais do relé, e seus respectivos estados lógicos (0 ou 1) durante a medição:

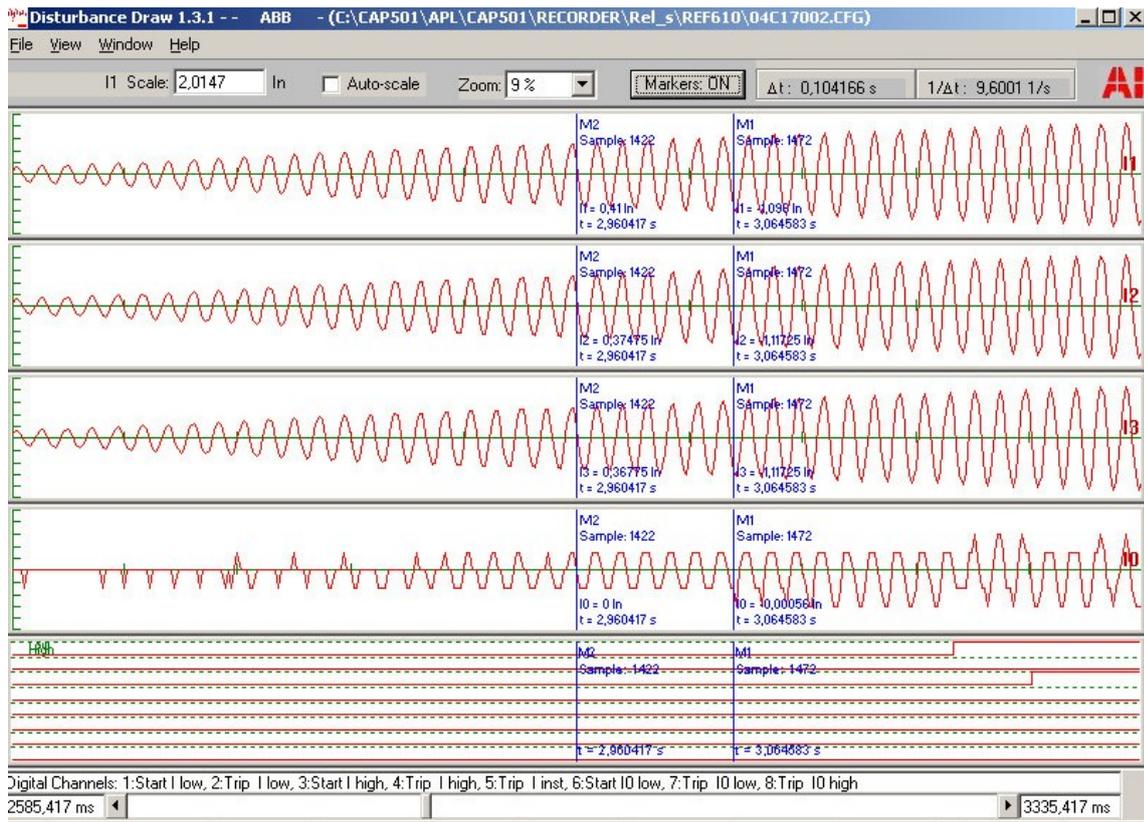


Figura 9 - Exemplo de oscilografia

Os sinais analógicos de corrente e tensão são amostrados com uma frequência de amostragem não necessariamente igual à utilizada nos algoritmos para medição e proteção. Muitas vezes, pode-se configurar a taxa de amostragem de acordo com o tempo e harmônicas que se deseja analisar.

Via de regra, quanto maior a frequência de amostragem, menor será o tempo total de registro oscilográfico, entretanto, maiores serão as ordens de harmônicos que poderão ser analisados.

A Tabela 1 ilustra a relação entre o número de amostras por ciclo, o limite de frequência que pode ser analisada pelo critério de *Nyquist* e a resolução digital.

Tabela 1- Detecção de faltas por comparação de amostras (ELMORE, 2000)

Amostras por Ciclo	Frequência de amostragem (Hz)	Limite de frequência de Nyquist (Hz)	Resolução Digital (ms)
4	240	120	4,167
8	480	2140	2,083
12	720	360	1,389
16	960	480	1,042
20	1200	600	0,833
64	3840	1920	0,260

Geralmente, 70% do uso dos arquivos de oscilografia é para análise de faltas, para identificação do tipo de falta, localização, seqüência de eventos e outros; 15% servem para a verificação de parâmetros de sistemas, como impedância de linha, níveis de corrente de falta; 8% para análise de Harmônicas e 7% para outros fins, como análise de transitórios de chaveamentos ou *troubleshooting* (localização e resolução de defeitos) (ELMORE, 2000).

As oscilografias podem ser geradas em formato COMTRADE (*Common Format for Transient Data Exchange for Power Systems*).

3.3.9.1. O Formato COMTRADE

Com o advento, desenvolvimento e uso dos relés digitais e registradores de perturbação digitais, além dos *softwares* de simulação, disponibilizou-se uma grande quantidade de dados digitais para análise do desempenho dos sistemas de potência. Com isso, surgiram dificuldades referentes à troca de informações entre os sistemas de geração, armazenamento e transmissão desses registros, devido ao fato de esses sistemas usarem padrões distintos. Surgiu daí a necessidade de estabelecer um formato padrão para o uso desses dados em sistemas de análise, teste e simulação ao mesmo tempo, de forma a facilitar a manipulação dos mesmos (BERNARDES, 2006).

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), desenvolveu o padrão “*Common Format for Transient Data Exchange*” (COMTRADE) *for Power Systems*”, (IEEE Standard C37.111-1991, 1991). Este padrão define um formato comum dos arquivos de dados que possibilitam o intercâmbio dos arquivos entre os vários tipos de sistema de análise de dados de falta, teste e simulação. O padrão foi criado em junho de 1991, e recebeu uma revisão em 1999 (IEEE Standard C37.111-1999, 1999) (BERNARDES, 2006).

Quando dados transitórios são analisados, é necessário incluir informações que possam descrever as circunstâncias ao redor do transitório. No arquivo COMTRADE, essas informações são armazenadas em um formato do tipo ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Para um determinado evento descrito pelo formato COMTRADE, deve-se ter três tipos de arquivo associados. As informações providas dos arquivos transitórios devem incluir:

- Descrições textuais das circunstâncias ao redor do transitório;
- A configuração dos transitórios gravados no tempo;
- Os valores dos dados propriamente caracterizados.

Cada um dos três tipos de arquivos possui uma classe de informação: cabeçalho (*.hdr), configuração (*.cfg) e dados (*.dat). A designação dos arquivos possui o seguinte

formato: “*nome.ext*”, onde, *nome* é usado para identificar o arquivo e *ext* é usado para identificar o tipo de arquivo (*.hdr, *.cfg ou *.dat). As informações são organizadas em linhas e os dados, na mesma linha, são separados por vírgula. A informação deve ser listada na ordem exata fixada pelo padrão. Os desvios deste formato provocarão erros na leitura dos dados. As recomendações dos formatos desejáveis são ilustradas pelo artigo do CIGRÉ 34.01 (1989) (BERNARDES, 2006).

3.3.10. Auto-Supervisão

A função de auto-supervisão tem sido amplamente difundida nos sistemas microprocessados e para os relés numéricos não é diferente. O sistema de auto-supervisão, também conhecido por *watchdog*, tem como principal função acusar ao usuário situações de inoperabilidade do relé, evitando atuações indevidas ou falha nas atuações devidas.

O processador verifica continuamente diversas partes do relé, tais como, memórias *RAM*, *ROM*, *EPROM*, microcontrolador e a consistência do *firmware*, conversores A/D, entradas analógicas e digitais, valores de ajustes, níveis de tensão da fonte, circuitos de comando do disjuntor, bobinas dos relés de saída, e até situações em que haja uma perda total na tensão auxiliar podem ser alarmadas pelo relé de proteção.

Existem diversas técnicas para verificar o correto funcionamento de cada componente ou funcionalidade, uma das técnicas para verificar a integridade dos ajustes de proteção, é gravá-los em três áreas distintas da memória e ciclicamente verificar se os valores são iguais e se estão dentro das faixas de ajustes mínima e máxima (GUREVICH, 2006).

As entradas analógicas de tensão e corrente podem ser verificadas através de um circuito que injeta na entrada, um sinal e o processador verifica a informação que sai do conversor A/D. Isto é feito de forma multiplexada para que não haja uma atuação indevida do relé (GUREVICH, 2006).

As bobinas dos relés de saída podem ser verificadas injetando-se um pulso de tensão em um tempo diminuto e verificando o tempo de resposta, que pode indicar uma situação de curto ou bobina aberta (GUREVICH, 2006).

No caso de uma falha interna os relés informam a falha através de *leds* específicos, enviam mensagens de falha pelas portas de comunicação serial e comutam um relé de saída que pode estar ligado a alarmes externos (ABB, 2004).

As falhas de alimentação são notificadas apenas pela comutação do relé de falha interna (ABB, 2004).

3.3.11. Comunicação

A maioria dos relés possui portas de comunicação seriais, desta forma podem tanto receber como enviar dados. Estes dados podem ser as parametrizações, lógicas de operação, configuração gráfica do *display* mímico, arquivos de oscilografia, medições, estado das entradas binárias, registros de eventos, entre outros.

É muito comum encontrar relés que possuem portas frontais e portas traseiras, sendo que as frontais são mais utilizadas para a parametrização do relé e aquisição de oscilografias e registro de eventos.

As portas traseiras são utilizadas para conectar o relé em rede de comunicação com vários relés, eventualmente Controladores Lógicos Programáveis (CLP) e *softwares* supervisórios, possibilitando integrá-los em sistemas de automação de subestações ou automação do processo.

Quanto ao meio físico, estas portas usualmente podem ser de interface elétrica (RS-232, RS-485), óptica (fibra óptica plástica ou vítrea) ou ainda infravermelho (ABB, 2004).

3.3.11.1. Topologias de Rede

Não se têm por objetivo neste trabalho aprofundar-se nos tipos de redes, seus detalhes construtivos e técnicos ou aspectos como vantagens e desvantagens, porém, serão citadas algumas topologias disponíveis.

Em se tratando de ambiente de rede é comum as designações de mestre e escravo. Mestre é o equipamento que requisita a informação, processa e envia comandos. Escravo é o equipamento que responde à solicitação de envio de mensagem e recebe os comandos do mestre.

Em redes em que haja apenas um mestre e um ou mais escravos, as conexões mais usuais podem ser do tipo ponto a ponto, conectando apenas dois equipamentos ou barramento. Neste caso, o mestre é quem abre a comunicação com o escravo e a comunicação continuará até que o mestre a encerre. Durante a comunicação com um escravo, os outros escravos não podem se comunicar.

Para que se possa inserir na rede mais do que um mestre, foram desenvolvidas algumas técnicas para a coordenação da comunicação:

- *Token Ring*: é uma técnica em que cada equipamento tem uma ordem para comunicar na rede. Funciona como se houvesse uma passagem de bastão, apenas quem possui o bastão tem o direito de falar. Após o término da comunicação, o

equipamento passa o bastão para o próximo e aguarda que o bastão retorne para que possa comunicar novamente (TAV 2 – TOPOLOGIAS DE REDE, 2008);

- **CSMA (Collision-Sensing Multiple Access):** é baseado na tecnologia *Ethernet* e permite a comunicação de vários equipamentos na rede em ordem aleatória. Para comunicar, o equipamento precisa detectar ausência de comunicação na rede e só aí ele irá transmitir dados. Caso dois ou mais equipamentos iniciem a comunicação simultaneamente, haverá uma colisão de dados e os equipamentos irão enviar novamente a informação após um breve atraso de tempo aleatório.

A Figura 10 ilustra os principais tipos de topologias de redes, descritas a seguir:

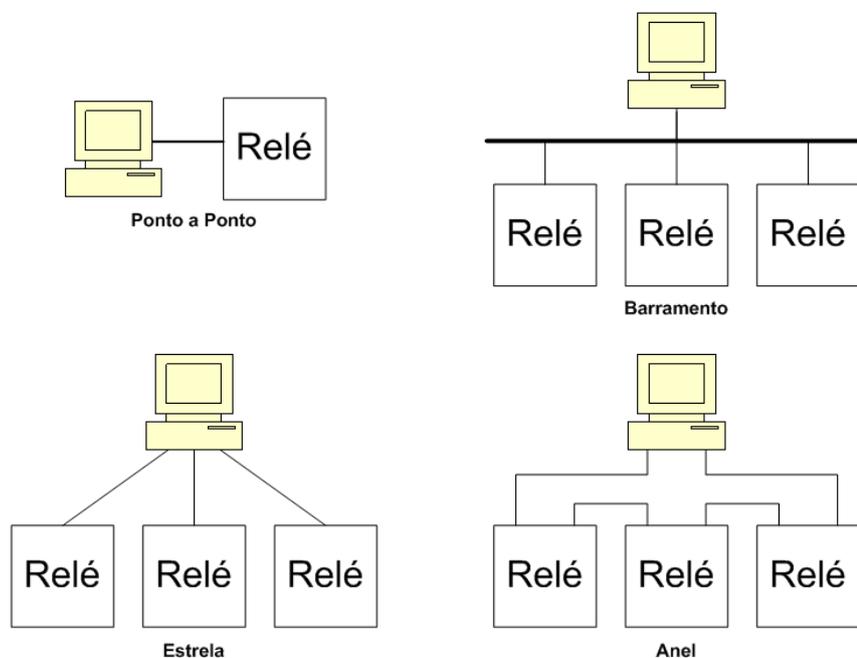


Figura 10 - Exemplos de topologia de rede

- **Ponto a ponto:** a conexão ponto a ponto se caracteriza pela conexão única e direta entre dois equipamentos. Utilizada geralmente quando é feita a conexão entre o relé de proteção e um computador, para troca de parâmetros e resgate de oscilografia;
- **Barramento:** consiste no compartilhamento do mesmo meio físico por todos os equipamentos para a transmissão de dados. Tem como vantagens o baixo custo e a facilidade de expansão, porém o uso do mesmo meio físico pode causar queda de rendimento caso o tráfego de dados seja muito intenso (TAV 2 – TOPOLOGIAS DE REDE, 2008);
- **Estrela:** esse tipo de conexão é um aperfeiçoamento da conexão tipo ponto a ponto. Os equipamentos periféricos são conectados a um equipamento central responsável

pela distribuição ou repetição dos sinais que circulam por cada ramo da estrela. A desvantagem desse tipo de rede é que o equipamento central (geralmente um *switch* ou computador dedicado) é um ponto crítico de falha da rede (TAV 2 – TOPOLOGIAS DE REDE, 2008);

- **Anel:** Na topologia em anel os dispositivos são conectados em série, formando um circuito fechado. Os dados são transmitidos unidirecionalmente de nó em nó até atingir o seu destino. Uma mensagem enviada por uma estação passa por outras estações, através das retransmissões, até ser retirada pela estação destino ou pela estação fonte. Pode haver uma queda na confiabilidade para um grande número de estações. A cada estação inserida, há um aumento de retardo na rede. É possível usar anéis múltiplos para aumentar a confiabilidade e o desempenho (TAV 2 – TOPOLOGIAS DE REDE, 2008).

3.3.11.2. Protocolos

Protocolos são conjuntos de regras que definem como os dados serão transmitidos. Podem ser interpretados como a linguagem “falada” pelos equipamentos. Para que dois ou mais equipamentos se comuniquem, é necessário que ambos troquem dados no mesmo protocolo.

Os protocolos mais usuais nas comunicações dos relés são MODBUS, DNP 3.0, LONWORKS, IEC 60870-5-103, INCOM, PROFIBUS. Cabe ressaltar a existência de outros além destes. Atualmente estão sendo desenvolvidos relés com comunicação em IEC 61850, que além de um protocolo, é também uma norma que prevê toda a arquitetura de comunicação utilizada em uma subestação. Este novo protocolo é baseado na tecnologia *Ethernet* e é o resultado do trabalho conjunto do EPRI (*Electric Power Research Institute*), IEC, (*International Electrotechnical Commission*) e fabricantes de relés e equipamentos para sistemas de potência e equipamentos de testes. Tem como principal finalidade promover a interoperabilidade, ou seja, a comunicação entre equipamentos de diferentes fabricantes (DOLEZILEK, 2005).

4. Proteção de Sobrecorrente em Relés Numéricos

A proteção de sobrecorrente detecta níveis altos de corrente causados por curto-circuitos entre duas ou mais fases ou entre uma ou mais fases e a terra. Existem dois tipos de proteção de sobrecorrente, a proteção de sobrecorrente direcional e a não-direcional. A diferença entre essas proteções é que a proteção de sobrecorrente direcional considera a amplitude e o ângulo da corrente medida para definir sua atuação, enquanto a não-direcional considera apenas a amplitude. Nesse trabalho será abordada apenas a proteção de sobrecorrente não-direcional usada em relés numéricos, a qual utiliza as mesmas curvas usadas para construção dos relés eletromecânicos.

O funcionamento da proteção de sobrecorrente é baseado em estágios, que são definidos pela amplitude da corrente de curto-circuito e definem um gráfico de funcionamento a partir da sobreposição de curvas de tempo inverso e curvas de tempo definido. A função de sobrecorrente temporizada (baseada nas curvas de tempo inverso ou tempo definido) possui apenas um estágio, enquanto a função de sobrecorrente instantânea (baseada apenas na curva de tempo definido) pode possuir dois ou mais.

As curvas de tempo inverso apresentam um tempo de atuação menor conforme a amplitude da corrente de curto-circuito aumenta. Os modelos mais usados pelos relés digitais atualmente usam as curvas de acordo com norma IEC 60255-3 (comumente chamadas de curvas IEC) ou de acordo com a norma IEEE C37.112 (curvas ANSI), sendo que estas curvas diferem nas equações e nos parâmetros que as constroem.

4.1. Curvas de Tempo Inverso IEC (IEC 60255-3)

Essas curvas de tempo inverso são baseadas na equação 1, e podem ser classificadas de acordo com a Tabela 2, considerando os valores adotados para os parâmetros α e β :

$$t = \left(\frac{\beta}{\frac{I^\alpha}{I_{>} - 1}} \right) \cdot k \quad [s] \quad (1)$$

onde:

t = tempo de operação;

I = valor de corrente passante na linha;

I_> = valor de corrente definido para atuação do relé;

k = multiplicador de tempo;

a , β = constantes que variam dependendo da curva escolhida, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação de curvas segundo a norma IEC 60255-3 (ABB, 2004)

Classificação	a	β
Normal Inversa	0,02	0,14
Muito Inversa	1,0	13,5
Extremamente Inversa	2,0	80,0
Inversa de Tempo Longo	1,0	120

O fator k influencia no posicionamento da curva em relação ao tempo. Um k menor implica em um tempo de operação mais rápido.

A Figura 11 mostra a curva IEC Normal Inversa. No Anexo I, no final deste documento, estão mostradas todas as curvas IEC.

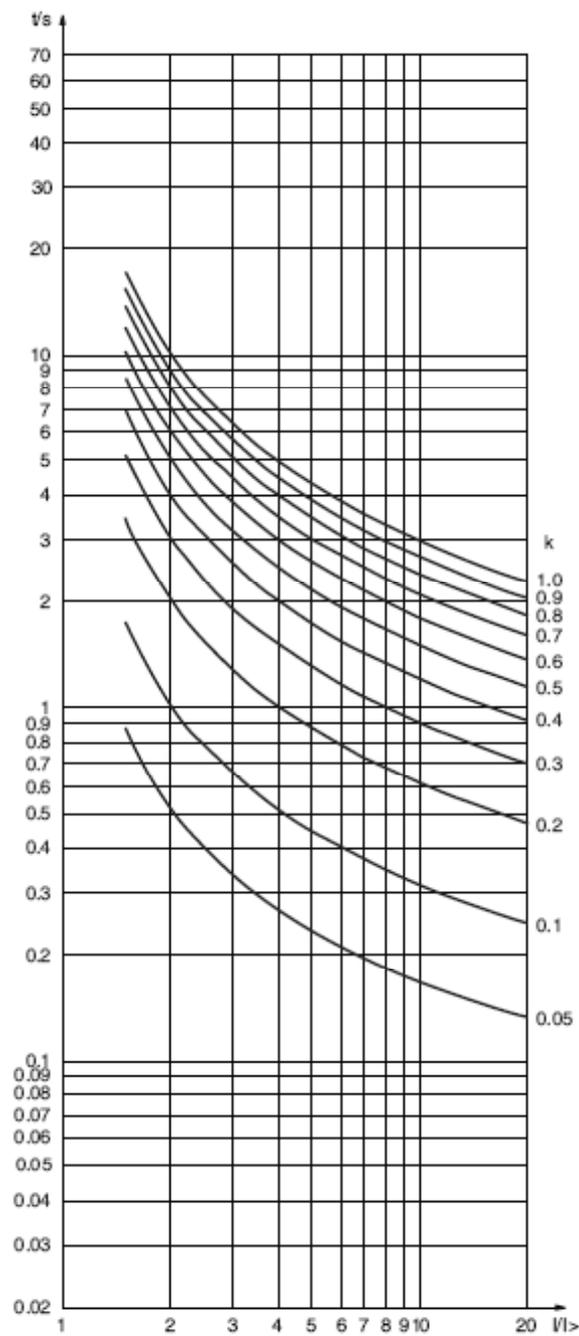


Figura 11 - Curva IEC Normal Inversa
(ABB, 2004)

4.2. Curvas de Tempo Inverso ANSI (IEEE C37.112)

Essas curvas de tempo inverso são baseadas na equação 2, e podem ser classificadas de acordo com a Tabela 3, para os valores dos parâmetros A, B e P:

$$t = \left(\frac{A}{\left(\frac{I}{I>} \right)^P - 1} + B \right) \cdot n \quad [s] \quad (2)$$

onde:

t = tempo de operação;

I = valor de corrente passante na linha;

I> = valor de corrente definido para atuação do relé;

n = multiplicador de tempo;

A, B, P = constantes que variam dependendo da curva escolhida, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação de curvas segundo a norma IEEE C37.112 (ABB, 2004)

Classificação	A	B	P
Extremamente Inversa	6,407	0,0250	2,0
Muito Inversa	2,855	0,0712	2,0
Inversa	0,0086	0,0185	0,02

O fator n influencia no posicionamento da curva em relação ao tempo. Um n menor implica em um tempo de operação mais rápido.

