



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica



JESSIEDNA ARAÚJO DE SÁ

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UMA FUNÇÃO DE PROTEÇÃO
CONSIDERANDO EFEITOS DE ERROS NA REDE DE COMUNICAÇÃO
ENTRE EQUIPAMENTOS**

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2011

JESSIEDNA ARAÚJO DE SÁ

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UMA FUNÇÃO DE PROTEÇÃO
CONSIDERANDO EFEITOS DE ERROS NA REDE DE COMUNICAÇÃO
ENTRE EQUIPAMENTOS**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Orientador:

Professor Dr. Edmar Candeia Gurjão

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2011

JESSIEDNA ARAÚJO DE SÁ

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UMA FUNÇÃO DE PROTEÇÃO
CONSIDERANDO EFEITOS DE ERROS NA REDE DE COMUNICAÇÃO
ENTRE EQUIPAMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Aprovado em ____ / ____ / ____

Jessiedna Araújo de Sá
Estudante de Graduação
UFCG

Professor Dr. Edmar Candeia Gurjão
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Professor Convidado
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Dedico este trabalho à minha família, que sempre esteve ao meu lado, ajudando nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida, por todas as minhas habilidades, todas as vitórias que obtive até hoje e que me levaram a conclusão deste trabalho.

A meus pais José Sulpino e Lúcia Araújo e as minhas irmãs sem os quais este momento não teria sentido. É graças aos seus muitos sacrifícios que estamos celebrando esta conquista.

Ao meu noivo Tadeu Farias pelo apoio e compreensão incondicional que em muito me ajudou nos momentos de dificuldade.

Ao orientador Edmar Candeia, que durante a graduação foi em muitos momentos tutor, pai, psicólogo, professor e principalmente, amigo; cuja contribuição para este trabalho, assim como para minha formação é incalculável.

Aos orientadores Núbia Brito, Benemar de Alencar e Edmar Candeia pelo suporte no P&D CHESF, que foi o ponto de partida para este TCC.

Agradeço também a toda minha família e meus maravilhosos amigos, que com todo carinho e apoio, não mediram esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

Aos professores e funcionários do DEE, por exercerem tão bem sua função permitindo-me obter uma excelente formação.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“O sucesso é uma
consequência e não
um objetivo.”*

Gustave Flaubert

RESUMO

Com a Norma IEC 61850, que define a comunicação no interior das subestações via rede, torna-se evidente a necessidade de estudar a interferência dos problemas inerente às redes de computadores nas funções internas e críticas na subestação. O presente relatório descreve um estudo da influência destes atrasos, dado aumento da quantidade de tráfego na rede e eventual perda de pacotes, na resposta da função de proteção de sobrecorrente instantânea. Para tal, serão usados computadores emulando os IEDs e trocando mensagens em uma rede local. Para realizar o experimento, foi executada a implementação de uma função de proteção de sistemas elétricos, no caso, a função de sobrecorrente instantânea; em seguida, em uma rede de computadores, usando três computadores e um switch simulou-se a troca de mensagens entre o TC, o IED e o disjuntor e realizou-se a avaliação do desempenho da função, dado diversos problemas na rede e para várias taxas de mensagens.

Palavras-chave: Sobrecorrente, IEC 61850, atraso de pacotes.

ABSTRACT

Using the IEC 61850, which defines communication within power plant substation via network, it becomes evident the necessity of study the interference of problems inherent to computer networks for critical and internal functions in substation. This report describes a study of the influence of these delays, given an increase in the amount of traffic on the network and any possible packet loss in the response of the instantaneous overcurrent protection function. For such, IEDs will be emulated in computers exchanging messages in a local area network. To perform the experiment, an electrical system protection function was executed, in this case, the instantaneous overcurrent function. Then, in a computer network, using three and a switch, a simulation of the exchange of messages between the TC, IED, and the circuit breaker was performed to evaluate the effectiveness of the function for various network problems and message rates.