A Figura 12 mostra a curva ANSI Inversa. No Anexo I, no final deste documento, estão mostradas todas as curvas ANSI.

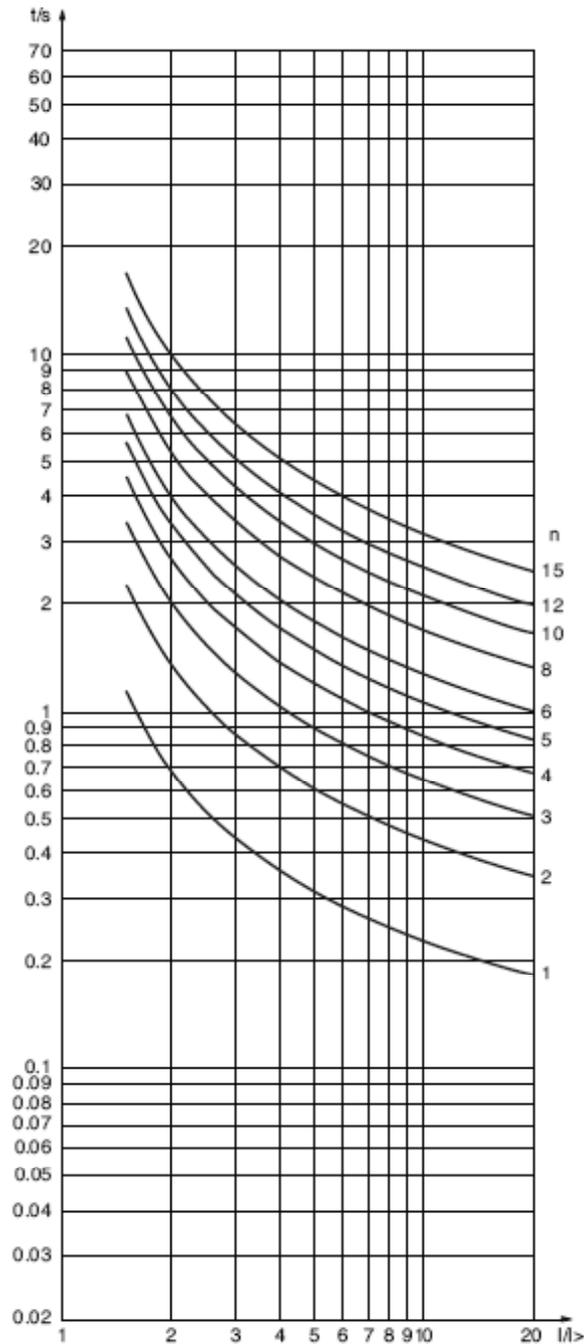


Figura 12 - Curva ANSI Inversa
(ABB, 2004)

4.3. Curvas de Tempo Definido

As curvas de tempo definido diferem das de tempo inverso por possuírem o mesmo tempo de atuação para qualquer valor de corrente acima do valor ajustado para atuação do relé. Esse tipo de curva é geralmente aplicada quando a corrente de curto-circuito é muito alta e requer atuação imediata. A Figura 13 mostra um exemplo de curva de tempo definido:

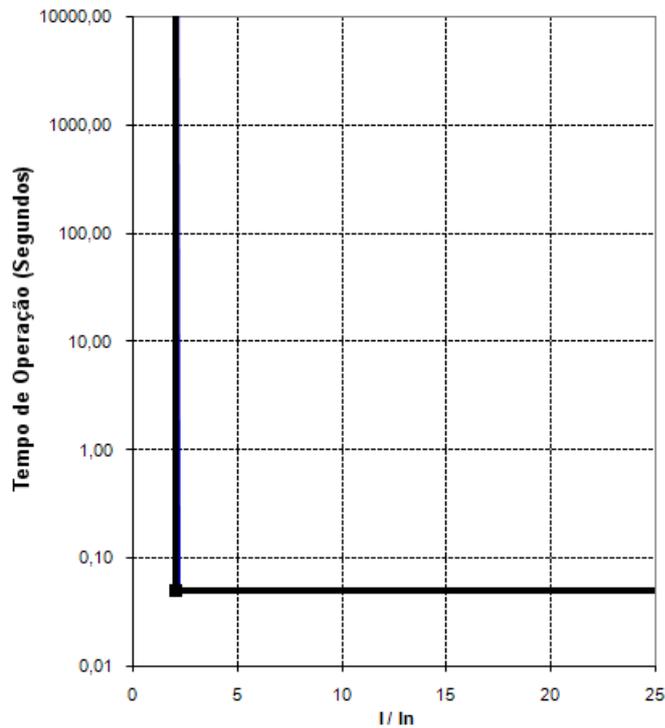


Figura 13 - Curva de atuação por tempo definido

4.4. Estágios de Proteção e Sobreposição de Curvas

Nos relés numéricos, geralmente estão disponíveis três estágios para a proteção de sobrecorrente, cada um com seu valor de ajuste (*pick-up*). A Tabela 4 mostra as nomenclaturas IEC e ANSI para estes estágios:

Tabela 4 - Nomenclatura dos estágios de sobrecorrente segundo normas IEC e ANSI (ABB, 2004)

Norma	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
IEC	I>	I>>	I>>>
ANSI	51	50-P1	50-P2

Para o primeiro estágio, é possível escolher entre as curvas de tempo inverso ou de tempo definido. Os outros dois estágios (comumente chamados instantâneos) são utilizados quando a corrente de curto circuito é mais elevada, dispensando a atuação por tempo inverso e utilizando somente as curvas de tempo definido. A curva de atuação do relé é então criada a partir de uma sobreposição dessas três curvas, como mostra a Figura 14:

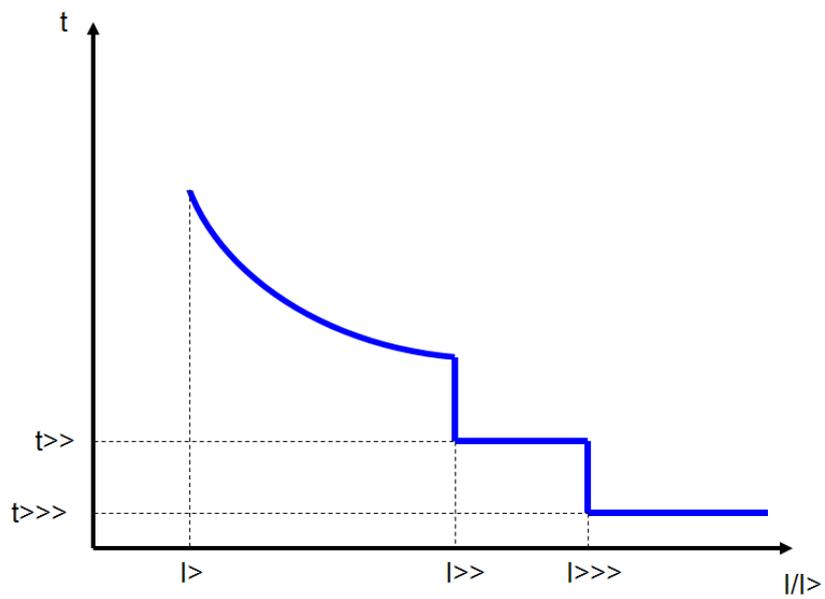


Figura 14 - Sobreposição das curvas de atuação dos três estágios de sobrecorrente

Assim, a atuação se dará na primeira curva quando a corrente na linha atingir o valor ajustado para o ajuste $I>$. Quando o valor de corrente atinge o ponto de início da curva $I>>$, essa será a curva de atuação do relé, com o mesmo valendo para a curva $I>>>$.

5. Harmônicas e Distorções Harmônicas

Harmônicas são formas de onda senoidais, que podem ocorrer tanto nos sinais de tensão quanto no de corrente, com frequência igual um múltiplo inteiro da frequência fundamental. A presença de harmônicos é devida a equipamentos e cargas com características não-lineares instalados no sistema de energia. Esses causam distorções nas formas de onda de tensão e corrente, as quais se deseja que sejam puramente senoidais.

Harmônicas são fenômenos contínuos, não podendo assim ser confundidos com fenômenos de curta duração, que duram apenas alguns ciclos. Distorção harmônica se caracteriza como um tipo específico de “energia suja”, normalmente associada com a presença de acionamentos estáticos, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos encontrados, por exemplo, nas plantas industriais. A Figura 15 mostra formas de onda distorcidas por harmônicas de 3ª e de 5ª ordem:

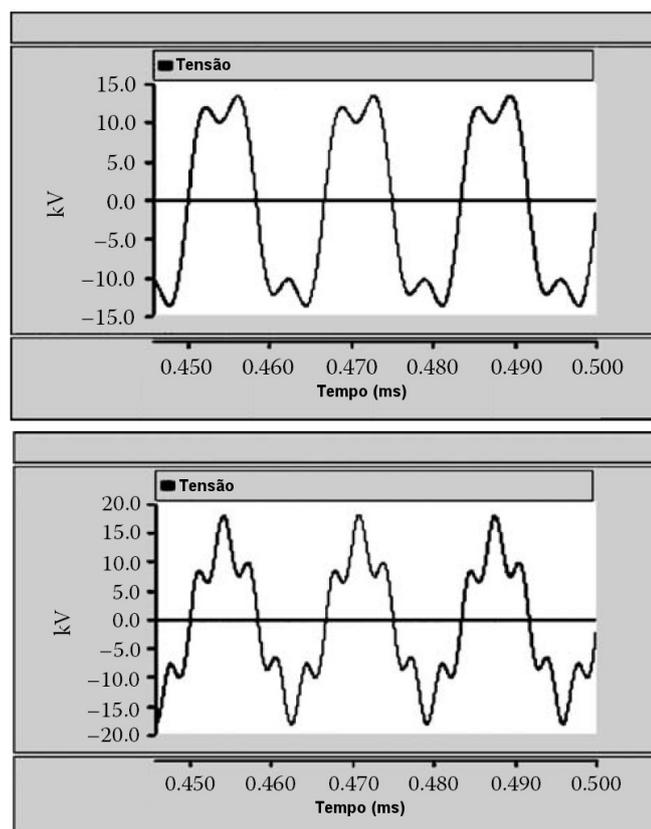


Figura 15 - Formas de onda distorcidas por harmônicas de 3ª e 5ª ordem, respectivamente (ROSA, 2006)

Esse tipo de distorção está em desacordo com um dos objetivos das concessionárias, que é a qualidade da energia fornecida. A tensão da energia fornecida deve ser puramente senoidal, com amplitude e frequência dentro de limites toleráveis de

variação. Assim, o fornecimento de energia a consumidores com cargas que causem deformação na forma de onda é prejudicial não só ao consumidor em questão, mas também a outros consumidores que utilizam da mesma rede.

A natureza e a amplitude das distorções harmônicas geradas por cargas não-lineares dependem, especificamente, de cada carga, mas duas generalizações podem ser assumidas (OLESKOVICZ, 2007):

- Geralmente, as componentes harmônicas que causam problemas são as de ordem ímpar;
- A amplitude da corrente harmônica diminui com o aumento da frequência.

A quantificação do grau de distorção presente na tensão e/ou corrente é feita através de série de Fourier. A vantagem nesse tipo de representação é que é possível analisar cada componente harmônico de forma individual, e depois compor a forma de onda pela soma desses componentes.

Dados os valores de tensões e/ou correntes harmônicas presentes no sistema, utiliza-se de um procedimento para expressar o conteúdo harmônico de uma forma de onda. Geralmente, um dos mais utilizados é a “Distorção Harmônica Total”. Que pode ser definida através das equações 3 e 4, e pode ser usado tanto para tensões quanto para correntes.

$$DHV_T = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{\max}} V_n^2}{V_1^2}} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (3)$$

$$DHI_T = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{\max}} I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (4)$$

onde:

DHV_T = distorção harmônica total de tensão;

DHI_T = distorção harmônica total de corrente;

V_n = valor eficaz da tensão de ordem n ;

I_n = valor eficaz da corrente de ordem n ;

V_1 = valor eficaz da tensão fundamental;

I_1 = valor eficaz da corrente fundamental;

n = ordem da componente harmônica;

n_{\max} = ordem da maior componente harmônica analisada.

Há também o conceito de Distorção Harmônica Individual, usado para quantificar a porcentagem de qualquer componente harmônica em relação à sua frequência fundamental, expresso pelas equações 5 e 6:

$$DHSV_I = \frac{V_n}{V_1} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (5)$$

$$DHSI_I = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (6)$$

onde:

$DHSV_I$ = distorção harmônica individual de tensão;

$DHSI_I$ = distorção harmônica individual de corrente;

V_n = valor eficaz da tensão de ordem n ;

I_n = valor eficaz da corrente de ordem n ;

V_1 = valor eficaz da tensão fundamental;

I_1 = valor eficaz da corrente fundamental.

Nos sistemas de potência, para fins práticos, desconsideram-se as harmônicas de ordens elevadas (a partir da 25ª a 50ª, dependendo do sistema), uma vez que elas são irrelevantes para o resultado final, apesar de causarem interferência em equipamentos de baixa potência (OLESKOVICZ, 2007).

A preocupação com harmônicos só ganhou destaque recentemente. No passado, cargas com características não lineares eram pouco utilizadas, e os equipamentos não eram tão expostos aos efeitos provocados por harmônicos. Entretanto, recentemente, com o rápido desenvolvimento da eletrônica de potência e a utilização de métodos que buscam o uso mais racional da energia elétrica, o conteúdo harmônico devido às cargas não lineares presente nos sistemas está se elevando, causando uma série de efeitos indesejáveis em diversos equipamentos ou dispositivos, comprometendo a qualidade e o próprio uso racional da energia elétrica.

Essas cargas não lineares, denominadas “Cargas Elétricas Especiais”, têm sido agregadas em grande quantidade no sistema elétrico brasileiro, e podem ser divididas em 3 grupos (OLESKOVICZ, 2007):

- Cargas de conexão direta ao sistema
 - Motores de corrente alternada;
 - Transformadores alimentadores;
 - Circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga;

- Fornos a arco.
- Cargas conectadas através de conversores
 - Motores de corrente contínua controlados por retificadores;
 - Motores de indução controlados por inversores com comutação forçada;
 - Motores síncronos controlados por cicloconversores (conversão estática direta CA/CA em uma dada frequência para outra frequência inferior);
 - Processos de eletrólise através de retificadores não-controlados;
 - Fornos de indução de alta frequência.
- Reguladores
 - Fornos de indução controlados por reatores saturados;
 - Cargas de aquecimento controladas por tiristores;
 - Reguladores de tensão a núcleo saturado;
 - Velocidade dos motores controlados por tensão de estator;
 - Computadores;
 - Eletrodomésticos com fontes chaveadas.

Altos níveis de distorção harmônica em uma instalação elétrica podem causar problemas para as redes de distribuição das concessionárias, para a própria instalação e para equipamentos ali instalados. As conseqüências podem chegar até a parada total de equipamentos importantes de produção.

Segue uma lista de conseqüências que as harmônicas podem causar em diversos tipos de equipamentos, e em seguida uma descrição mais detalhada de algumas delas (OLESKOVICZ, 2007):

- Capacitores: queima de fusíveis, e redução da vida útil;
- Motores: redução da vida útil, e impossibilidade de atingir potência máxima;
- Fusíveis/Disjuntores: operação falsa/errônea, e componentes danificados;
- Transformadores: aumento de perdas no ferro e no cobre, e redução de capacidade;
- Medidores: medições errôneas e possibilidade de contas mais caras;
- Telefones: interferências;
- Acionamentos/Fontes: operações errôneas devido a múltiplas passagens por zero, e falha na comutação de circuitos.

5.1. Cabos

Dos possíveis efeitos de harmônicas em cabos, podem ser destacados:

- Sobreaquecimento devido às perdas Joule que são acrescidas;
- Maior solicitação do isolamento devido a possíveis picos de tensão e imposição de correntes pelas capacitâncias de fuga, provocando aquecimento e conseqüentemente uma deterioração do material isolante.

Outro aspecto importante que pode ser destacado refere-se ao carregamento exagerado do circuito de neutro, principalmente em instalações onde são agregados muitos aparelhos eletrônicos, como microcomputadores, em que há uma predominância muito grande da terceira harmônica. Esta se caracteriza por ser de seqüência zero, portanto, propaga-se pelo neutro podendo dar origem a tensões perigosas quando estas correntes circulam por malhas de terra que foram mal projetadas (OLESKOVICZ, 2007).

5.2. Transformadores

Um transformador, quando submetido a distorções de tensão e corrente, experimentará um sobreaquecimento causado pelo aumento das perdas Joulicas, além de intensificar as fugas tradicionalmente manifestadas nos isolamentos.

Este aumento das perdas faz com que a vida útil deste equipamento seja reduzida, uma vez que a degradação do material isolante no interior do transformador ocorrerá de forma mais acentuada.

A Figura 16 mostra um perfil da vida útil de um transformador de corrente que se estabelece através de seus enrolamentos. Os resultados consideram que os componentes harmônicos, para cada situação, são superpostos a uma corrente fundamental igual a nominal do equipamento (OLESKOVICZ, 2007).

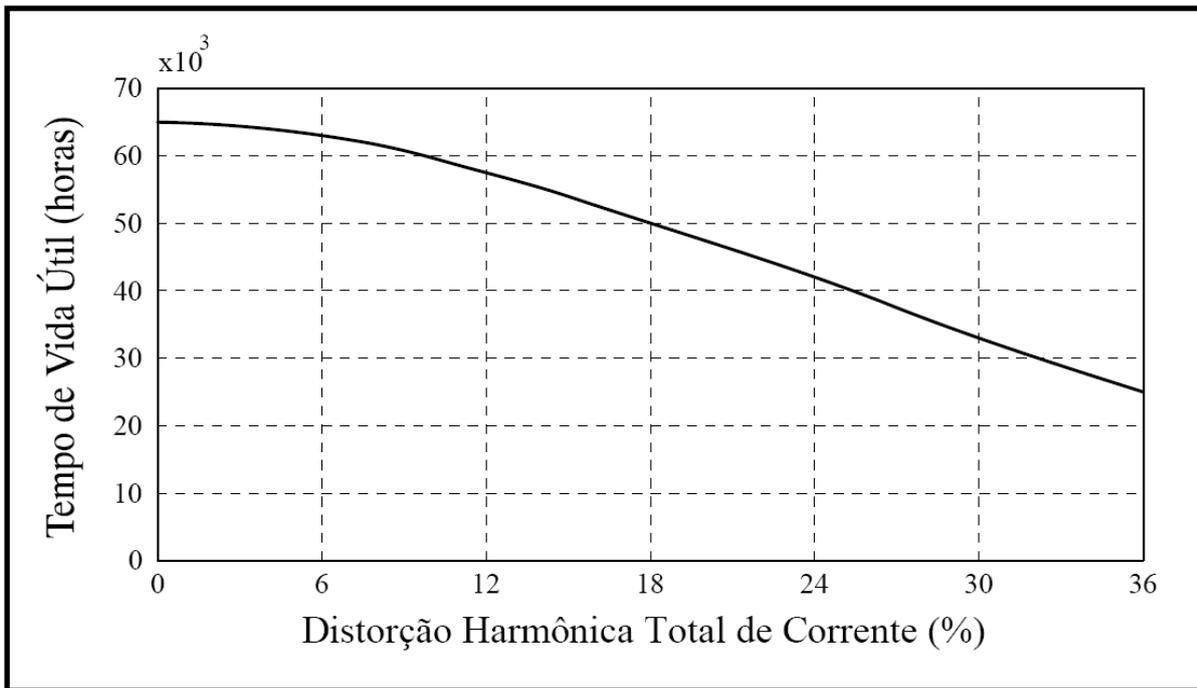


Figura 16 - Vida útil de um transformador em função da distorção harmônica de corrente (OLESKOVICZ, 2007)

5.3. Motores de Indução

Um motor de indução, operando sob alimentação distorcida, pode apresentar, de forma semelhante ao transformador, um sobreaquecimento de seus enrolamentos.

Este sobreaquecimento faz com que ocorra uma degradação do material isolante que pode levar a uma condição de curto-circuito por falha do isolamento. A Figura 17 mostra uma estimativa do acréscimo das perdas elétricas num motor de indução, em função da distorção total de tensão presente no barramento supridor.

Em relação à análise de desempenho de um motor de indução submetido a tensões harmônicas, verifica-se uma perda de rendimento e qualidade do serviço, devido ao surgimento de torques pulsantes. Estes podem causar uma fadiga do material, ou em casos extremos, para altos valores de torques oscilantes, interrupção do processo produtivo, principalmente em instalações que requerem torques constantes como é o caso de bobinadeiras na indústria de papel-celulose e condutores elétricos.

Com a utilização dos reguladores automáticos de velocidade, estes efeitos se pronunciam com maior intensidade, pois os níveis de distorção impostos pelos inversores superam os valores normalmente encontrados nas redes CA, muito embora, hoje, com novas técnicas de chaveamento, estes níveis têm sido reduzidos consideravelmente (OLESKOVICZ, 2007).

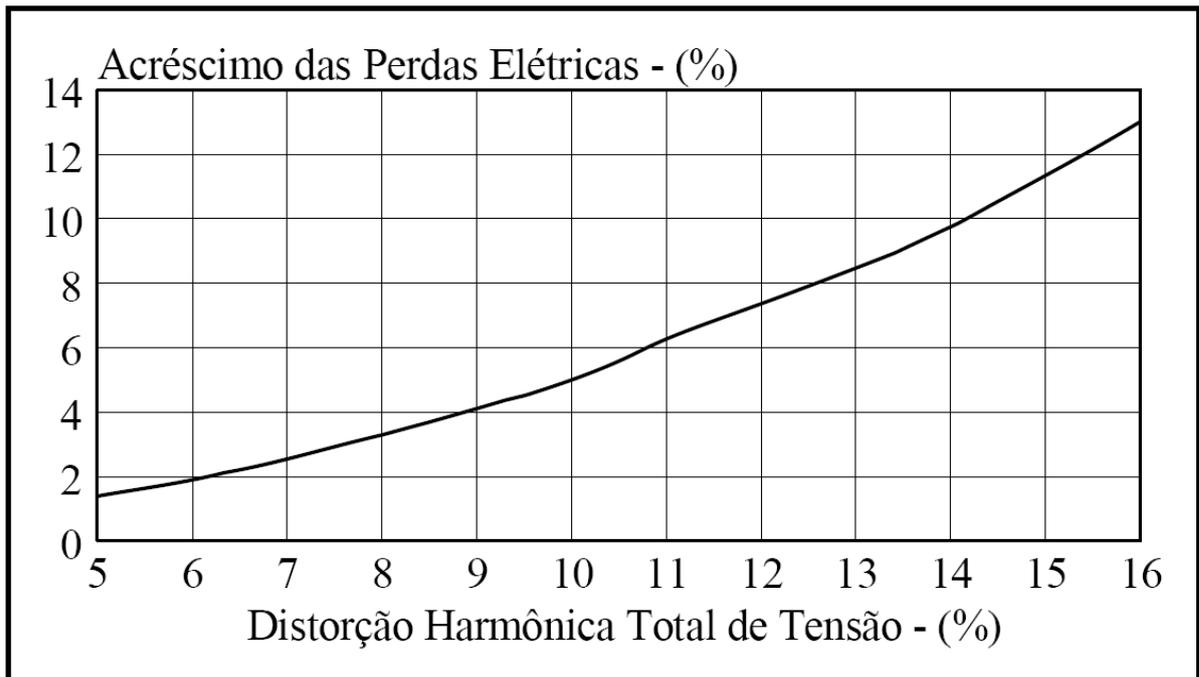


Figura 17 - Perdas elétricas de um motor de indução trifásico em função da distorção total de tensão (OLESKOVICZ, 2007)

5.4. Máquinas Síncronas

Pelo fato de estarem localizados distantes dos centros consumidores, as unidades geradoras, responsáveis por grandes blocos de energia, não sofrem de forma acentuada as conseqüências dos harmônicos injetados no sistema. Entretanto, em sistemas industriais dotados de geração própria, que operam em paralelo com a concessionária, tem sido verificado uma série de anomalias no que se refere à operação das máquinas síncronas. Dentre estes efeitos destacam-se:

- Sobreaquecimento das sapatas polares, causado pela circulação de correntes harmônicas nos enrolamentos amortecedores;
- Torques pulsantes no eixo da máquina;
- Indução de tensões harmônicas no circuito de campo, que comprometem a qualidade das tensões geradas.

Assim, é importante que uma monitoração da intensidade destas anomalias seja efetuada, com o propósito de assegurar operação contínua das máquinas síncronas, evitando transtornos como perda de geração. No caso de instalações que utilizam motores síncronos, as mesmas observações se aplicam.

De forma semelhante aos motores de indução, o grau de imunidade das máquinas síncronas aos efeitos de harmônicos é função do porte da máquina e da impedância de seqüência negativa (OLESKOVICZ, 2007).

5.5. Bancos de Capacitores

Bancos de capacitores instalados em redes elétricas distorcidas podem originar condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas.

Em decorrência desta sobretensão, tem-se uma degradação do isolamento das unidades capacitivas, e em casos extremos, uma completa danificação dos capacitores. Além disso, consumidores conectados no mesmo ponto de acoplamento comum ficam submetidos a tensões perigosas, mesmo não sendo portadores de cargas poluidoras em sua instalação, o que estabelece uma condição extremamente prejudicial à operação de diversos equipamentos. Entretanto, mesmo que não seja caracterizada uma condição de ressonância, um capacitor constitui-se um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, estando, portanto, constantemente sobrecarregado, sujeito a sobreaquecimento excessivo, podendo até ocorrer uma atuação da proteção, sobretudo dos relés térmicos (OLESKOVICZ, 2007). As figuras 18 e 19 ilustram a redução da vida útil dos capacitores em função da temperatura e em função da distorção de tensão.

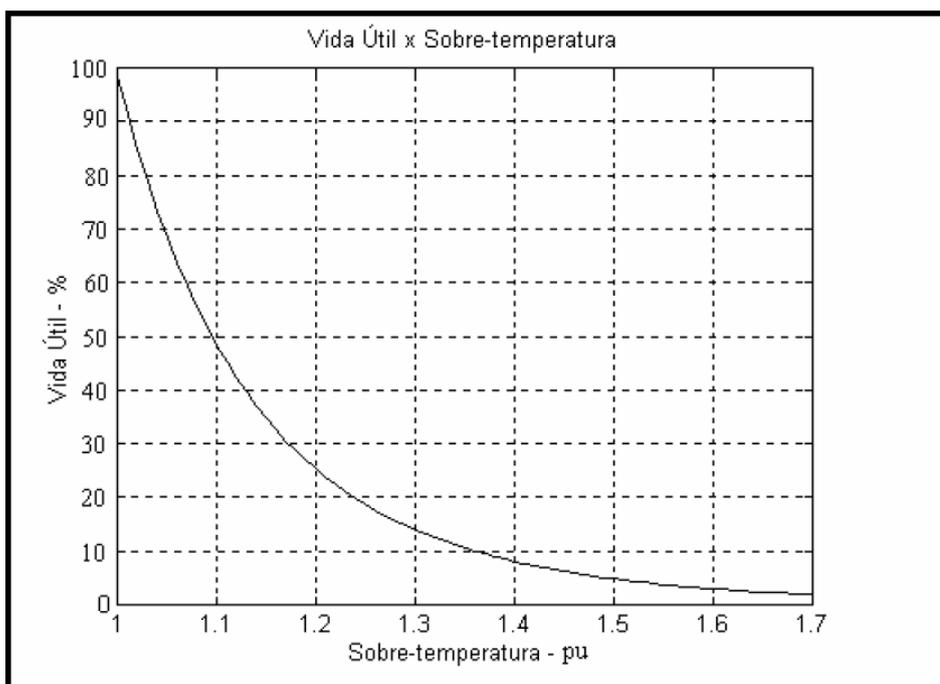


Figura 18 - Vida útil em função da sobre-temperatura em capacitores (OLESKOVICZ, 2007)

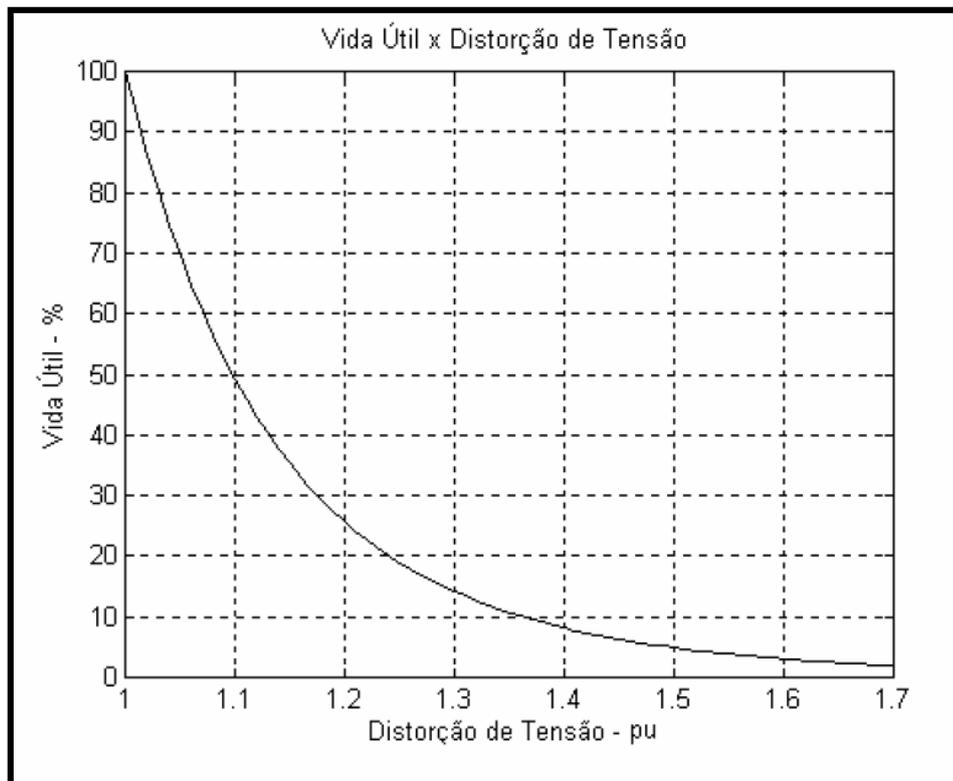


Figura 19 - Vida útil em função da sobretemperatura em capacitores (OLESKOVICZ, 2007)

5.6. Equipamentos de Proteção

Estes dispositivos, quando submetidos a sinais distorcidos, podem atuar de maneira incorreta, não retratando a real condição operacional do sistema.

Diante de tantos problemas causados por harmônicas, torna-se necessário tomar medidas preventivas ou corretivas, no sentido de reduzir ou eliminar os níveis harmônicos presentes nos barramentos e linhas de um sistema elétrico.

Dentre as diversas técnicas utilizadas destacam-se:

- **Filtros passivos:** são constituídos basicamente de componentes R, L e C através dos quais obtêm-se os filtros sintonizados e amortecidos. Estes filtros são instalados geralmente em paralelo com o sistema supridor, proporcionando um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas. Podem ser utilizados para a melhoria do fator de potência, fornecendo o reativo necessário ao sistema. Entretanto, existem alguns problemas relacionados à utilização destes filtros, dentre

os quais destacam-se: o alto custo, a complexidade de sintonia e a possibilidade de ressonância paralela com a impedância do sistema elétrico;

- **Filtros ativos:** um circuito ativo gera e injeta correntes harmônicas com defasagem oposta àsquelas produzidas pela carga não linear. Assim, há um cancelamento das ordens harmônicas que se deseja eliminar. Embora bastante eficientes, estes dispositivos apresentam custos elevados (superiores aos filtros passivos), o que tem limitado a sua utilização nos sistemas elétricos;
- Compensadores eletromagnéticos;
- Moduladores CC.

Técnicas tais como eliminação por injeção de um componente de corrente alternada ou pulsante, produzido por um retificador e aumento do número de pulsos dos conversores estáticos também podem ser utilizados. Dentre estas, a última tem sido mais usada e se enquadra dentro do contexto de equipamentos designados por compensadores eletromagnéticos de harmônicos (OLESKOVICZ, 2007).

No Capítulo 6 será mostrado o efeito de componentes harmônicas sobre a função de sobrecorrente instantânea (ANSI 50) em condições de regime permanente e falta trifásica, em um relé de proteção comercial.

6. Sistema de Distribuição Estudado

Para realização desse estudo, de forma que o mesmo buscasse seguir situações reais freqüentemente encontradas em concessionárias de energia elétrica, foi utilizado um modelo que busca representar o sistema de distribuição de uma concessionária regional (CORRÊA, 2007). O sistema está representado na Figura 20:

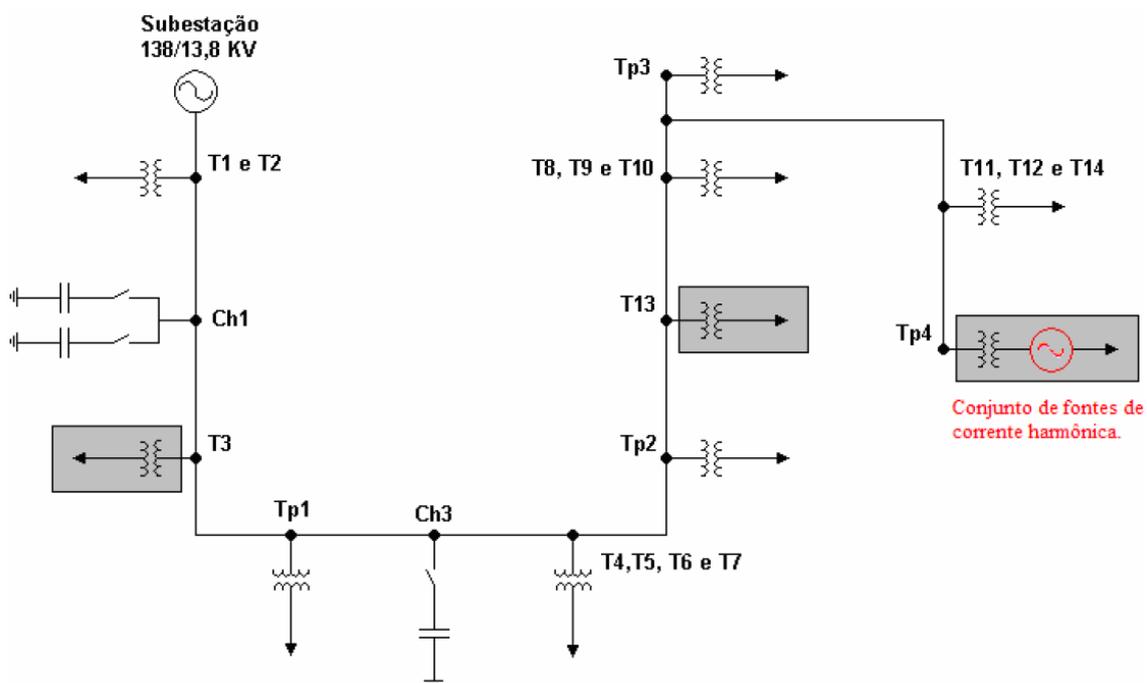


Figura 20 - Sistema de distribuição estudado
(CORRÊA, 2007)

Através da ilustração é possível ter uma visão adequada do sistema como um todo, situando a localização dos diversos componentes que constituem o sistema de distribuição.

O transformador da subestação recebe a tensão de 138 kV de um sistema de transmissão, passando com isso, a ser um sistema de distribuição com tensão de 13,8 kV.

Os transformadores de distribuição 3 e 13 e o transformador particular 4, mostrados no diagrama pelos blocos cinza, foram modelados considerando suas curvas de saturação. Já os transformadores particulares 1, 2 e 3, foram modelados sem considerar as respectivas curvas de saturação. Com isso, as cargas foram referidas ao primário com uma parcela RL em paralelo com um capacitor C, para correção do fator de potência. Para dimensionar o capacitor, de modo a propiciar a correção do fator de potência, as cargas foram consideradas com fator de potência original de 0,75 para posterior correção até os desejados 0,92. As características destes transformadores particulares são mostradas pela

Tabela 5 que apresenta as potências e suas respectivas cargas incidentes (CORRÊA, 2007).

Tabela 5 - Dados dos transformadores particulares (CORRÊA, 2007)

Transformadores Particulares	Carga Nominal	Carga Incidente
1	2250 kVA (03 trafos)	2500 kVA
2	3000 kVA (04 trafos)	1600 kVA
3	450 kVA (02 trafos)	456 kVA
4	300 kVA (01 trafo)	280 kVA

Os transformadores de distribuição apresentam as características mostradas na Tabela 6 e seus fatores de potência são considerados como 0,9538 para se definir a carga RL após os mesmos. Em alguns casos, um grupo de transformadores foi agrupado e representado por apenas um bloco, desta forma representando as cargas equivalentes desses transformadores, cujo ponto de conexão com o sistema está indicado na Figura 16. Deve-se lembrar que todos os transformadores de distribuição são do tipo delta-estrela-aterrado, com resistência de aterramento de zero ohm e tap ajustado em 13.200/220 volts (CORRÊA, 2007).

Tabela 6 - Dados dos transformadores de distribuição (CORRÊA, 2007)

Transformadores Particulares	Carga Nominal	Carga Incidente
1	75 kVA	40 kVA
2	75 kVA	31 kVA
3	45 kVA	32 kVA
4	45 kVA	22 kVA
5	112,5 kVA	19 kVA
6	225 kVA	89 kVA
7	150 kVA	27 kVA
8	150 kVA	29 kVA
9	45 kV A	9 kVA
10	225 kVA	19 kV
11	30 kVA	26 kVA
12	150 kVA	86 kVA
13	75 kVA	19 kVA
14	75 kVA	7 kVA

A fonte de harmônicas a ser estudada está representada no ponto Tp4, e consiste dos seguintes elementos:

- Estação de trabalho (1kW);
- Microcomputador (300W);

- Inversor de frequência (10kW);
- DC Drive (9kW);
- Forno a arco (15MW);
- Forno de indução (20MW);

Os espectros harmônicos relativos a cada uma dessas cargas são mostrados a seguir. Esses espectros foram estudados em conjunto, formando uma única fonte de harmônicas no sistema:

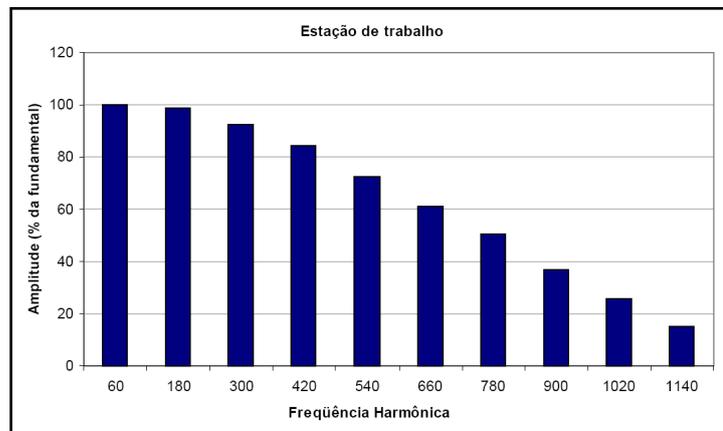


Figura 21 - Espectro harmônico da corrente de uma estação de trabalho (CORRÊA, 2007)

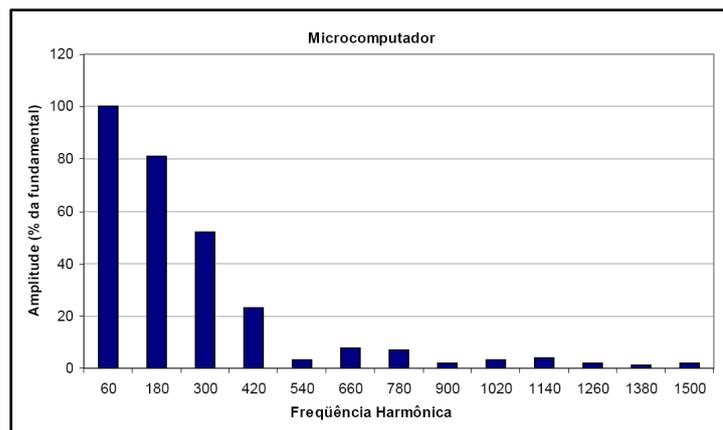


Figura 22 - Espectro harmônico da corrente de um microcomputador (CORRÊA, 2007)

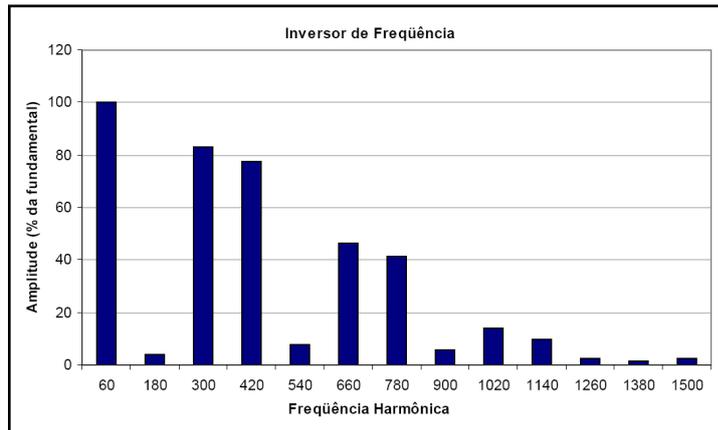


Figura 23 - Espectro harmônico da corrente de um inversor de frequência (CORRÊA, 2007)