Keywords: Overcurrent, IEC 61850, packet delay.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama unifilar de um SEP simples	5
Figura 2 - Subsistemas de proteção (NETTO, 2008).....	8
Figura 3 - Entrada/Saída de um relé	9
Figura 4 - Características funcionais do relé.....	10
Figura 5 - Característica de tempo inverso.....	12
Figura 6 - O conceito de nó lógico e suas conexões (IEC 61850-5)	13
Figura 7 - Função de sobrecorrente decomposta em nós lógicos.....	14
Figura 8 - Representação de um switch.....	16
Figura 9 - Seleção do LN.....	19
Figura 10 - Habilitar o LN TCTR.....	19
Figura 11 - <i>Interface</i> do <i>software</i> para a configuração do TCTR	20
Figura 12 - <i>Interface</i> do <i>software</i> para a configuração do PIOC.....	21
Figura 13 - Processo de janelamento utilizado	22
Figura 14 - Fluxograma da função de sobrecorrente instantânea.....	23
Figura 15 - Mensagem de abertura de disjuntor	23
Figura 16 - <i>Interface</i> do <i>software</i> para a configuração do XCBR	24
Figura 17 - Tela inicial do Wireshark.....	25
Figura 18 - Montagem 01.....	26
Figura 19 - Configuração do PIOC	27
Figura 20 - Configuração do TCTR	28
Figura 21 - Configuração SNTP para Windows.....	29
Figura 22 - Montagem 02.....	30
Figura 23 - Configuração do IPLoad	30
Figura 24 - Gráfico da quantidade de mensagens (capturadas pelo <i>Wireshark</i>) enviadas pelo TCTR em menos 0,6s	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
CC	Curto circuito.
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco.
DEC	Duração de interrupção equivalente por consumidor.
F	<i>Function.</i>
FEC	Frequência de interrupção equivalente por consumidor.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission.</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device .</i>
IP	<i>Internet Protocol.</i>
LAN	<i>Local Area Network.</i>
LAPS	Laboratório de automação e processamento de sinais
LC	<i>Logical connections.</i>
LN	Nó lógico (<i>Logical Node</i>).
NTP	<i>Network Time Protocol.</i>
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento.
PC	<i>Physical connections.</i>
PD	<i>Physical device.</i>
PIOC	Nó lógico da proteção de sobrecorrente instantânea, definido pela IEC 61850.
SEP	Sistema elétrico de potência.
Sntp	<i>Simple Network Time Protocol.</i>
SP	Sistema de proteção.
TC	Transformador de corrente.
TCP	<i>Transmission Control Protocol.</i>
TCTR	Nó lógico do TC, definido pela Norma IEC 61850.
TP	Transformador de potencial.
XCBR	Nó lógico do disjuntor, definido pela Norma IEC 61850.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo Geral.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos.....	2
2. Metodologia.....	3
3. Fundamentação Teórica	4
3.1. Proteção de Sistemas Elétricos.....	4
3.1.1. Importância da Proteção.....	5
3.1.2. Funções de um SP.....	6
3.1.3. Subsistemas de Proteção.....	7
3.1.3.1 Transdutores - TC/TP.....	8
3.1.3.2 Disjuntor.....	8
3.1.3.3 Baterias.....	9
3.1.3.4 Relé.....	9
3.1.4. Função de Proteção de Sobrecorrente.....	11
3.2. Norma IEC 61850.....	12
3.2.1. O conceito de nó lógico.....	13
3.2.2. Função de sobrecorrente instantânea decomposta em LN.....	14
3.3. Redes de computadores.....	15
3.3.1. Protocolo TCP/IP.....	16
3.3.2. Atraso de pacotes.....	17
3.3.2.1 Atraso de processamento.....	18
3.3.2.2 Atraso de fila.....	18
3.3.2.3 Atraso de transmissão.....	18
3.3.2.4 Atraso de propagação.....	18
4. Software Desenvolvido	19
4.1. TCTR.....	19
4.2. PIOC.....	21
4.3. XCBR.....	23

5. Descrição dos experimentos	25
5.1. Montagem 01	26
5.2. Montagem 02	28
5.3. Montagem 03	30
6. Análise dos resultados.....	32
7. Considerações finais.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
ANEXO A - O algoritmo de Fourier de um ciclo.....	37

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda pelo fornecimento contínuo e confiável de energia elétrica, acrescentada a um sistema elétrico complexo e a regulamentação do setor vem contribuindo para que o mercado de energia torne-se cada vez mais competitivo, fazendo com que as empresas prestem serviços com elevada eficiência e qualidade.

Neste contexto, a Proteção de Sistemas Elétricos tem uma enorme relevância devido à sua função de garantir o funcionamento do Sistema de Potência o mais contínuo possível, evitando que situações de operação indevida persistam. Apesar de manter a filosofia da proteção, os grandes avanços nos sistemas de automação das subestações tornaram os sistemas de proteção bem sofisticados. A evolução dos equipamentos utilizados e a digitalização permitem que os dados e funções envolvidos em uma subestação estejam integrados, melhorando a eficiência na proteção.