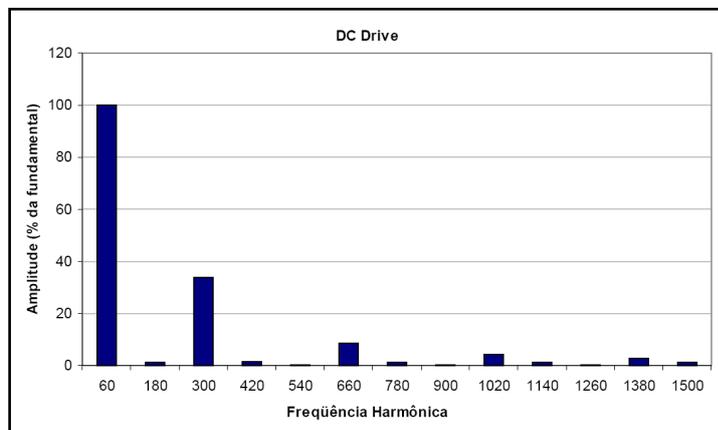


Figura 24 - Espectro harmônico da corrente de um *DC drive* (CORRÊA, 2007)

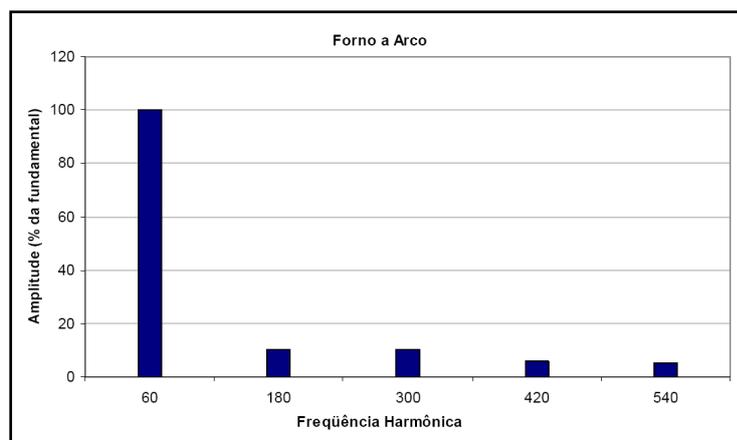


Figura 25 - Espectro harmônico da corrente de um forno a arco (CORRÊA, 2007)

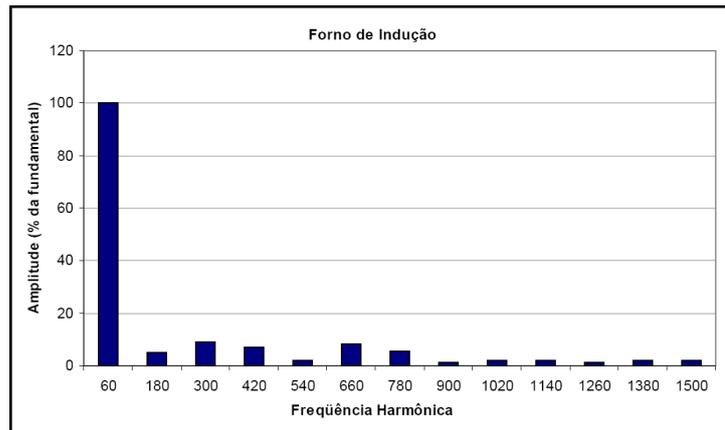


Figura 26 - Espectro harmônico da corrente de um forno de indução (CORRÊA, 2007)

Será simulada no sistema uma falta trifásica no ponto Tp4, seguindo os seguintes passos:

- Cálculo dos parâmetros de falta do sistema;
- Simulação dos casos de falta no *software* ATP (*Alternative Transients Program*);
- Ensaio com o relé.

6.1. Cálculo dos Parâmetros de Falta do Sistema

O cálculo dos parâmetros de falta do sistema irá definir os ajustes que serão utilizados mais adiante no relé de proteção.

Para o cálculo da contribuição à corrente de curto-circuito devido a uma falta no ponto Tp4, as cargas em paralelo podem ser ignoradas, por se tratarem de cargas estáticas (STEVENSON, 1886; ELGERD, 1976). Nesse caso, para uma falta nesse ponto, os parâmetros a serem considerados são os dados de impedância da linha de transmissão e impedância relativa do sistema, mostrados pelo circuito equivalente na Figura 27 e pela Tabela 7:

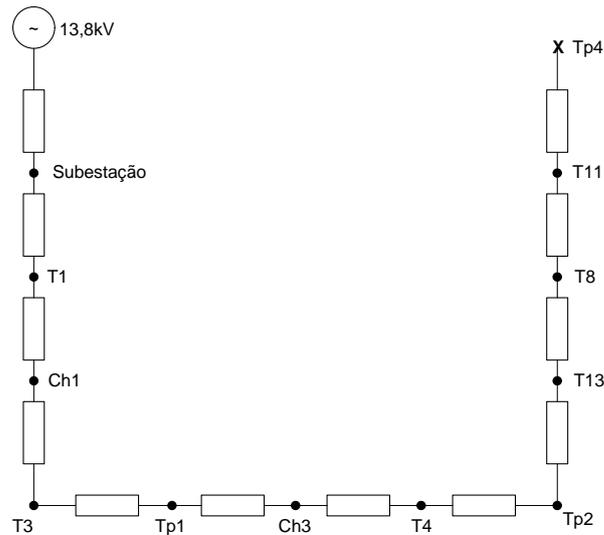


Figura 27 - Circuito equivalente do sistema

Tabela 7 - Dados de impedância do sistema (CORRÊA, 2007)

Trechos	Seqüência Zero (Z ₀)		Seqüência Positiva (Z ₁)	
	R (Ω)	X (Ω)	R (Ω)	X (Ω)
Equivalente	3,563	357,778	1,197	157,636
Subestação a T1	0,183	0,498	0,045	0,132
T1 a Ch1	0,075	0,203	0,018	0,054
Ch1 a T3	0,068	0,184	0,017	0,049
T3 a Tp1	0,094	0,256	0,023	0,068
Tp1 a Ch3	0,149	0,407	0,037	0,108
Ch3 a T4	0,079	0,214	0,019	0,056
T4 a Tp2	0,092	0,250	0,023	0,067
Tp2 a T13	0,038	0,103	0,009	0,027
T13 a T8	0,113	0,308	0,028	0,081
T8 a T11	0,100	0,153	0,060	0,045
T11 a Tp4	0,100	0,153	0,060	0,045

A potência nominal do transformador em Tp4 é de 300kVA (CORRÊA, 2007).

Os parâmetros a serem definidos para esse sistema são os valores base e a corrente de falta trifásica.

6.1.1. Cálculo dos Valores Base

A análise de falta em um SEP é feita com os valores em pu (por unidade), ou seja, valores medidos em relação a um referencial, chamado de valor de base (STEVENSON, 1986; ELGERD, 1976). Inicialmente, foram definidos como valores base para uma falta no ponto Tp4:

$$V_{Base} = 13,8kV$$

$$S_{Base} = 300kVA$$

onde:

V_{Base} = Valor base de tensão;

S_{Base} = Valor base de potência.

A partir daí, foram calculados os valores de base para a impedância e para a corrente, através das equações 7 e 8:

$$Z_{Base} = \frac{V_{Base}^2}{S_{Base}} \quad (7)$$

$$I_{Base} = \frac{S_{Base}}{\sqrt{3} \cdot V_{Base}} \quad (8)$$

onde:

Z_{Base} = Valor base de impedância;

I_{Base} = Valor base de corrente.

Obtendo assim os valores:

$$Z_{Base} = 634,80$$

$$I_{Base} = 12,55A$$

6.1.2. Falta Trifásica

No caso de uma falta entre as três fases do sistema, a corrente de falta pode ser definida pela equação 10 (COURY, 2006):

$$I_f = \frac{E_1}{Z_1 + Z_f} \quad (10)$$

onde:

I_f = corrente de falta;

E_1 = tensão pré-falta;

Z_1 = impedância de sequência positiva;

Z_f = impedância de falta;

Assim como no caso da falta fase-terra, a tensão pré-falta é admitida como 1,0 pu (COURY, 2006). Assim, com base nos valores calculados no item 6.1.1, as correntes de falta serão:

$$I_f = 4,016\text{pu, para } Z_f = 0$$

$$I_f = 3,893\text{pu, para } Z_f = 40 \text{ O}$$

Os valores de resistência de falta usados visam estudar um caso de curto-circuito franco ($Z_f = 0$), e um caso típico de resistência de falta em um sistema de distribuição ($Z_f = 40 \text{ O}$) (ABB SWITCHGEAR AB DEPARTMENT TSA, 1999; SILVA, 2003).

6.2. Simulação dos Casos de Falta no *Software* ATP

Para o estudo da forma de onda da corrente em casos de falta, foi feita uma simulação computacional através do *software* ATP. O código-fonte utilizado para modelagem do sistema é apresentado no Anexo II, no final deste trabalho (CORRÊA, 2007).

Todas as faltas foram simuladas no ponto Tp4, representado nas Figuras 15 e 22. As simulações compreenderam casos de falta trifásica, na presença ou não da fonte de harmônicas e de resistência de falta. Também foi considerado o ângulo de incidência da falta em duas situações distintas: 0° e 90° (SILVA, 2003). O caso de regime foi considerado para fins de comparação. Os casos simulados estão representados na Tabela 8:

Tabela 8 - Lista de casos simulados no *software* ATP

Caso nº:	Situação	Z_f [O]	Ângulo de Incidência	Presença de Harmônicos
1	Regime	-	-	Não
2	Falta trifásica	0	0°	Não
3	Falta trifásica	0	90°	Não
4	Falta trifásica	40	0°	Não
5	Falta trifásica	40	90°	Não
6	Regime	-	-	Sim
7	Falta trifásica	0	0°	Sim
8	Falta trifásica	0	90°	Sim
9	Falta trifásica	40	0°	Sim
10	Falta trifásica	40	90°	Sim

A presença da fonte de harmônicas causou considerável distorção na forma de onda do sistema. As Figuras 28 e 29 mostram o sistema em regime, sem situação de falta, com e sem a contribuição da fonte geradora de harmônicas, enquanto as Figuras 30 e 31 mostram

o comportamento da forma de onda durante a falta trifásica simulada nos casos 2 e 7. É possível notar que em regime as harmônicas afetam consideravelmente a forma de onda, fato que não ocorre na forma de onda da corrente após a incidência da falta, que permanece praticamente a mesma. Os resultados dessa constatação serão discutidos nas conclusões desse trabalho.

A lista completa de formas de onda dos casos estudados se encontra no Anexo III, no final deste trabalho.

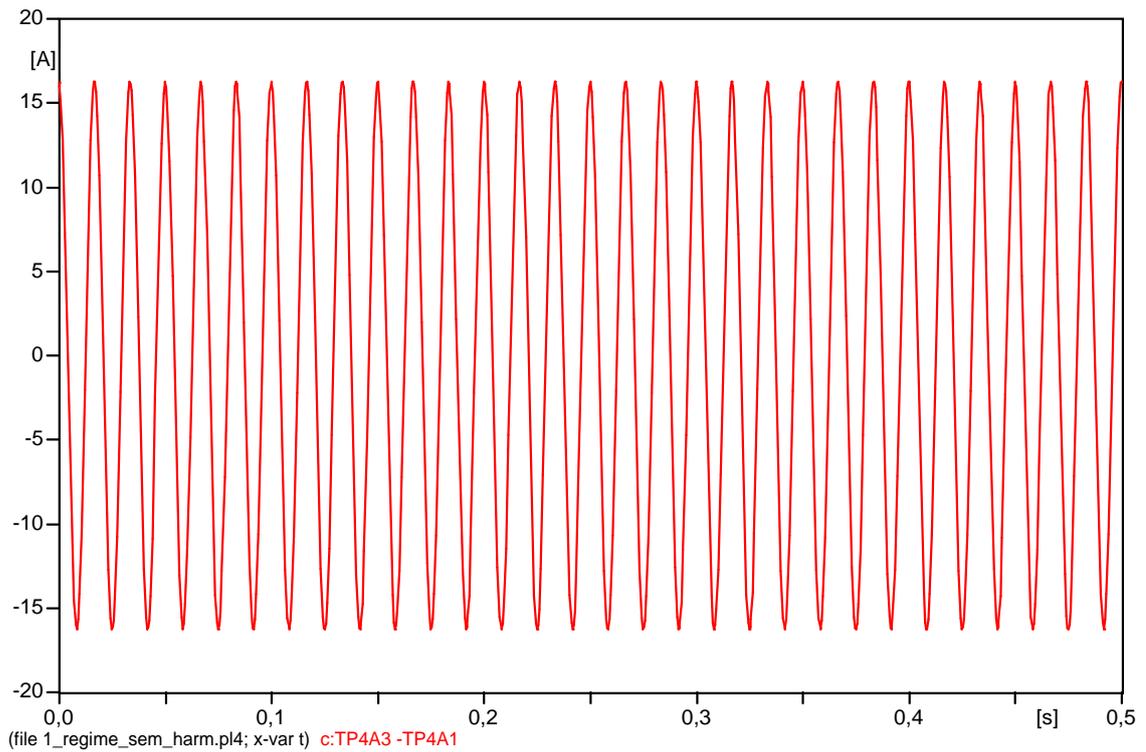


Figura 28 - Situação de regime, sem a presença de harmônicas

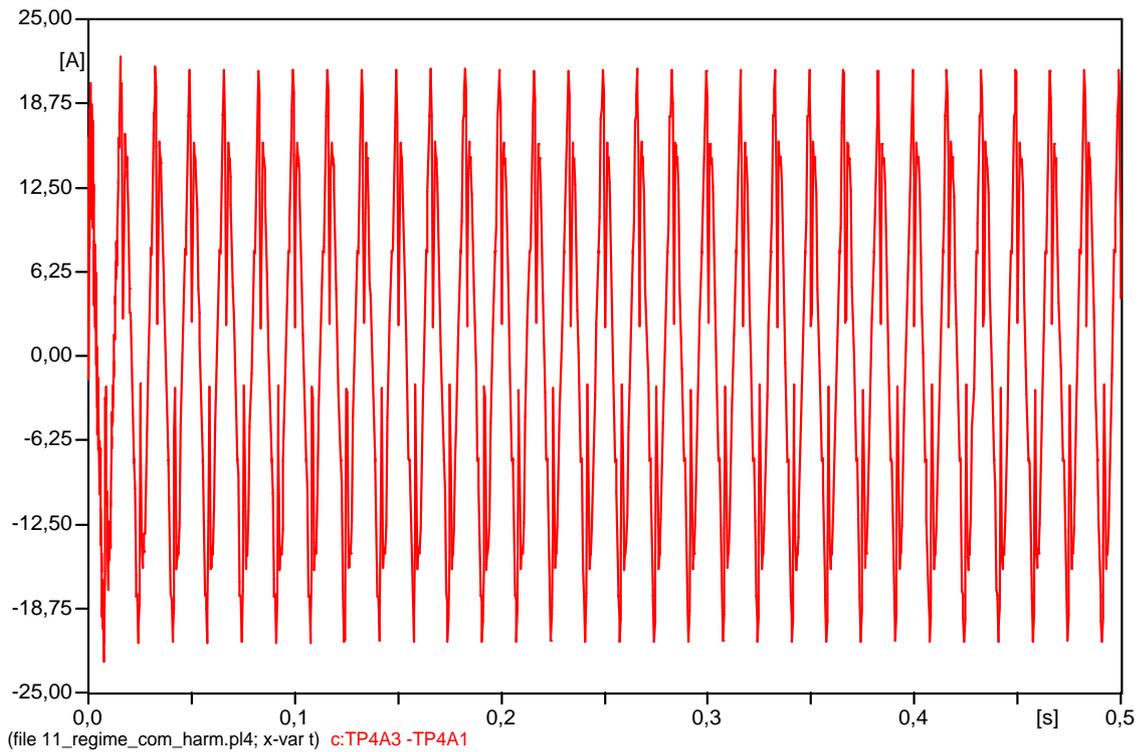


Figura 29 - Situação de regime, com a presença de harmônicas

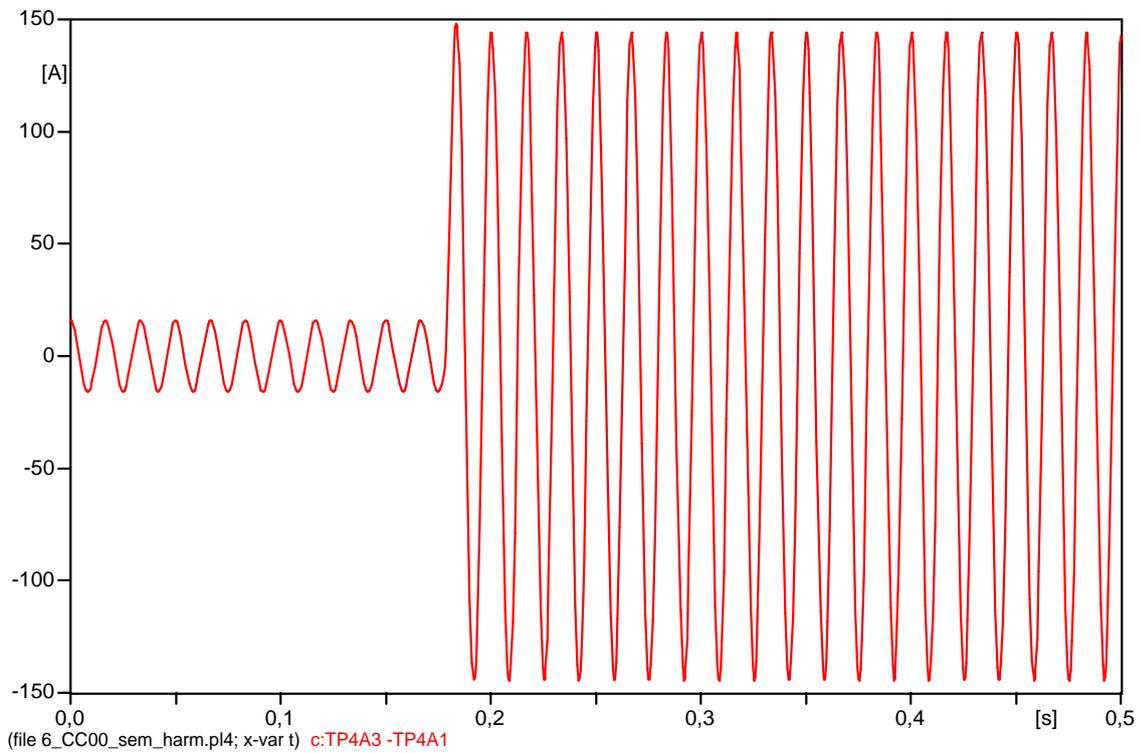


Figura 30 - Situação de falta trifásica (00, 0°), sem a presença de harmônicas

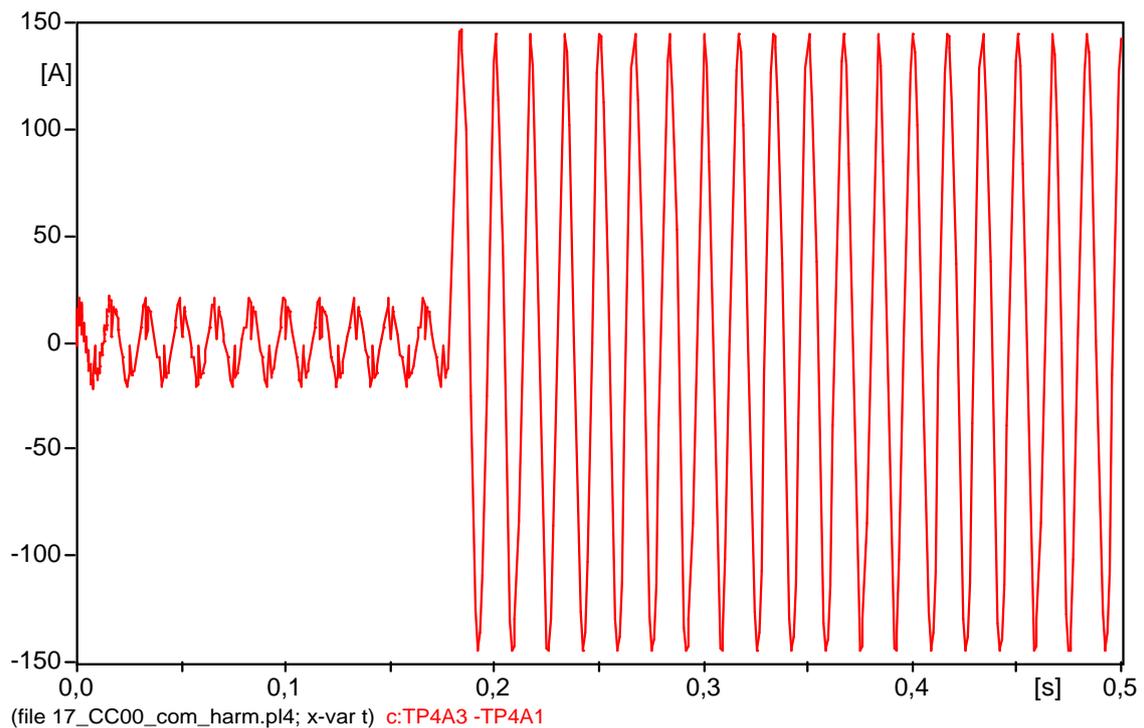


Figura 31 - Situação de falta trifásica (00, 0º), com a presença de harmônicas

6.3. Ensaio da Função 50 em um Relé Digital de Proteção Comercial

O ensaio ao qual o relé digital de proteção comercial foi submetido foi realizado em três estágios distintos. Inicialmente, as formas de onda geradas pelo *software* ATP foram convertidas para o formato COMTRADE, compatível com o equipamento de testes, através de *software* específico. Em seguida, foram feitos os cálculos para os ajustes a serem feitos no relé. Por fim, foi montado o esquema de teste mostrado na Figura 32. Nesse esquema foram utilizados um relé, para realizar a proteção de sobrecorrente; uma caixa de testes, para injeção da forma de onda; e um computador, para configuração e leitura de dados de ambos os equipamentos anteriores:

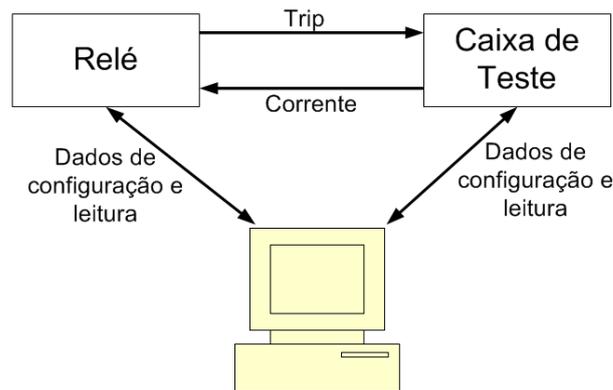


Figura 32 - Esquema de testes

As ondas já convertidas para o formato COMTRADE foram injetadas no relé com o auxílio da caixa de teste. Este, por sua vez, ao identificar a situação de falta envia o sinal de *trip* para a caixa de teste, através de um contato de saída. O intervalo de tempo medido pela caixa entre o início da injeção da forma de onda e o recebimento do sinal de *trip* foi usado para fazer a análise de desempenho.

6.3.1. Cálculo dos Ajustes do Relé

Para o cálculo dos ajustes do relé, inicialmente é necessário escolher um TC compatível com a corrente nominal da linha. Assim, para o transformador de 300kVA e a tensão de 13,8kV, a corrente nominal pode ser calculada pela equação 11 (STEVENSON, 1986):

$$I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3} \cdot V_{nom}} \quad (11)$$

onde:

I_{nom} = corrente nominal da linha;

S_{nom} = potência nominal do transformador;

V_{nom} = tensão nominal do sistema.

O resultado obtido para a corrente nominal foi de 12,55A, equivalente a 1pu. Foi então escolhida a relação comercial de 20/5 para o TC, de acordo com a norma ABNT (NBR 6856, 1982).

O ajuste escolhido para a corrente de falta no relé, baseado nos definidos no item 6.1.2, foi de 3,7pu, que equivale a 46,44A, considerando a corrente nominal da linha. Assim,

o relé irá atuar para ambos os casos de curto-circuito. Esse ajuste foi configurado no relé e então as formas de onda foram injetadas com o auxílio da caixa de teste.

6.3.2. Metodologia de Análise e Resultados Obtidos

A análise de resultados se deu a partir do tempo de atuação medido pela caixa de teste e pelas oscilografias geradas pelo relé. As Figuras 33, 34 (caso sem harmônicas) e 35 (caso com harmônicas) mostram exemplos do relatório de eventos gerado pela caixa de teste e da oscilografia do relé:

Test Report				10/11/2008	1 of 1			
Macro Name: TRANS		Test Name: 7_cc00_sem_harm						
Location Path \LSEE\Sem Harmônico\SEL 421\Falta\7_cc00_sem_harm								
File Information								
Station: 7 cc00 sem harm								
Total Channels: 3 Analog:3 Digital: 0								
Samples: 3.847 Sample Rate: 7,692.000 Hz								
Analog Channel Information								
Channel Name	Maximum	Units	PT/CT	Secondary	Units Src % Range			
TP4A3 -> TP4A1	147.912	A	4:1	36.978	A I1 100			
TP4B3 -> TP4B1	144.664	A	4:1	36.166	A I2			
TP4C3 -> TP4C1	144.888	A	4:1	36.222	A I3			
Digital Channel Information								
Channel Name		Inv	Src					
Timer Information								
Timer Name	Timer Start	Stop Events	Units	Expected	Tolerance Units	Plus Tolerance	Minus Tolerance	
Tempo 50	1	O->C	mSec	0.00	%	5.00	5.00	
Summary Time Stamp:			Expected	+ %	- %	Timer	Error	Result
10/11/2008 13:56:15			0.00	5.00	5.00	196.70	0.00	Op
Notebook Information								
Originator Notes			User Notes					

Figura 33 - Relatório gerado pela caixa de testes

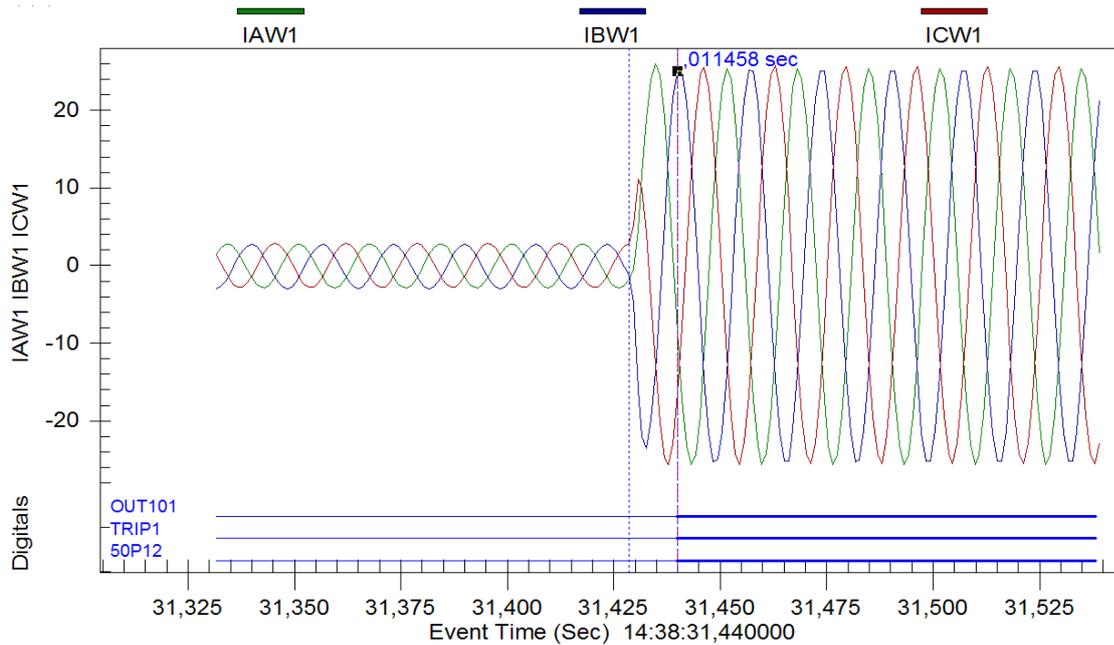


Figura 34 - Oscilografia do relé (caso 2 da tabela 8)

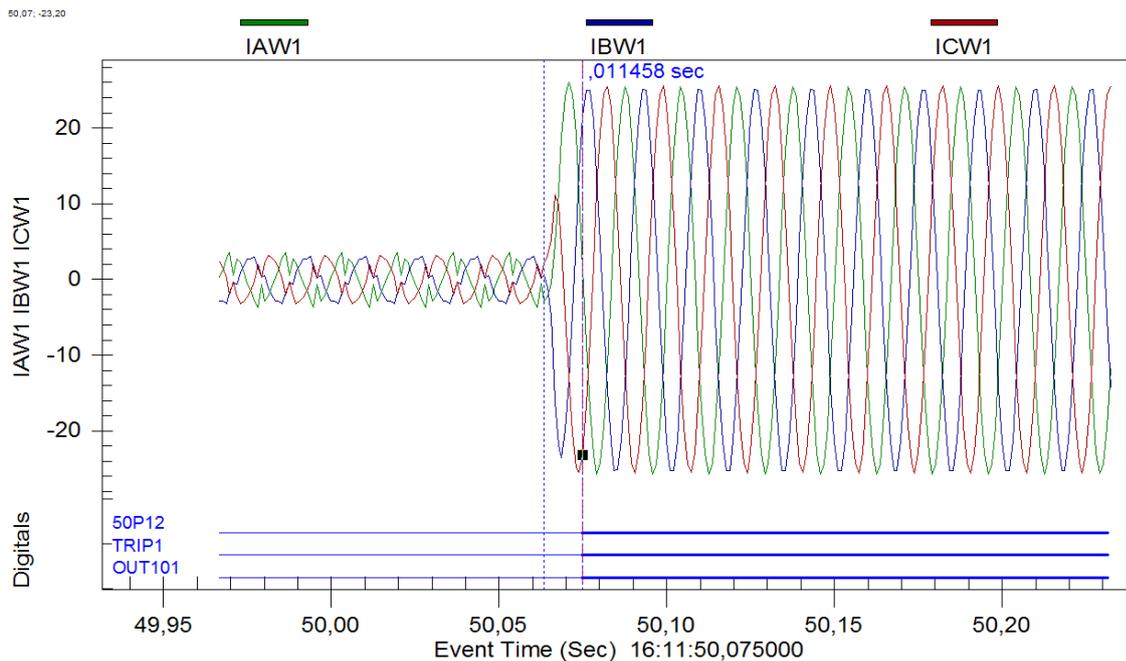


Figura 35 - Oscilografia do relé (caso 7 da tabela 8)

O método de análise consistiu em comparar o tempo de atuação contido no relatório da caixa de testes e a informação de tempo da oscilografia. O tempo de atuação contido no relatório leva em conta o tempo de pré-falta, que foi considerado 167ms nos casos de falta a 90° e 178ms nos casos de falta a 0° . Subtraindo o tempo de pré-falta do tempo medido, foi possível obter o tempo de atuação do relé, que pôde ser confirmado via medição de cursores na oscilografia.

Os tempos para os casos de falta semelhantes então foram comparados em relação à presença ou não de harmônicos, e os resultados são mostrados na Tabela 9:

Tabela 9 - Resultados de tempo obtidos no ensaio

Casos nº:	Impedância e ângulo de falta	Tempo Pré-Falta [ms]	Tempo Medido [ms]		Tempo de Atuação [ms]	
			Sem Harmônicos	Com Harmônicos	Sem Harmônicos	Com Harmônicos
2 e 7	00, 0°	178	196,70	195,50	18,70	17,50
3 e 8	00, 90°	167	184,70	183,10	17,70	16,10
4 e 9	400, 0°	178	193,80	194,10	15,80	16,10
5 e 10	400, 90°	167	185,50	184,40	18,50	17,40

Os resultados obtidos mostram que não há diferença significativa entre os valores de tempo de atuação para o sistema com ou sem a presença da fonte de harmônicas. Devido ao fato de a corrente de falta trifásica ter uma amplitude muito elevada, as distorções harmônicas não têm influência prática na forma de onda pós-falta, e os relés atuam de maneira praticamente idêntica. As figuras 34 e 35 mostram essa situação.

Por outro lado, considerando as formas de onda do sistema em regime, ilustradas nas figuras 28 e 29, é possível ver que a presença de distorções harmônicas exerce influência não desprezível no sistema. Assim, uma proteção de sobrecorrente temporizada, utilizada em casos de falta à terra e que trabalha com amplitudes menores de corrente no ajuste, poderia ter seu funcionamento afetado, uma vez que o ajuste teria uma chance maior de ser sensibilizado pelas distorções harmônicas.

7. Conclusões

Os temas Proteção e Qualidade da Energia Elétrica estão cada vez mais presentes nos debates técnicos sobre Sistemas Elétricos de Potência. O presente trabalho teve por objetivo determinar o comportamento da função de sobrecorrente instantânea em uma falta trifásica diante da presença ou não de distorções harmônicas.

Desta forma, procurou-se nos capítulos iniciais exibir, de forma prática e simples, conceitos gerais sobre a proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Verificou-se que são exigidas qualidades obrigatórias para um sistema de proteção, entre elas a sensibilidade e a confiabilidade, que puderam ser comprovadas através dos testes realizados, visto que não houve atuações indevidas do relé de proteção.

Apresentados esses conceitos, foi ressaltada a evolução tecnológica dos relés de proteção, e foi possível observar que esse tipo de equipamento foi agregando cada vez mais funções diante do avanço tecnológico. Iniciando nos relés eletromecânicos, capazes de realizar apenas uma proteção, foram apresentadas as funcionalidades adicionais que o relé de proteção adquiriu até os dias de hoje, onde é capaz de fazer gravações de distúrbios, múltiplas proteções e comunicação via rede, entre outras funcionalidades.

Após essas informações sobre proteção, foram apresentados os conceitos de distorção harmônica, e como esse tipo de distúrbio pode impactar negativamente nos Sistemas Elétricos de Potência. Verificou-se que essa é uma preocupação recente, visto que somente nos últimos tempos houve um crescimento de cargas não-lineares capazes de provocar esse tipo de distúrbio nos Sistemas Elétricos de Potência.

Enfim, foi montado um sistema simples de simulação para estudar esse tipo de efeito na proteção de sobrecorrente instantânea. As curvas relativas aos casos de falta em estudo foram geradas via *software* e injetadas no relé de proteção numérico comercial através de adequado equipamento de teste.

A partir dessa simulação, verificou-se pelos resultados obtidos que a presença ou não de harmônicas não exerceu influência sobre a atuação dos relés, pois como mostram os resultados da Tabela 9 (Item 6.3.2), não houve diferença significativa entre os tempos de atuação do relé. Tal fato pode ser explicado pela influência da fonte de harmônicas na corrente de falta, pois comparando as situações de regime e de falta, explicitadas nas Figuras 23 a 26 do item 6.2, é possível ver que a fonte de harmônicas só exerce influência significativa no sistema em regime, e que seu efeito é praticamente desprezível diante da grande amplitude da corrente de falta. Outro ponto a ser considerado é a influência dos filtros de harmônicos, implementados a partir da criação dos relés numéricos. Tais filtros têm como objetivo eliminar possíveis distorções na forma de onda medida pelo relé.

7.1. Sugestões Para Trabalhos Futuros

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, podem ser sugeridos os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Análise do impacto de harmônicas nos relés eletromecânicos. Uma vez que somente os relés digitais possuem filtros de harmônicas, os relés eletromecânicos podem não ser tão efetivos em faltas com esse distúrbio.
- Estudar a função de proteção de sobrecorrente temporizada na existência de distorções harmônicas, pois nesse tipo de função de proteção, as correntes de falta são menores que as correntes de falta trifásica, podendo ser assim afetadas mais significativamente pelas distorções.
- Analisar um sistema com uma fonte de harmônicas em um ponto de falta mais próximo do transformador de distribuição, visto que a distância do equivalente do sistema ao ponto de falta gerou uma grande contribuição para a corrente de falta, tornando desprezíveis os efeitos da fonte de harmônicas em caso de curto-circuito.

8. Referencias Bibliográficas

- ABB REF543 – CONTROLE E PROTEÇÃO DE ALIMENTADOR. Disponível em: <<http://www.abb.com/global/seitp/seitp328.nsf/pp/D149A0537681C3CFC1256E440060E676-1>>. Acesso em: 28 out. 2008
- ABB SUBSTATION AUTOMATION AND PROTECTION. Disponível em: <<http://www.abb.com/substationautomation>>. Acesso em: 28 out. 2008
- ABB SUBSTATION AUTOMATION AND PROTECTION. Disponível em: <<http://www.abb.com/substationautomation>>. Acesso em: 28 out. 2008
- ABB SWITCHGEAR AB DEPARTMENT TSA. Protection Application Handbook. Suécia: AB Switchgear. 1999.
- ABB. REF610 – Technical Reference Manual. Finlândia: ABB Oy. 2004.
- ABNT/NBR 5410/2004. Instalações elétricas de baixa tensão. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2004.
- ABNT/NBR 5459/1987. Condutores Elétricos. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1987.
- ABNT/NBR 6586/1992. Transformador de Corrente. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.
- ANSI/IEEE Standard C37.90. Relays and Relay Systems Associated with Electric Apparatus. IEEE Service Center.
- BERNARDES, A. P.. Um Esquema Completo de Proteção Diferencial de Transformadores para Testes em um Relé Digital. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.
- CHEMIN NETTO, U. Aplicações de Controle e Supervisão Distribuídas em Subestações de Energia Elétrica Através do Uso de Relés Digitais de Proteção. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- CIGRE Working Group 34.01. "Digital Protection Techniques and Substation Functions". A.G. Phadke (Convener), France, June 1989
- CORRÊA, F. I. M. Estudo de um Sistema de Distribuição com Enfoque na Qualidade da Energia Elétrica. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- COURY, D. V. Cálculo de Curto-Circuito. Curso: SEL0348 – Cálculo de Curto-Circuito. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- COURY, D. V. Proteção em Sistemas de Energia Elétrica. Curso: SEL0354 – Proteção em Sistemas de Energia Elétrica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- DOLEZILEK, D. IEC 61850: What You Need To Know About Functionality And Practical Implementation. USA: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 2005.
- ELGERD, O. I. Introdução a Teoria de Sistemas de Energia Elétrica, McGraw-Hill. 1976.
- ELMORE, W. A. Pilot Protective Relaying. New York: Marcel Dekker. ISBN 08-2478-195-3. 2000.

ELMORE, W. A. Protective Relaying Theory and Applications. 2th Edition. New York: Marcel Dekker. ISBN 08-2470-972-1. 1997.

GUREVICH, V. Electric Relays – Principles and Applications. Israel: Israel Electric Corporation. 2006.

HOROWITZ, S. e PHADKE, A. G. Power System Relaying. Inglaterra: Research Studies Press Limited, ISBN: 978-0-470-05712-4. 2008.

IEEE standard C37_111_1999. "Revision: Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems". IEEE Transactions on Power Delivery. 1999.

MASON, C. R. The Art and Science, of Protective Relaying. [S.I.]: General Electric, 1956.

MELLO, F. P. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Componentes Simétricas. Santa Maria: Editora UFSM, 1983.

OLESKOVICZ, M. Qualidade da Energia Elétrica. Curso: SEL0409 – Qualidade da Energia Elétrica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PEXTRON COMPONENTES ELETRÔNICOS. Disponível em: <<http://www.pextron.com.br/paginas/popups/produtos/urp2000/index.html>>. Acesso em: 28 out. 2008.

ROSA, F. C. D. L. Harmonics and Power Systems. EUA: Taylor & Francis Group. ISBN 0-8493-3016-5. 2006

SIEMENS. SIPROTEC 4 7SJ64 - Multifunction Protection Relay with synchronization. Alemanha: SIEMENS SIP. 2008.

SILVA, M. Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003

STEVENSON JR., W. D. Elementos de Análise de Sistemas de Potência, McGraw-Hill. 1986.

TAV 2 – TOPOLOGIAS DE REDE. Disponível em: <<http://www2.dem.inpe.br/ulisses/estudos/adm-redes/topologias.htm>>. Acesso em: 28 out. 2008

VERSCHOORE, J. Protection des installations industrielles et tertiaires. França: Merlin Gerin. 1986.

9. Bibliografia

ADAMSON, C. B. Economic and Reliability Advantages When Applying Modern Microprocessor Based Protection Technologies to New or Existing Power Systems. Califórnia: Southern California Edison (SCE), 2005.

ALSTON. High Voltage Technology. Inglaterra: Alston. 1968.

BLACKBURN, J. L. Applied Protective Relaying. Flórida: Westinghouse Electric Corporation, 1982.

BOSSI, A. e SESTO, E. Instalações Elétricas. São Paulo: Editora Hemus, ISBN 85-2890-117-3.1978.

CEMIG. Filosofia da Proteção. Belo Horizonte: CEMIG, 1987.

CEMIG. Relé de Sobrecorrente a Disco de Indução. Belo Horizonte: CEMIG, 1990.

CEMIG. TC para Serviço de Proteção. Belo Horizonte: CEMIG, 1993.

CEMIG. Transformador de Potencial. Belo Horizonte: CEMIG, 1995.

COLOMBO, Roberto. Disjuntores de Alta Tensão. São Paulo: Editora Nobel, ISBN 85-2130-381-5. 1986.

D´AJUZ, Ary. Equipamentos Elétricos; Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão. Rio de Janeiro; Furnas, 1985.

EC&M. What to know about protective relays. 1995. Disponível em: <http://ecmweb.com/mag/electric_know_protective_relays/>. Acesso em: 28 out. 2008

FILHO, João Mamede. Instalações Elétricas Industriais. Rio de Janeiro: Editora LTC. 2001.

G.E.C. Protective Relays Application Guide. Inglaterra: GEC Measurements. 1982.

GE SUPPLY BRASIL. Disponível em: <<http://www.gesupply.com.br/default.asp?resolucao=1280X800>>. Acesso em: 28 out. 2008

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. e SCHMIDT, H. P. Introdução a Sistemas Elétricos de Potência. São Paulo: Editora Edgard Blücher. 1996.

KINDERMANN, G. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. UFSC – EEL – Labpian. Florianópolis, SC. 1999.

ROEPER, Richard. Correntes de Curto-Circuito em Redes Trifásicas. São Paulo: Editora Nobel. ISBN 85-2130-666-0. 1990.