A integração de dados em uma subestação facilitou a utilização de redes de comunicação que regem as trocas de informações, entretanto é imprescindível garantir que a comunicação seja eficaz, ou seja, uma comunicação rápida e sem perdas de informação. Diante disto, surgiram de vários protocolos que permitiram a evolução destas redes de comunicação, no intuito de otimizar o desempenho e dar ao usuário mais mobilidade na configuração, em contrapartida, como estes protocolos eram proprietários, não era possível que equipamentos de diferentes fabricantes fizessem parte de uma mesma rede.

A Norma IEC¹ 61850 “Redes de Comunicação em Sistemas e Subestações” (do inglês, IEC 61850 *Communication Networks and Systems in Substation*) é um padrão único de comunicação entre equipamentos numa subestação de energia elétrica, baseado em redes de computadores e que possibilita a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos.

¹ IEC – *International Electrotechnical Commission*. Organização responsável por preparar e publicar normas internacionais relacionadas à eletrotécnica, eletrônica e tecnologias.

Problemas inerentes as redes de computadores, como o atraso nos pacotes, podem interferir no desempenho das funções que são executadas nos equipamentos da subestação que estão interconectados em rede. Para sistemas em tempo real, como é o caso da proteção de uma subestação, atrasos na troca de mensagens podem gerar atuações indevidas provocando distúrbios no fornecimento de energia elétrica.

O presente trabalho de conclusão de curso descreve um estudo da influência destes atrasos, dado aumento da quantidade de tráfego na rede e eventual perda de pacotes, na resposta da função de proteção de sobrecorrente instantânea. Para tal, serão usados computadores emulando os IEDs (do inglês, *Intelligent Electronic Device*) e trocando mensagens em uma rede, interligada por um switch.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo do comportamento das funções de proteção dado problemas inerentes à comunicação em rede.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar uma função de proteção de sistemas elétricos, no caso, a função de sobrecorrente instantânea;
- Montar uma rede de computadores, usando três computadores e um switch;
- Simular a troca de mensagens entre o TC, o IED e o Disjuntor;
- Avaliar o desempenho da função, dado diversos problemas na rede e para várias taxas de erros nas mensagens.

2. METODOLOGIA

Para a execução deste trabalho, foi inicialmente realizada uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados ao tema do trabalho, como proteção de sistemas elétricos, redes de computadores e Norma IEC 61850. Uma explanação sobre estes temas é apresentado na sessão 3.

A etapa seguinte consistiu do desenvolvimento de um *software* para a execução de uma função de sobrecorrente instantânea distribuída, com troca de mensagens via TCP/IP. O *software* teve início durante o projeto de P&D com a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) intitulado *Integração de dados dos sistemas de proteção utilizando o protocolo IEC 61850* e teve a contribuição do orientador deste trabalho Edmar Candeia. Foi utilizada a linguagem de programação C#, utilizando o Visual Studio. Para uma melhor compreensão do *software*, é apresentado uma descrição no tópico 4.

Utilizando a rede de computadores do Laboratório de Automação de Processamento de Sinais (LAPS), o *software* mencionado anteriormente foi executado, emulando a comunicação que ocorre no interior da subestação regida pelo protocolo IEC 61850. A troca de mensagens foi capturada utilizando o *software Wireshark*. Esta consiste da montagem 01.

A montagem 02 consiste em sincronizar os relógios das máquinas envolvidas para que o atraso nas mensagens tenha significado real, pois anteriormente, o tempo medido era um ponto flutuante sem referência alguma. O sincronismo é feito configurando o Protocolo NTP. Os dados das trocas de mensagens são novamente capturados.

Por último, a montagem 03 permite avaliar o atraso nas mensagens a medida que o tráfego na rede aumenta. Para aumentar o tráfego na rede, utiliza-se o aplicativo IPLoad que foi configurado para enviar 1000 pacotes/s. Analogamente, os dados foram salvos. A descrição das montagens e a análise dos resultados serão apresentados nas sessões 5 e 6, respectivamente.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Devido à característica multidisciplinar do trabalho, será apresentada uma fundamentação teórica de três assuntos distintos que são essenciais para uma melhor compreensão e contextualização do problema.

Os temas que serão abordados e a respectiva relevância para este trabalho são:

- Proteção de Sistemas Elétricos:

É utilizada uma função de proteção de sobrecorrente instantânea.

- Norma IEC 61850:

A função de proteção de sobrecorrente foi decomposta em três nós lógicos, conforme previsto na Norma.

- Redes de Computadores.

Alem da montagem da rede LAN na qual as mensagens são trocadas via o protocolo TCP/IP, o principal parâmetro avaliado neste projeto é o atraso nas mensagens. Para que esta medição de tempo seja coerente, é necessário que as máquinas registrem o mesmo tempo, ou seja, estejam sincronizadas, que é obtido usando um sistema SNTP.

3.1. PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

O sistema de proteção (SP) deve garantir o funcionamento do sistema elétrico de potência (SEP) o mais contínuo possível, evitando que se mantenham, por um longo tempo, situações de operação indevida, que pode vir a comprometer a estabilidade do Sistema. A resposta do SP deve ser automática, rápida e precisa, para garantir uma atuação eficiente e em tempo hábil.

O SP está intimamente relacionado com o SEP, pois a sua função primordial ser zelar pelo funcionamento e estabilidade deste. Os SEPs são grandes sistemas de energia que englobam a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

O diagrama unifilar² de um SEP simples que contém um gerador, um transformador e uma linha de transmissão para alimentar uma carga, pode ser visualizado na Figura 1. Essas caixinhas³ (Ver Figura 1) representam os dispositivos responsáveis pela proteção de uma parte do sistema. As partes em que é dividido o SEP para atuação da proteção são denominadas zonas de proteção.

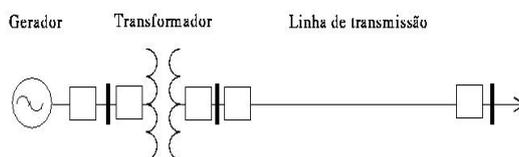


Figura 1 - Diagrama unifilar de um SEP simples

O SP consiste do conjunto de dispositivos conectados em uma rede ao longo de todo o SEP, que pretende mantê-lo funcionando continuamente, evitando que as faltas e distúrbios gerem danos. Logo, o SP é responsável pela manutenção do funcionamento correto do SEP. A proteção de qualquer sistema elétrico é feita com o objetivo de diminuir ou evitar risco de vida e danos materiais, quando ocorrer situações anormais durante a operação do mesmo.

A finalidade do SP é garantir uma correta análise ou diagnóstico do problema, bem como rapidez na resposta, iniciando procedimentos de ações corretivas no sentido de retornar o mais rápido possível às suas condições normais de operação.

3.1.1. IMPORTÂNCIA DA PROTEÇÃO

Pode-se afirmar que o SP é demasiadamente importante para SEP, por garantir segurança na transmissão dos grandes blocos de energia elétrica ao longo de distâncias quilométricas.

Dentre as diversas razões pelas quais é fundamental proteger o SEP, pode-se destacar:

- Garantir tempo de vida razoável as instalações e equipamentos elétricos.

Dispositivos de alta-tensão são, em geral, muito caros e é necessário

² Representação das interligações entre equipamentos sem minúcias quanto aos pontos de conexão existentes nesses equipamentos.

³ Usualmente, essa caixinha representa apenas o disjuntor. Porém, neste trabalho, esta forma representará todos os dispositivos da Proteção no local.

fornecer condições para que não se danifiquem excessivamente rápido, compensando o investimento.

- Alertar os operadores em caso de perigo não imediato, pois em algumas situações a isolação de parte do sistema é desnecessária, mas, caso continue por um determinado tempo, pode ocasionar danos ao sistema ou prejudicá-lo de alguma forma.
- Garantir qualidade do fornecimento de energia elétrica. A ANEEL⁴ cria regulamentações que solicitam a cada dia, mais qualidade, confiabilidade e continuidade do fornecimento da energia elétrica ao consumidor, estabelecendo medidas rígidas, inclusive multas elevadas e fechamento da concessionária, em caso extremo.

Logo, a proteção é fundamental para garantir a segurança de um modo geral e diminuir as perdas financeiras, devido a alguma operação indevida do sistema.

Pode surgir uma determinada questão: se o objetivo é reduzir os custos e permitir a continuidade do fornecimento de energia, por que não construir um SEP seguro o suficiente para que não seja necessário um SP? Simples, não é possível criar tal SEP, pois as faltas podem ocorrer devido as mais variadas causas, como por exemplo, galhos de árvores ou quebra de algum dispositivo da rede levando, em geral, às correntes elevadas de defeito. Com a manutenção dessa corrente percorrendo o SEP, são necessários apenas alguns segundos, dependendo da magnitude da corrente, para o derretimento dos componentes.

3.1.2. FUNÇÕES DE UM SP

O SP deve:

- Salvar a integridade física de operadores, usuários do sistema e animais;
- Assegurar a continuidade de alimentação das cargas;
- Retirar de serviço a instalação se há alguma operação indevida que põe em risco a estabilidade do sistema;
- Alertar os operadores em caso de perigo não imediato;

⁴ Agencia Nacional de Energia Elétrica.