THEMAG. Proteção dos Sistemas Elétricos. São Paulo:Themag, 1977.

WARRINGTON, A. R. VAN C. Protective Relays, Their Theory and Practice. Londres: Editora Chapman & Hall Ltd. ISBN 04-1209-006-0. 1962.

A. Anexo I – Curvas de Tempo Inverso para Proteção de Sobrecorrente

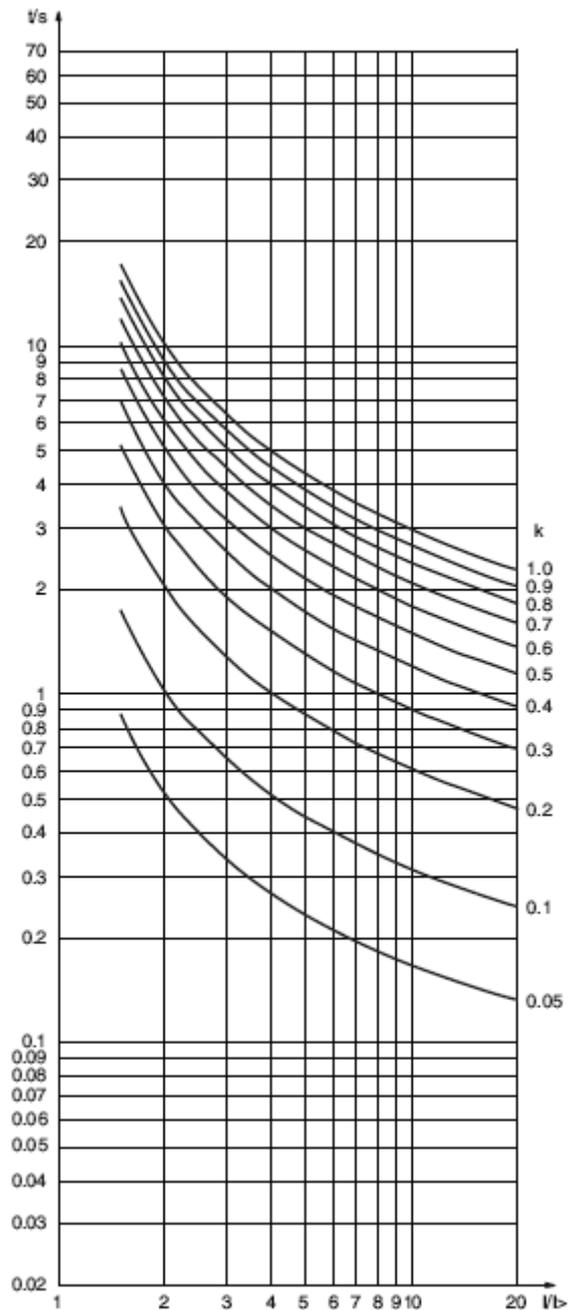


Figura 36 - Curva IEC Normal Inversa
(ABB, 2004)

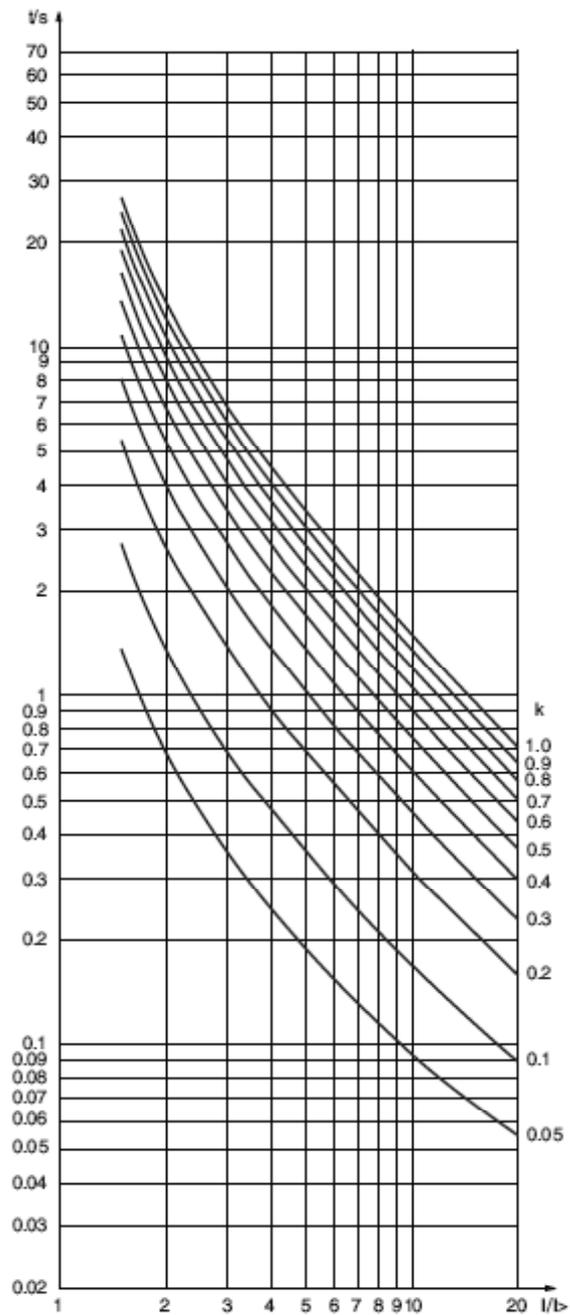


Figura 37 - Curva IEC Muito Inversa
(ABB, 2004)

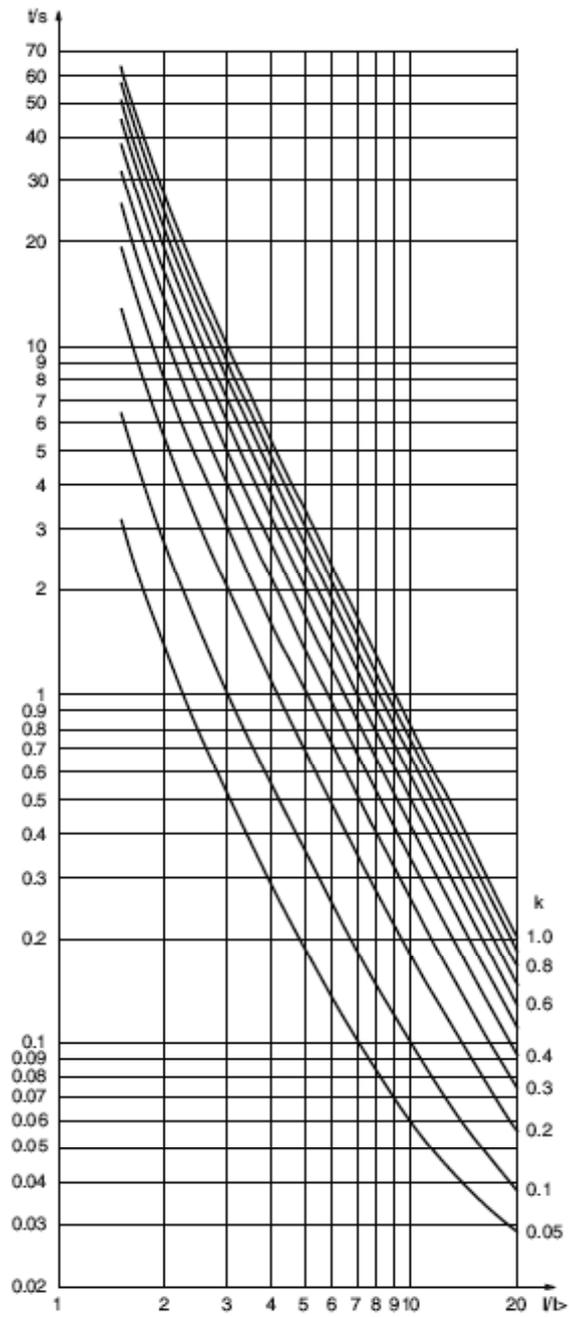


Figura 38 - Curva IEC Extremamente Inversa
(ABB, 2004)

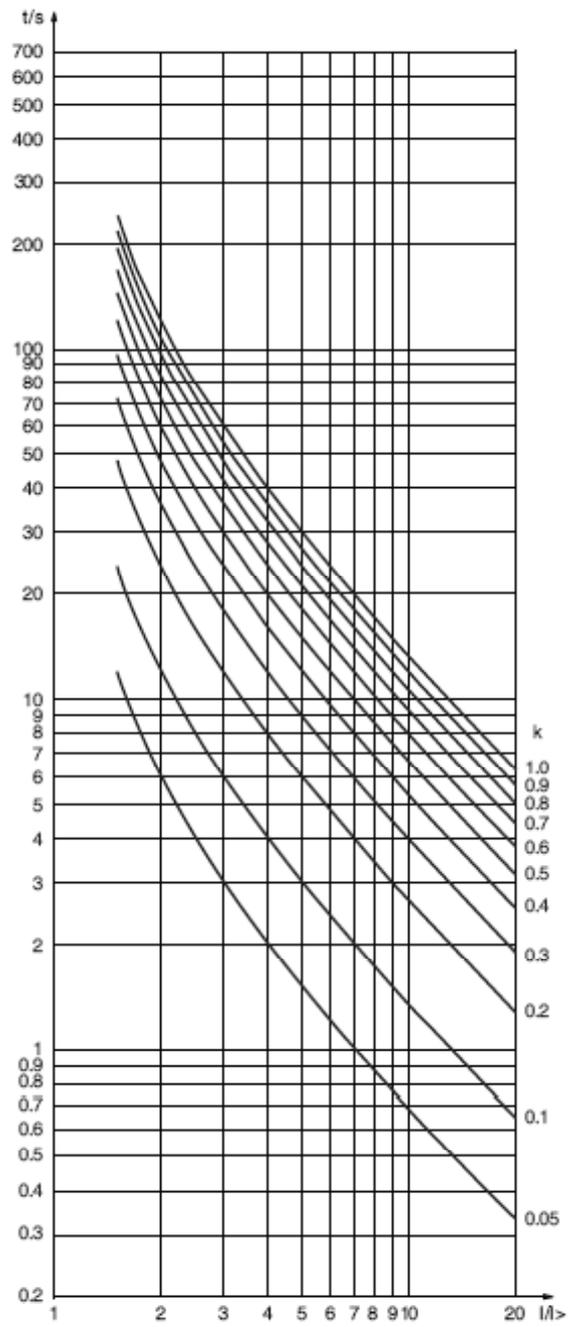


Figura 39 - Curva IEC Inversa de Tempo Longo
(ABB, 2004)

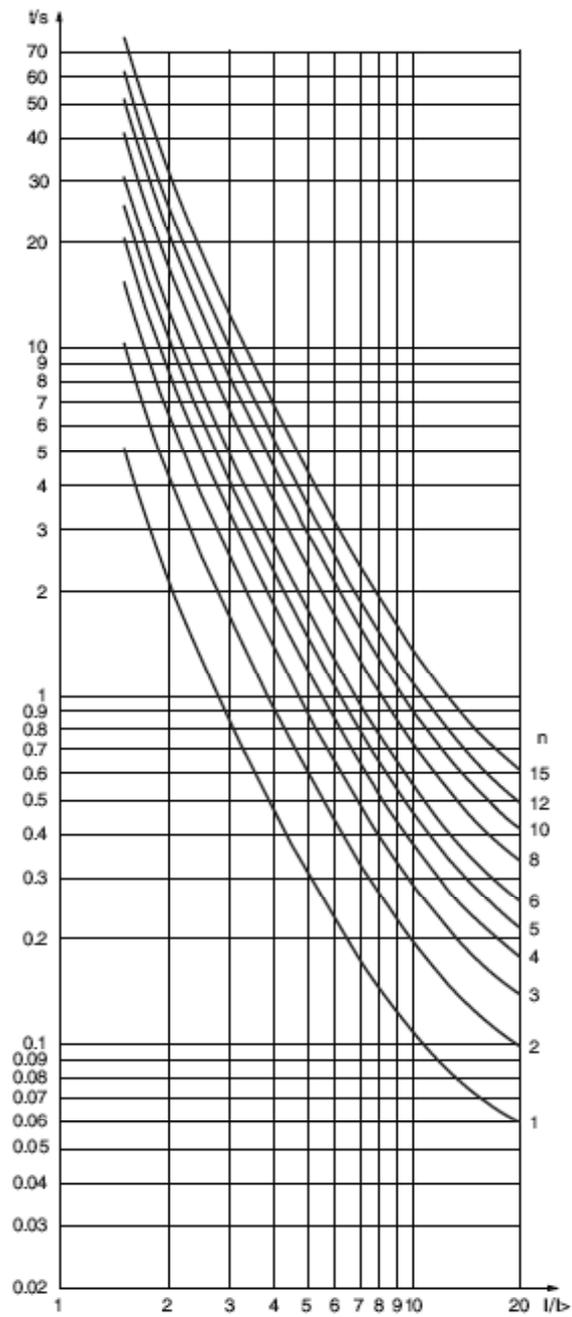


Figura 40 - Curva ANSI Extremamente Inversa
(ABB, 2004)

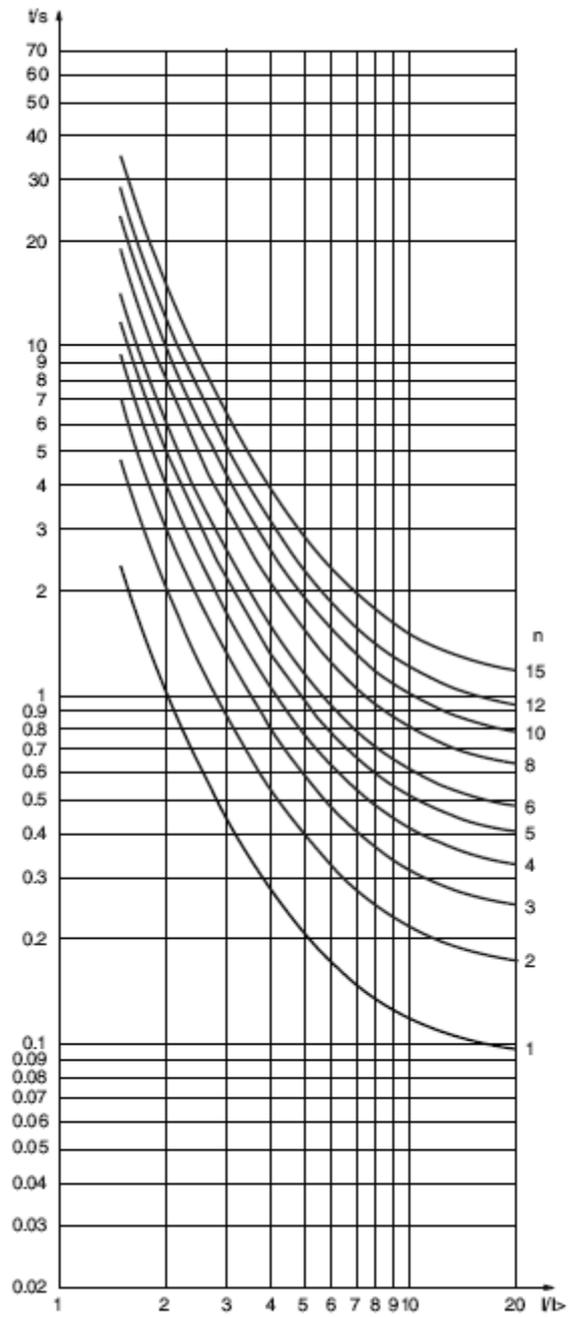


Figura 41 - Curva ANSI Muito Inversa
(ABB, 2004)

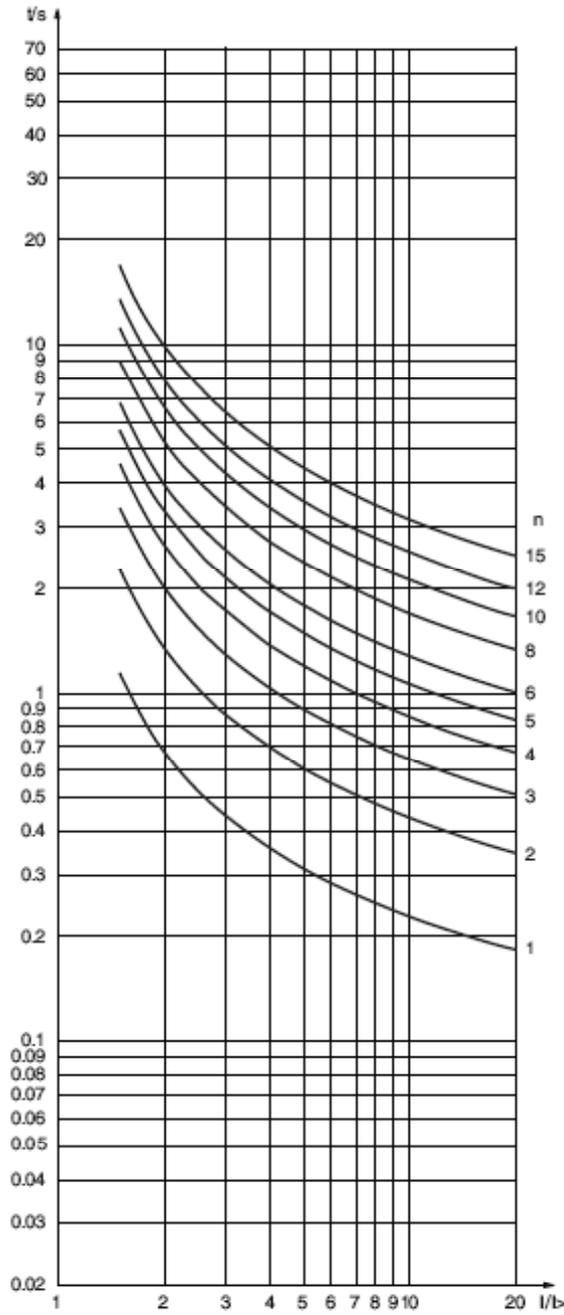


Figura 42 - Curva ANSI Inversa
(ABB, 2004)