- Evitar ou minimizar danos materiais;
- Diminuir despesas com manutenção corretiva;
- Melhorar os índices DEC (duração de interrupção equivalente por consumidor) e FEC (frequência de interrupção equivalente por consumidor)⁵.

Por conseguinte, alguns dos defeitos para os quais o SP deve atuar são: os curtos-circuitos (CC), que podem ser causadas pelas mais diversas razões, como por exemplo: aves, roedores, galhos de árvores, intempéries (frio ou calor), etc; defeitos nos isoladores de porcelana, que facilmente quebram ou trincam, comprometendo sua capacidade de isolação; situações críticas de isolação nos transformadores e geradores, provocados pela umidade excessiva do material isolante; descargas atmosféricas e surtos de chaveamento.

3.1.3. SUBSISTEMAS DE PROTEÇÃO

Comumente, os relés são associados de imediato ao SP. Isso ocorre devido à importância dos relés para a implementação das filosofias da proteção. Este dispositivo é responsável pela análise dos sinais de entrada e aviso quando ocorrer algum problema no funcionamento.

Além dos relés, o SP é constituído de Subsistemas de Proteção, compostos de:

- Transdutores - TC/TP;
- Disjuntor;
- Bateria.

Na Figura 2, pode ser visualizado o detalhe dos subsistemas de proteção no SEP, no qual estão representados os dispositivos que auxiliam o relé a manter o SEP funcionando corretamente.

Em linhas gerais, o TC e o TP reduzem as magnitudes das grandezas necessárias à função de proteção para níveis aceitáveis de leitura e acesso seguro,

⁵ Indicadores de Qualidade instituída pela ANEEL, Resolução N° 024/2000.

disponibilizando-as ao relé, que se encarrega de processar esses sinais. Em caso de operação indevida, o relé envia um comando de abertura ao disjuntor.

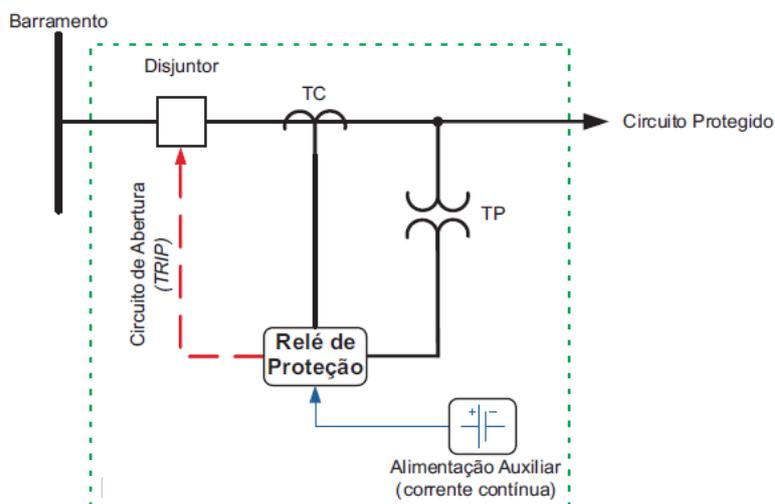


Figura 2 - Subsistemas de proteção (NETTO, 2008).

3.1.3.1 TRANSDUTORES - TC/TP

Os TCs e TP são transformadores de corrente e potencial, respectivamente, e estão instalados diretamente no SEP. Na medida do possível, reproduzem fielmente as grandezas observadas. Porém, quando saturados⁶ geram um grave problema para a identificação da falta pelo relé, uma vez que o transformador não mais está sendo fiel a corrente de entrada, podendo provocar operação indevida do SP.

3.1.3.2 DISJUNTOR

Dispositivo responsável por, de fato, isolar o componente do circuito sob a falta.

Seu funcionamento pode ser resumido como segue: ao detectar uma condição de falta, energiza-se sua bobina de ação por uma bateria, sendo o relé responsável pelo fechamento do contato entre a bateria e a bobina do disjuntor.

⁶ Normalmente, ocorre no TC quando a magnitude da corrente ultrapassa um determinado valor.

3.1.3.3 BATERIAS

Com relação à utilização do banco de baterias do SP, vale ressaltar que é importante que o fornecimento de energia não venha diretamente do SEP protegido, pois em caso de avaria neste sistema, poderia ocorrer também falha no SP.

3.1.3.4 RELÉ

Conforme mencionado previamente, o relé é o dispositivo mais importante do SP. Sendo comumente referenciado como a parte inteligente da proteção.