B. Anexo II – Código-Fonte do Programa ATP

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C $PREFIX,C:\ATPDRAW\LIB\
C $SUFFIX, .LIB
C $DUMMY, XYZ000
C Miscellaneous Data Card ....
C POWER FREQUENCY          6.0E+01
  1.3E-04 5.0E-01
    1    1    1    1    1          1
C    1    2    3    4    5    6    7    8
C
3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456
7890
/BRANCH
C *****
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C Impedancia equivalente do Sistema referida em 138 kV.
51FONTA ATA1          3.563 949.013
52FONTB ATB1          1.197 418.133
53FONTC ATC1
C
C IMPEDÂNCIAS DAS LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C Impedancia do trecho entre a SE e os trafos 1 e 2 (T12)
51SEA T12A           .183 1.321
52SEB T12B           .045 .35
53SEC T12C
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C Impedancia do trecho entre os trafos T12 e trecho CH1
51T12A CH1A2         .0747 .538
52T12B CH1B2         .018 .143

```

53T12C CH1C2

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C Impedancia do trecho CH1 e o trafo 3 (T3)

51CH1A T3A1 .0677 0.488

52CH1B T3B1 .017 .130

53CH1C T3C1

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C Impedancia do trecho entre o trafo T3 e o trafo particular 1 (TP1)

51T3A1 TP1A .0942 0.679

52T3B1 TP1B .023 0.180

53T3C1 TP1C

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C Impedancia do trecho entre o trafo TP1 e CH3

51TP1A CH3A2 .149 1.08

52TP1B CH3B2 .037 0.286

53TP1C CH3C2

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C Impedancia do trecho entre o BC3 e os trafos 4, 5, 6 e 7 (T45)

51CH3A T45A .0785 0.568

52CH3B T45B .019 0.149

53CH3C T45C

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C Impedancia do trecho entre os trafos T45 E o trafo particular 2 (TP2)

51T45A TP2A .092 0.663

52T45B TP2B .023 0.178

53T45C TP2C

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C Impedancia do trecho entre o trafo TP2 e o trafo 13 (T13)

51TP2A T13A3 .0379 0.273

52TP2B T13B3 .009 0.072

53TP2C T13C3

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C Impedancia do trecho entre o trafo T13 e os trafos 8, 9 e 10 (T89)

51T13A1 T89A .113 0.817

52T13B1 T89B .028 0.215

53T13C1 T89C

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C Impedancia do trecho entre os trafos T89 e o trafo particular 3 (TP3)

51T89A TP3A .027 0.195

52T89B TP3B .007 0.050

53T89C TP3C

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C Impedancia do trecho entre os trafos T89 e os trafos 11, 12 e 14 (T11)

51T89A T11A .100 0.407

52T89B T11B .060 0.119

53T89C T11C

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C Impedancia do trecho entre os trafos T11 e o trafo particular 4 (TP4)

51T11A TP4A3 .100 0.407

52T11B TP4B3 .060 0.119

53T11C TP4C3

C

C *****

C BANCOS DE CAPACITORES

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C BANCO DE CAPACIORES 1 - BC1

C BC1A

BC1A NEUT1	16.71	0
------------	-------	---

C BC1B

BC1B NEUT1	16.71	0
------------	-------	---

C BC1C

BC1C NEUT1	16.71	0
------------	-------	---

C Resistencia infinita para terra - BC1

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
 NEUT1 1.0E+6

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C BANCO DE CAPACIORES 2 - BC2

C

C BC2A

BC2A NEUT2 8.36 0

C BC2B

BC2B NEUT2 8.36 0

C BC2C

BC2C NEUT2 8.36 0

C Resistencia infinita para terra - BC2

NEUT2 1.00E6 0

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C BANCO DE CAPACIORES 3 - BC3

C

C BC3A

BC3A NEUT3 8.36 0

C BC3B

BC3B NEUT3 8.36 0

C BC3C

BC3C NEUT3 8.36 0

C

C Resistencia infinita para terra - BC3

NEUT3 1.00E6 0

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

NEUT4 1.0 0

NEUT5 1.0 0

NEUT6 1.0 0

NEUT7 1.0 0

C

C *****

C CONJUNTOS DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C CONJ. DE TRAFOS 1 E 2

C

T12A	2514. 2100.	0
T12B	2514. 2100.	0
T12C	2514. 2100.	0

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C CONJ. DE TRAFOS 4, 5, 6 E 7

C

T45A	1137. 949.7	0
T45B	1137. 949.7	0
T45C	1137. 949.7	0

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C CONJ. DE TRAFOS 8, 9, E 10

C

T89A	3132. 2616.	0
T89B	3132. 2616.	0
T89C	3132. 2616.	0

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C CONJ. DE TRAFOS 11, 12 E 14

C

T11A	1500. 1253.	0
T11B	1500. 1253.	0
T11C	1500. 1253.	0

C

C CARGAS NOS SECUNDÁRIOS DOS TRAFOS MODELADOS

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFOS DE DISTRIBUIÇÃO 3 (AMARELO)

T3A2	1.44261.2050	0
T3B2	1.44261.2050	0
T3C2	1.44261.2050	0

C

C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFOS DE DISTRIBUIÇÃO 13 (AMARELO)

T13A2	2.42972.0310	0
T13B2	2.42972.0310	0

T13C2	2.42972.0310	0
-------	--------------	---

C

C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFÓ PARTICULAR DE DISTRIBUIÇÃO 4 (VERDE)

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

TP4A2	0.15900.1800	0
TP4B2	0.15900.1800	0
TP4C2	0.15900.1800	0
TP4A2	3343	0
TP4B2	3343	0
TP4C2	3343	0

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C RESISTÊNCIA DE FALTA SEA/B/C1 E TERRA

SEA1	0.5	0
SEB1	0.5	0
SEC1	0.5	0

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C RESISTÊNCIA DE FALTA CH1A/B/C1 E TERRA

CH1A1	1.0	0
CH1B1	1.0	0
CH1C1	1.0	0

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C RESISTÊNCIA DE FALTA CH3A/B/C1 E TERRA

CH3A1	0.1	0
CH3B1	0.1	0
CH3C1	0.1	0

C *****

C RESISTENCIAS DE FALTA na entrada TP4

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

RFTA	40.000
RFTB	40.000
RFTC	40.000

C

C *****

C CONJUNTOS DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO PARTICULARES

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C TRAFOS PARTICULAR 1 (03 trafos)

C

TP1A	45.81 107.2	0
TP1B	45.81 107.2	0
TP1C	45.81 107.2	0
TP1A	15.00	0
TP1B	15.00	0
TP1C	15.00	0

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C TRAFOS PARTICULAR 2 (04 trafos)

C

TP2A	71.58 167.4	0
TP2B	71.58 167.4	0
TP2C	71.58 167.4	0
TP2A	10.00	0
TP2B	10.00	0
TP2C	10.00	0

C

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C TRAFOS PARTICULAR 3 (02 trafos)

C

TP3A	251.2 587.5	0
TP3B	251.2 587.5	0
TP3C	251.2 587.5	0
TP3A	3.00	0
TP3B	3.00	0
TP3C	3.00	0

C

C TRANSFORMADOR DA SUBESTAÇÃO

C

C TRANSFORMADOR DA SE - 138/13.68 kV - 25 MVA

C 345678901234567890123456789012345678901234567890

C < > < > < > < >

TRANSFORMER 3.019326.899TSUB1 63000. 0
 3.04585138E+00 2.66654561E+01
 7.68117963E+00 2.96282846E+01
 1.57373247E+01 3.25911130E+01
 1.63732353E+04 3.85167699E+01
 9999
 1BTA2 NEUT4 .01751.51377.8981
 2ATA1 ATB1 1.7462151.37 138.
 TRANSFORMER TSUB1 TSUB2
 1BTB2 NEUT4
 2ATB1 ATC1
 TRANSFORMER TSUB1 TSUB3
 1BTC2 NEUT4
 2ATC1 ATA1
 C
 C TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO
 C
 C MODELAGEM NOVA DO TRAF0 DE DISTR. 3 (AMARELO)
 C TRAF0 DE DISTRIBUICAO DE 45 KVA - 13.2/0.22 kV
 C 345678901234567890123456789012345678901234567890
 C < > < > < > < >
 TRANSFORMER 0.016435.712T3A 63000. 0
 1.639800000E-02 3.571255000E+01
 3.999200000E-02 4.017662000E+01
 6.952500000E-02 4.464069000E+01
 8.870100000E-02 4.687272000E+01
 1.122290000E-01 4.910476000E+01
 1.393680000E-01 5.133680000E+01
 1.746230000E-01 5.356883000E+01
 2.149780000E-01 5.580087000E+01
 2.610490000E-01 5.803290000E+01
 3.125260000E-01 6.026493000E+01
 3.742520000E-01 6.249697000E+01
 9999
 C 345678901234567890123456789012345678901234567890
 1T3A1 T3B1 81.819143.53 13.2
 2T3A2 NEUT5 .0093 .0163 .127

TRANSFORMER T3A T3B
 1T3B1 T3C1
 2T3B2 NEUT5

TRANSFORMER T3A T3C
 1T3C1 T3A1
 2T3C2 NEUT5

C

C MODELAGEM NOVA DO TRAF0 DE DISTR. 13 (AMARELO)

C TRAF0 DE DISTRIBUICAO DE 45 kVA - 13.2/0.22 kV

C 345678901234567890123456789012345678901234567890

C < > < >< >< >< >

TRANSFORMER .016435.712T13A 63000.

C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

1.639800000E-02 3.571255000E+01

3.999200000E-02 4.017662000E+01

6.952500000E-02 4.464069000E+01

8.870100000E-02 4.687272000E+01

1.122290000E-01 4.910476000E+01

1.393680000E-01 5.133680000E+01

1.746230000E-01 5.356883000E+01

2.149780000E-01 5.580087000E+01

2.610490000E-01 5.803290000E+01

3.125260000E-01 6.026493000E+01

3.742520000E-01 6.249697000E+01

9999

1T13A1 T13B1 81.819143.53 13.2

2T13A2 NEUT6 .0093 .0163 .127

TRANSFORMER T13A T13B

1T13B1 T13C1

2T13B2 NEUT6

TRANSFORMER T13A T13C

1T13C1 T13A1

2T13C2 NEUT6

C

C MODELAGEM NOVA DO TRAF0 DE DISTR. 4 (VERDE)

C TRAF0 DE DISTRIBUICAO DE 45 kVA - 13.2/0.22 kV

C 345678901234567890123456789012345678901234567890

C < > < >< >< >< >

TRANSFORMER .016435.712T4A 63000.