O relé recebe as informações dos TCs e/ou TPs, processa essas informações, comparando com valores de referência para o funcionamento correto ou analisando de acordo com sua função de proteção e, em caso de operação indevida do SEP, ordena ao disjuntor para abrir, isolando assim a falta.

Independente da sua classificação, o relé é um sistema que relaciona as grandezas elétricas de entrada, usualmente tensão e/ou corrente trifásicos, com as saídas, que consistem em mudança de estados (on-off) de seus contatos, como pode ser visualizado pelo esquema na Figura 3.



Figura 3 - Entrada/Saída de um relé

As características funcionais do relé, que consistem nas características inerentes ao processo de proteção podem ser visualizadas na Figura 4.

- **Confiabilidade:**

Probabilidade do sistema de proteção funcionar com segurança e corretamente, sob todas as circunstâncias.

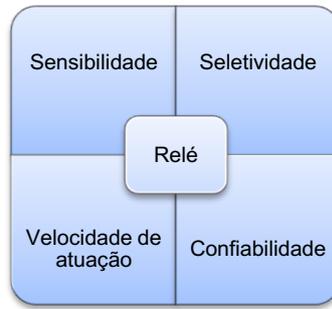


Figura 4 - Características funcionais do relé

- Seletividade:

O SP deve ser capaz de reconhecer e selecionar as condições para as quais uma imediata operação é necessária, e aquelas para as quais nenhuma operação ou retardo de atuação é exigido.

- Velocidade de atuação:

Característica mais importante do SP. Porém, como o relé toma suas decisões baseados nas formas de ondas de tensões e correntes, os quais são fortemente distorcidos devido a fenômenos transitórios que seguem da ocorrência de uma falta, tem-se que a relação entre a resposta do relé e o grau de certeza para a atuação é inversamente proporcional ao tempo. Para tornar o SP como um todo mais eficiente, devem-se associar relés rápidos com disjuntores de ação rápida.

- Sensibilidade:

Propriedade relacionada com a capacidade do SP em responder às anormalidades nas condições de operação e aos curtos-circuitos para os quais foi projetado.

Os relés experimentaram uma notável evolução desde que a tecnologia digital foi adotada em sua fabricação, tendo-se transformado em dispositivos eletrônicos inteligentes ou IED (*Intelligent Electronic Device*). Além de agregarem maiores recursos às tarefas de proteção de equipamentos, barras e linhas de transmissão, os IED são capazes de participar de diversas funções de supervisão,

controle e automação, normalmente utilizadas em uma subestação ou usina (PEREIRA *et al.*, 2007).

3.1.4. FUNÇÃO DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

Para garantir que todos os requisitos, antes citados sobre os sistemas de proteção, sejam atendidos, é importante que esses sistemas de proteção tenham condições de avaliar cada caso de anormalidade nos sistemas protegidos e atuem da melhor forma possível, de acordo com as necessidades de proteção. A função de proteção é definida como sendo a entidade que comanda a atuação do disjuntor, quando diante de condições anormais de funcionamento. As informações dos TCS e/ou dos TPs chegam constantemente ao IED, que faz o tratamento destas de acordo com suas configurações pré-estabelecidas. Se em algum momento a função é sensibilizada por alguma condição anormal de funcionamento do sistema protegido, é enviado um sinal que resultará na abertura do disjuntor e, por consequência, remoção da parte do sistema sob falha.

A função de proteção de sobrecorrente é caracterizada por atuar sobre condições especiais da magnitude das grandezas do sistema protegido, ou seja, é enviado uma sinalização para o disjuntor quando o valor de corrente observado excede um valor pré-determinado – dito seguro – configurado na função.

Considere uma função de sobrecorrente ajustado para atuar com referência em uma corrente I_P e a corrente I_F é a corrente constantemente observada pelo relé na linha protegida. Caso $|I_F| < I_P$, nada é sinalizado para o disjuntor, mas caso $|I_F| \geq I_P$, o relé sinalizará a abertura do disjuntor e a parte defeituosa será removida.

Quanto ao tempo de atuação desta função, pode-se classificá-las como instantâneos ou temporizados. Os primeiros são caracterizados por enviarem o sinal para o disjuntor assim que detectada a falta, os últimos apenas enviam este sinal após um determinado tempo, escolhido para a função. Os temporizados também se subdividem em dois grupos: os de *tempo definido* e os de *tempo inverso*.

Quando a função tem seu tempo de atuação definido, este sempre envia a sinalização para o disjuntor após esse tempo, independente de qualquer outra variável. Já a de tempo inverso envia um sinal para o disjuntor após um tempo

inversamente proporcional à magnitude da corrente de falta, maior ou igual à corrente mínima de atuação, conforme pode ser visto na Figura 5.

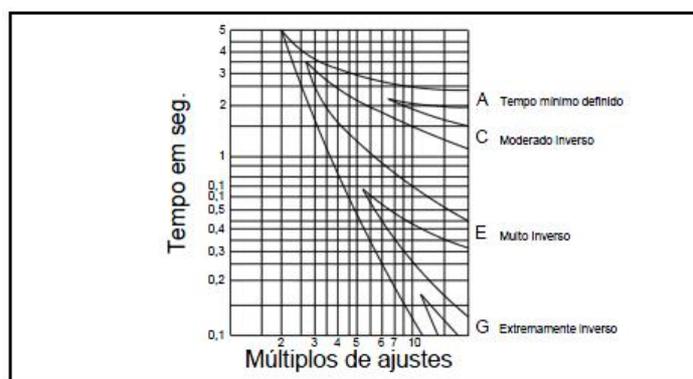


Figura 5 - Característica de tempo inverso (SÁ, 2010)

3.2. NORMA IEC 61850

A IEC 61850 é padrão internacional para automação de sistemas de subestação. Esta norma define a comunicação entre os dispositivos de uma subestação e os respectivos requisitos de sistema, além de suportar todas as funções de automação. As suas características mais importantes são a flexibilidade e capacidade de se adequar às mudanças tecnológicas e às necessidades dos usuários.

Visa garantir que um conjunto de funções que possam inter-operar de forma distribuída, na medida em que possam estar alocadas em diferentes dispositivos físicos, os quais podem estar geograficamente distribuídos e conectados em rede. Simultaneamente, utiliza estes mesmos princípios para a integração, numa mesma rede de dispositivos, de funções de medições, controle e proteção.

O principal objetivo da norma é atingir a interoperabilidade entre os IED de diferentes fabricantes, ou mais precisamente, permitir que funções sejam realizadas numa determinada subestação mesmo quando estas possuem equipamentos de diferentes fabricantes. Para caracterizar essa interoperabilidade, podemos dizer que dispositivos de diferentes fabricantes devem estar conectados e sob ação de um protocolo comum, devem entender as informações recebidas uns dos outros e juntos realizar uma ou mais funções.

Para se preencher os requisitos de comunicação em uma subestação, a identificação de todas as funções é necessária. Cada função deve ter sua descrição e sua decomposição em nós lógicos.

3.2.1. O CONCEITO DE NÓ LÓGICO

Um nó lógico (LN) é um agrupamento de dados logicamente relacionado a alguma função do sistema. A partir deste conceito é criada uma nova visão dos dispositivos – lógica – que não coincide a risca com a visão física destes. Para ilustrar melhor as duas disposições possíveis das funções, lógica e física, observe a Figura 6.

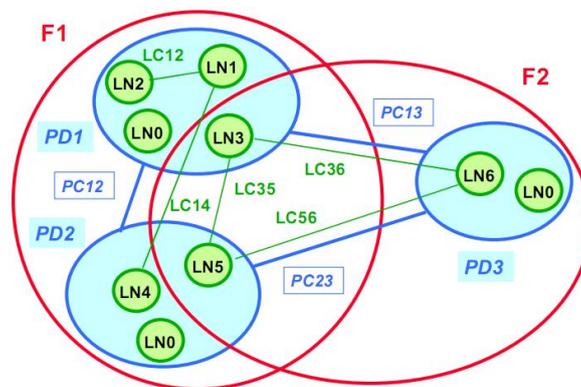


Figura 6 - O conceito de nó lógico e suas conexões (IEC 61850-5)

A possível alocação de uma função em vários dispositivos diferentes se faz coerente quando decomposmos esta em nós lógicos, sub-partes classificadas quanto aos seus propósitos de atuação (proteção, controle, medição e etc.) e que contêm dados tais que a manipulação destes em conjunto com os de outros nós lógicos definem a função a ser desempenhada.

Duas funções, F1 e F2 podem ser implementadas em uma subestação tal que F1 é desempenhada por dois dispositivos físicos (IED), PD1 e PD2, e a função F2 desempenhada por três dispositivos diferentes. Os três dispositivos existentes são conectados fisicamente pelo que chamamos de conexões físicas PC12, PC23 e PC13 (do inglês, *Physical Connection*). De forma análoga, as conexões lógicas LC14, LC35,

LC36 e LC56 unem os nós lógicos contidos em cada dispositivo lógico de cada dispositivo físico (PD1, PD2 e PD3).