C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

1.639800000E-02 3.571255000E+01

3.999200000E-02 4.017662000E+01

6.952500000E-02 4.464069000E+01

8.870100000E-02 4.687272000E+01

1.122290000E-01 4.910476000E+01

1.393680000E-01 5.133680000E+01

1.746230000E-01 5.356883000E+01

2.149780000E-01 5.580087000E+01

2.610490000E-01 5.803290000E+01

3.125260000E-01 6.026493000E+01

3.742520000E-01 6.249697000E+01

9999

1TP4A1 TP4B1 81.819143.53 13.2

2TP4A4 NEUT7 .0093 .0163 .127

TRANSFORMER T4A T4B

1TP4B1 TP4C1

2TP4B4 NEUT7

TRANSFORMER T4A T4C

1TP4C1 TP4A1

2TP4C4 NEUT7

C

C *****

/SWITCH

C

C CHAVES PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

C

C CHAVE (DISJUNTORES) DO ALIMENTADOR

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >

BTA2 SEA -1.00E+00 1.000E+01 0.000E+00 0

BTB2 SEB -1.00E+00 1.000E+01 0.000E+00 0

BTC2 SEC -1.00E+00 1.000E+01 0.000E+00 0

C

C CHAVE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS EM CH1

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >

CH1A2 CH1A	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
CH1B2 CH1B	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
CH1C2 CH1C	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
C				
C CHAVE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS EM CH3				
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< le ><Vf/CLOP >< type >				
CH3A2 CH3A	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
CH3B2 CH3B	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
CH3C2 CH3C	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
C				
C CHAVE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS EM T13				
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< le ><Vf/CLOP >< type >				
T13A3 T13A1	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
T13B3 T13B1	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
T13C3 T13C1	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
C				
C CHAVE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS EM TP4 (PRIMÁRIO)				
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< le ><Vf/CLOP >< type >				
TP4A3 TP4A1	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	1
TP4B3 TP4B1	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	1
TP4C3 TP4C1	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	1
C				
C CHAVE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS EM TP4 (SECUNDÁRIO)				
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< le ><Vf/CLOP >< type >				
TP4A4 TP4A2	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
TP4B4 TP4B2	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
TP4C4 TP4C2	-1.00E+00	1.000E+01	0.000E+00	0
C				
C CHAVES DE COMANDO DOS BANCOS DE CAPACITORES				
C				
C CHAVE DE COMANDO BC1				
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< le ><Vf/CLOP >< type >				
CH1A BC1A	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	0
CH1B BC1B	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	0
CH1C BC1C	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	0
C				
C CHAVE DE COMANDO BC2				

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >

CH1A	BC2A	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	0
CH1B	BC2B	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	0
CH1C	BC2C	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	0

C

C CHAVE DE COMANDO BC3

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >

CH3A	BC3A	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	0
CH3B	BC3B	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	0
CH3C	BC3C	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	0

C

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >

C CHAVE DE FALTA EM TP4X4 - Entrada do TRAPO TP4 - Fase Terra - R 0 ohms

TP4A4		1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	1
TP4B4		1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	1
TP4C4		1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	1

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >

C CHAVE DE FALTA EM TP4X4 - Entrada do TRAPO TP4 - Fase Terra - 40 ohms

TP4A4	RFTA	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	1
TP4B4	RFTB	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	1
TP4C4	RFTC	1.000E+01	1.000E+01	0.000E+00	1

C

C *****

/SOURCE

C

C FONTE EQUIVALENTE DO SISTEMA de 138 kV.

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

14FONTA	0	112676.53	60.		-1.	2.
14FONTB	0	112676.53	60.	-120.	-1.	2.
14FONTC	0	112676.53	60.	120.	-1.	2.

C

C BLOCO DE REPRESENTAÇÃO DAS CARGAS NÃO-LINEARES

C

C FONTE DE CORRENTE (3a HARMÔNICA).

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

14TP4A2	-1	181.29	180		0.00000	2.
14TP4B2	-1	181.29	180	-120.	0.00000	2.

14TP4C2 -1 181.29 180 120. 0.00000 2.

C

C FONTE DE CORRENTE (5a HARMÔNICA).

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

14TP4A2 -1 240.03 300 0.00000 2.

14TP4B2 -1 240.03 300 -120. 0.00000 2.

14TP4C2 -1 240.03 300 120. 0.00000 2.

C

C FONTE DE CORRENTE (7a HARMÔNICA).

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

14TP4A2 -1 167.31 420 0.00000 2.

14TP4B2 -1 167.31 420 -120. 0.00000 2.

14TP4C2 -1 167.31 420 120. 0.00000 2.

C

C FONTE DE CORRENTE (9a HARMÔNICA).

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

14TP4A2 -1 83.44 540 0.00000 2.

14TP4B2 -1 83.44 540 -120. 0.00000 2.

14TP4C2 -1 83.44 540 120. 0.00000 2.

C

C FONTE DE CORRENTE (11a HARMÔNICA).

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

14TP4A2 -1 116.38 660 0.00000 2.

14TP4B2 -1 116.38 660 -120. 0.00000 2.

14TP4C2 -1 116.38 660 120. 0.00000 2.

C

C FONTE DE CORRENTE (13a HARMÔNICA).

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

14TP4A2 -1 77.16 780 0.00000 2.

14TP4B2 -1 77.16 780 -120. 0.00000 2.

14TP4C2 -1 77.16 780 120. 0.00000 2.

C

C FONTE DE CORRENTE (15a HARMÔNICA).

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

14TP4A2 -1 18.91 900 0.00000 2.

14TP4B2 -1 18.91 900 -120. 0.00000 2.

14TP4C2 -1 18.91 900 120. 0.00000 2.

C

C FONTE DE CORRENTE (17a HARMÔNICA).

C < n 1><><	Ampl. ><	Freq. ><	Phase/T0><	A1 ><	T1 ><	TSTART ><	TSTOP >
14TP4A2 -1	30.59	1020			0.00000	2.	
14TP4B2 -1	30.59	1020	-120.		0.00000	2.	
14TP4C2 -1	30.59	1020	120.		0.00000	2.	

C

C FONTE DE CORRENTE (19a HARMÔNICA).

C < n 1><><	Ampl. ><	Freq. ><	Phase/T0><	A1 ><	T1 ><	TSTART ><	TSTOP >
14TP4A2 -1	27.63	1140			0.00000	2.	
14TP4B2 -1	27.63	1140	-120.		0.00000	2.	
14TP4C2 -1	27.63	1140	120.		0.00000	2.	

C

C FONTE DE CORRENTE (21a HARMÔNICA).

C < n 1><><	Ampl. ><	Freq. ><	Phase/T0><	A1 ><	T1 ><	TSTART ><	TSTOP >
14TP4A2 -1	15.96	1260			0.00000	2.	
14TP4B2 -1	15.96	1260	-120.		0.00000	2.	
14TP4C2 -1	15.96	1260	120.		0.00000	2.	

C

C FONTE DE CORRENTE (23a HARMÔNICA).

C < n 1><><	Ampl. ><	Freq. ><	Phase/T0><	A1 ><	T1 ><	TSTART ><	TSTOP >
14TP4A2 -1	29.01	1380			0.00000	2.	
14TP4B2 -1	29.01	1380	-120.		0.00000	2.	
14TP4C2 -1	29.01	1380	120.		0.00000	2.	

C

C FONTE DE CORRENTE (25a HARMÔNICA).

C < n 1><><	Ampl. ><	Freq. ><	Phase/T0><	A1 ><	T1 ><	TSTART ><	TSTOP >
14TP4A2 -1	26.14	1500			0.00000	2.	
14TP4B2 -1	26.14	1500	-120.		0.00000	2.	
14TP4C2 -1	26.14	1500	120.		0.00000	2.	

C

C

C

BLANK BRANCH

BLANK SWITCH

BLANK SOURCE

C *****

C < >< >< >< >< >< >< >

SEA SEB SEC

BLANK OUTPUT

BLANK PLOT

BEGIN NEW DATA CASE

BLANK

C. Anexo III – Formas de Onda dos Casos Simulados no Software ATP

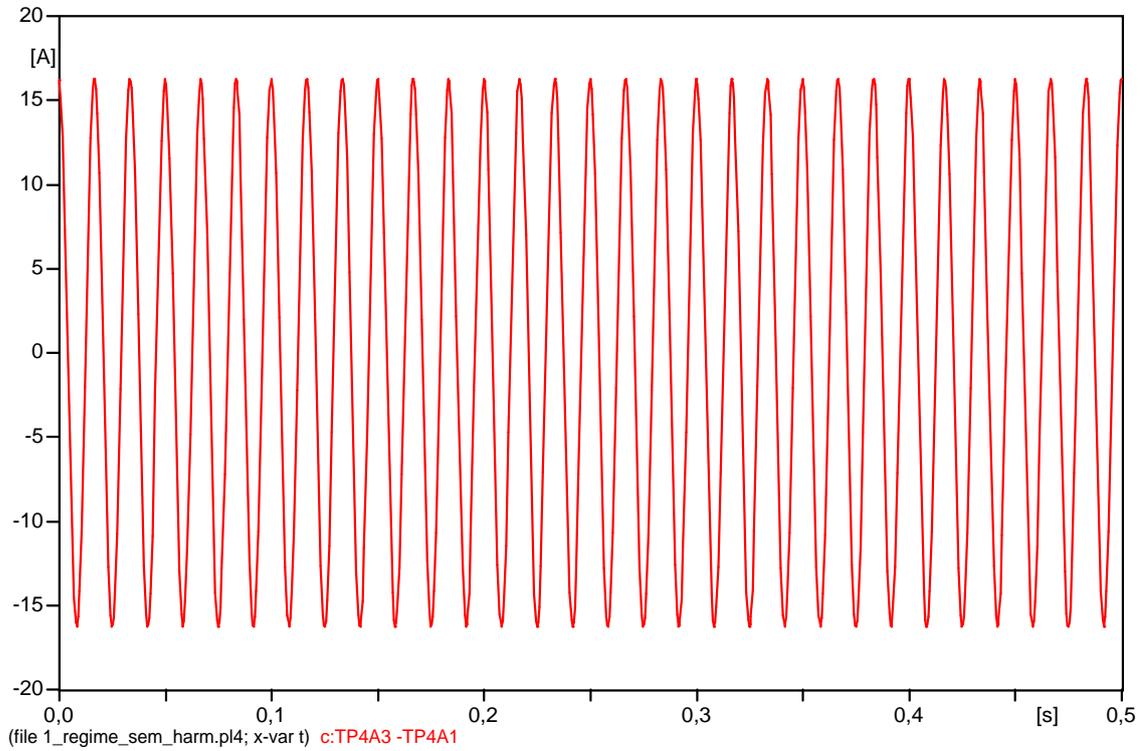


Figura 43 - Situação de regime, sem a presença de harmônicas

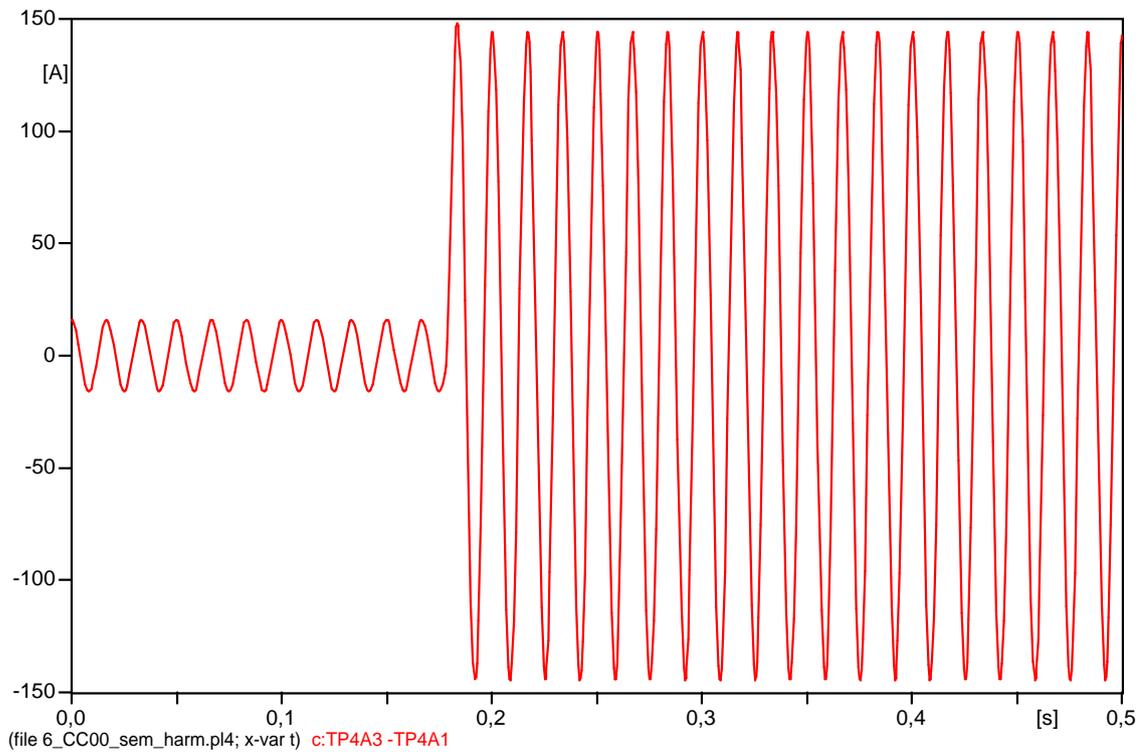


Figura 44 - Situação de falta trifásica (00, 0°), sem a presença de harmônicas

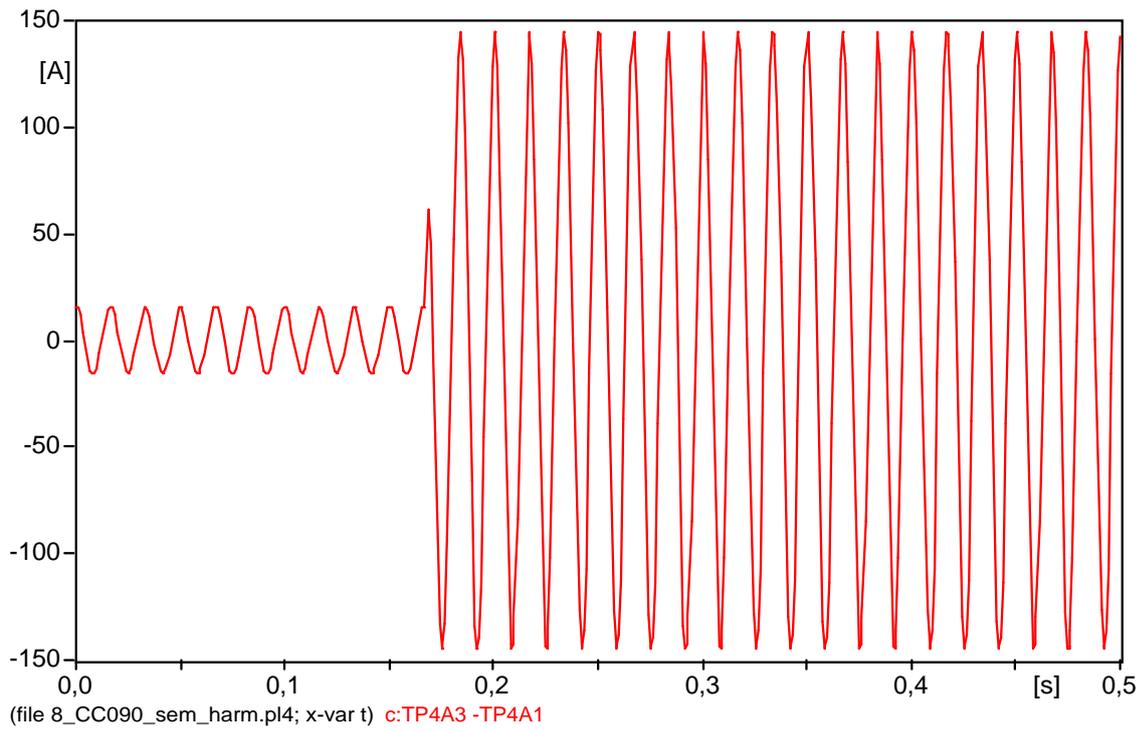


Figura 45 - Situação de falta trifásica (00, 90°), sem a presença de harmônicas

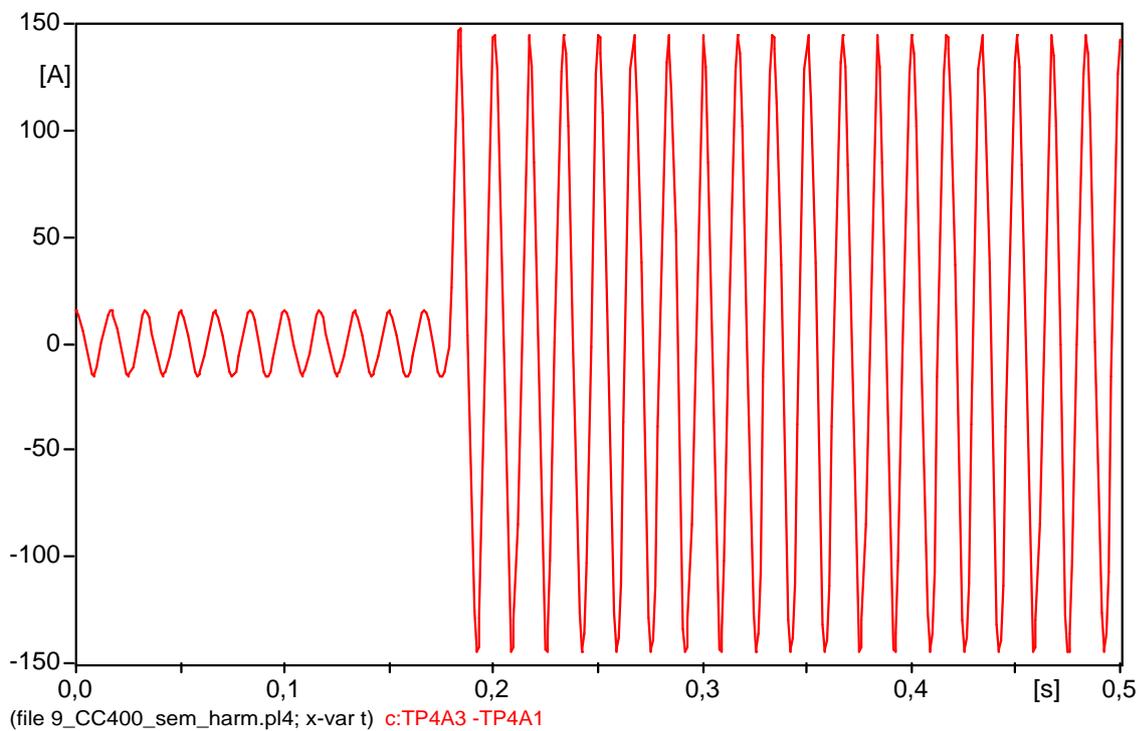


Figura 46 - Situação de falta trifásica (400, 0°), sem a presença de harmônicas

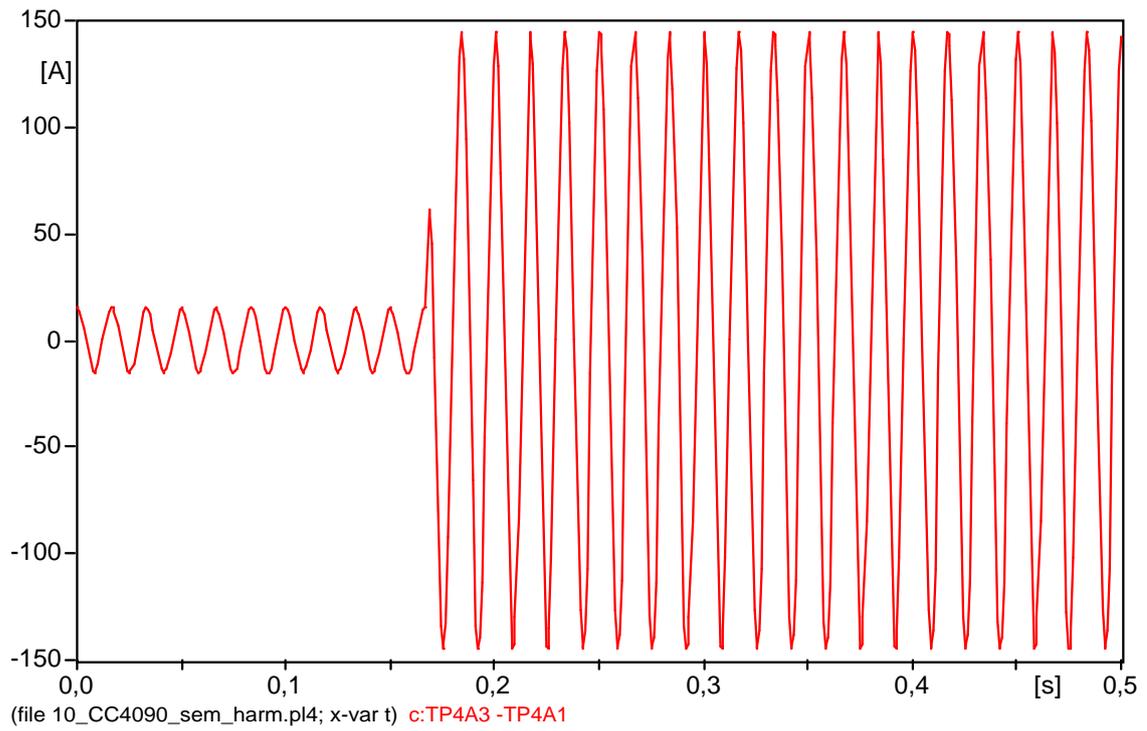


Figura 47 - Situação de falta trifásica (400, 90°), sem a presença de harmônicas

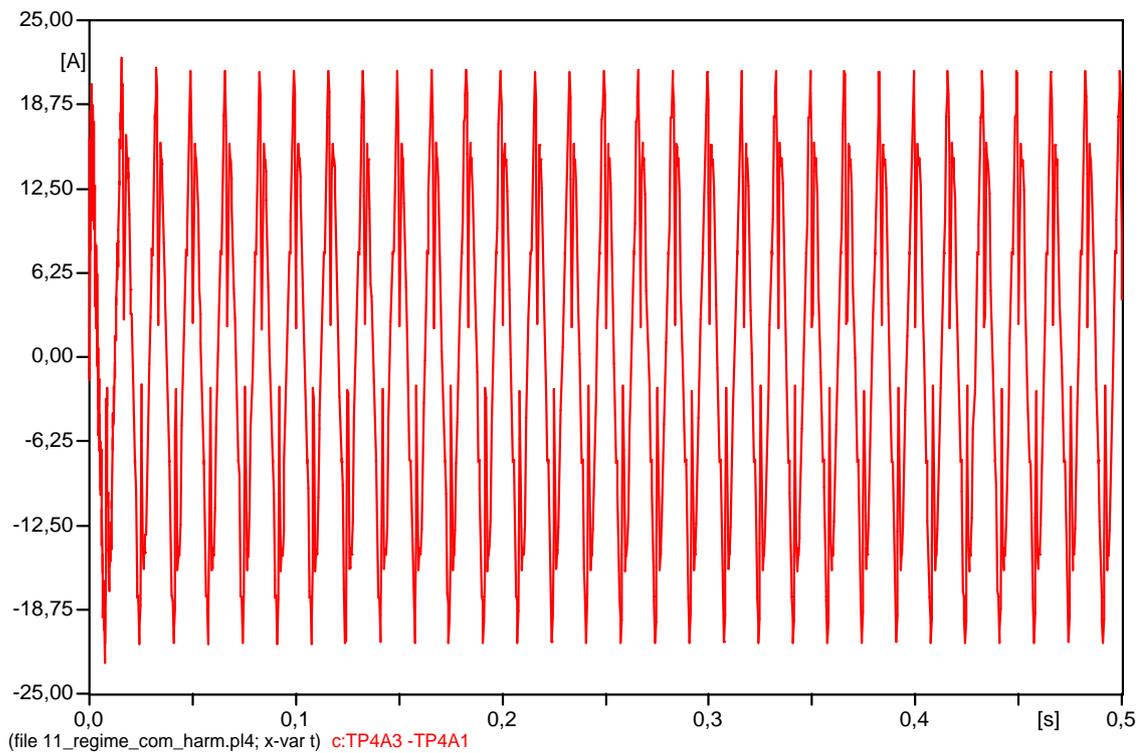


Figura 48 - Situação de regime, com a presença de harmônicas

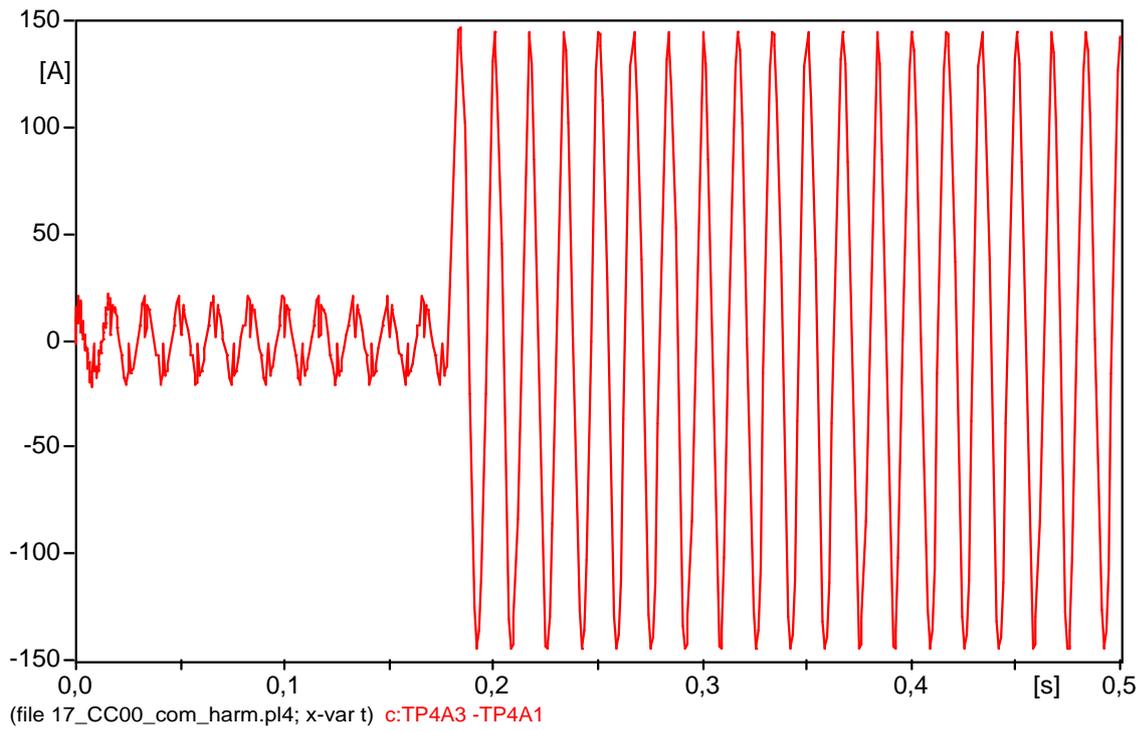


Figura 49 - Situação de falta trifásica (00, 0°), com a presença de harmônicas

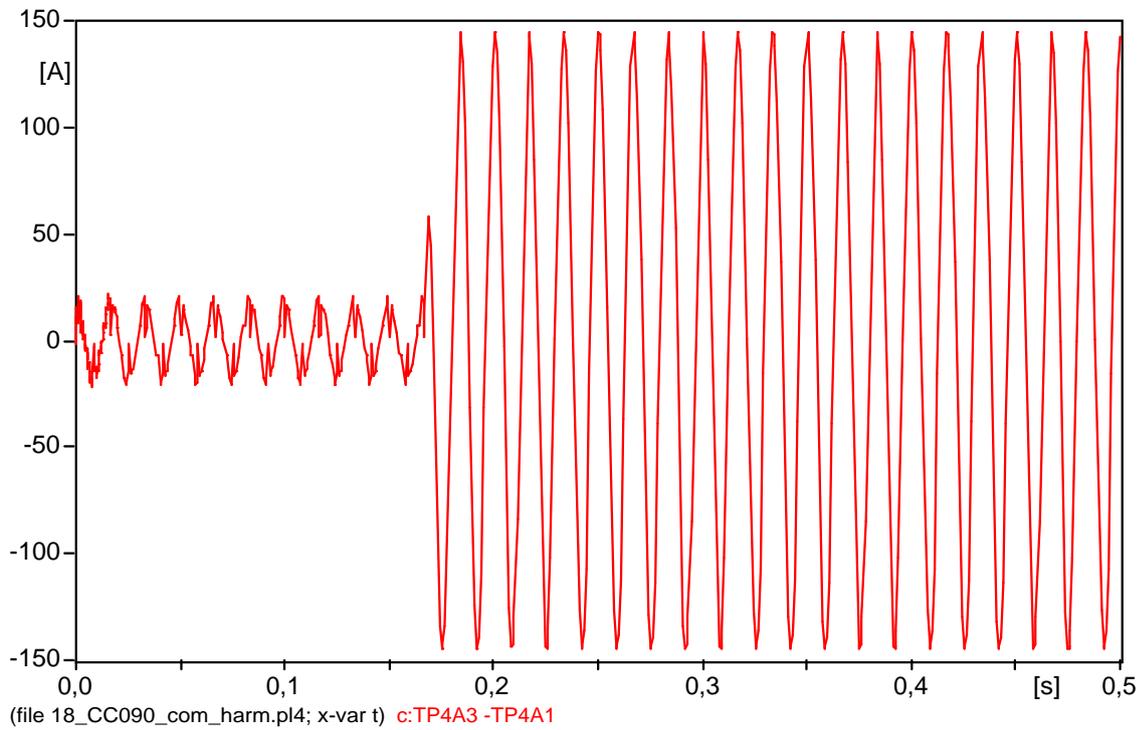


Figura 50 - Situação de falta trifásica (00, 90°), com a presença de harmônicas

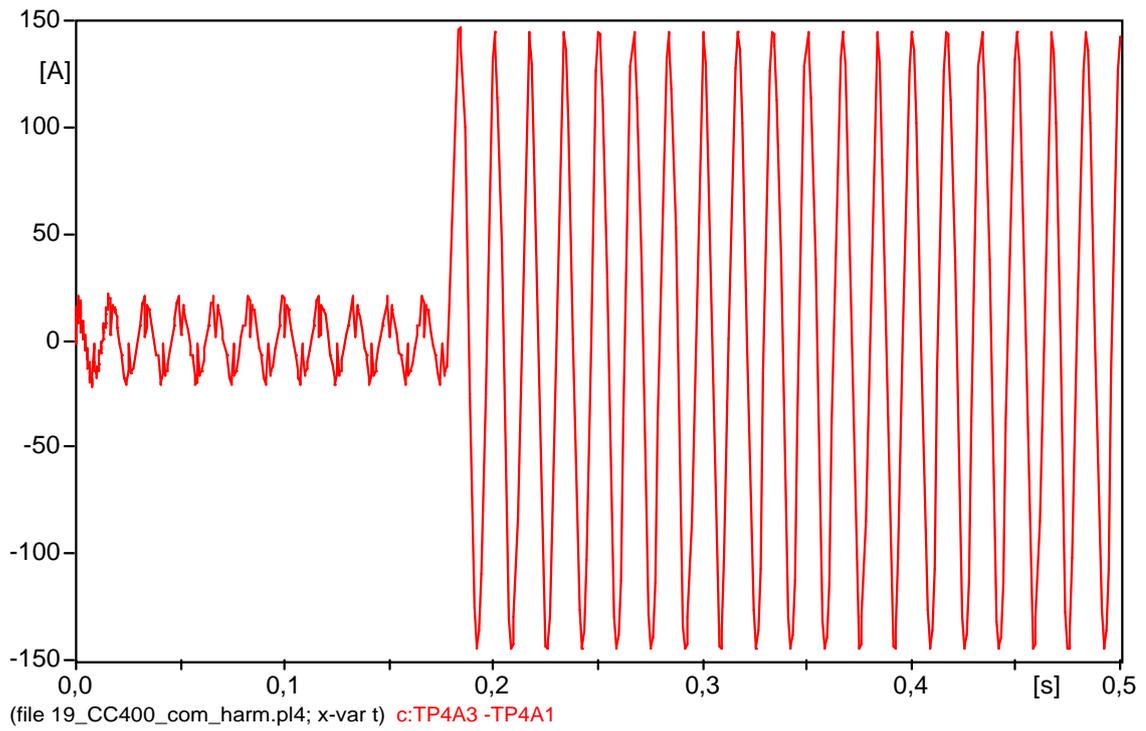


Figura 51 - Situação de falta trifásica ($400, 0^\circ$), com a presença de harmônicas

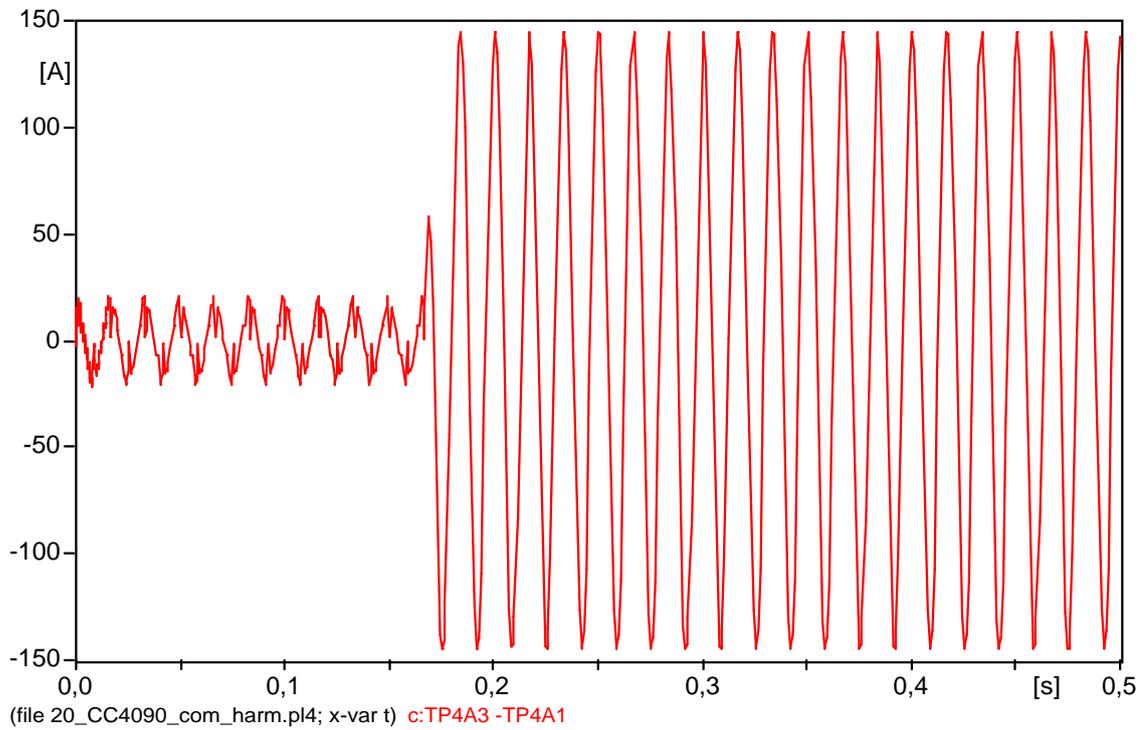


Figura 52 - Situação de falta trifásica ($400, 90^\circ$), com a presença de harmônicas