O LN receptor deve identificar se os dados enviados a ele são: válidos, completos e com qualidade. Em subestações automatizadas, que é um sistema em tempo real, a idade do dado torna-se o critério mais importante para a sua validade. Enquanto o LN transmissor envia os atributos com maior qualidade possível, o LN receptor decide se os dados estão ou não velhos.

3.2.2. FUNÇÃO DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEA DECOMPOSTA EM LN

A função de sobrecorrente é decomposta em quatro nós lógicos e distribuída em quatro dispositivos diferentes, conforme pode ser visualizado na Figura 7. Cada equipamento aloca um nó lógico que representa a função do dispositivo, o que não impossibilita que, a depender da função, mais de um nó lógico de um mesmo dispositivo seja utilizado.

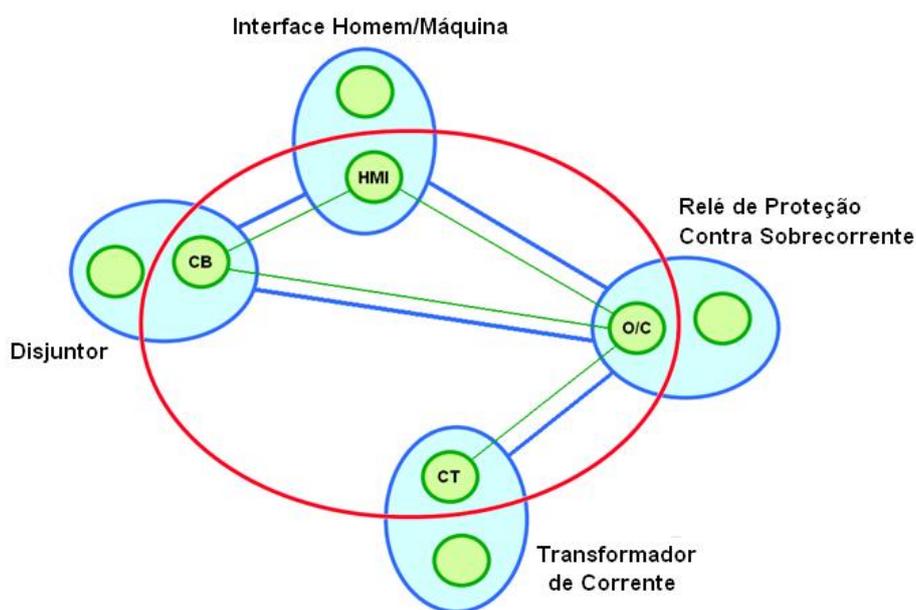


Figura 7 - Função de sobrecorrente decomposta em nós lógicos

Para a implementação desta função, minimamente necessita-se de três nós lógicos: TCTR, que estará no transformador de corrente; PIOC, presente no IED de proteção e XCBR, o disjuntor atuante na remoção do curto-circuito 1. Além desses,

acrescenta-se o nó lógico de interface IHMI, supondo haver um terminal em que operadores possam visualizar sinalizações.

O atributo do nó lógico do transformador de corrente $TCTR\$Amp\$instMag$ é um tipo float ou inteiro que representa amostras dos valores de corrente que são enviados ao relé de proteção. Mais precisamente, os valores de *instMag* devem ser comparados com os valores de $PIOC\$StrVal\sVC segundo os algoritmos escolhidos para proteção instantânea e temporizada;

Em caso de atuação, ou seja, a amostra que chega ao nó PIOC é maior que a referência contida nele, em *sVC*, o dado *Op* (operar) terá seu atributo 'general' (booleano) marcado como *true*; *Str*, do nó PIOC, deve indicar que o nó está ativo através de *general* (booleano devendo indicar *true*); de outra forma entende-se que a função está desabilitada.

O XCBR, que modela um disjuntor, contém uma variedade de dados, incluindo o dado *Loc* para determinar se a operação é local ou remota, *OpCnt* para uma contagem de operações, *Pos* para a posição do disjuntor, *BlkOpn* para bloqueio de comandos para disjuntor aberto, *BlkCls* para bloqueio de comandos para disjuntor fechado e *CBOpCap* para a capacidade operacional do disjuntor (IEC 61850-7-4).

O parâmetro *Loc* define se o disjuntor é local ou remoto; o atributo de XCBR chamado *stVal* mudará de acordo com a indicação de *Op*. Esse parâmetro é uma enumeração que indica quatro possíveis estados: *intermediate-state*, para indicar processo de abertura, *off* para disjuntor aberto, *on* para disjuntor fechado e *bad-state* para falha na atuação ou disjuntor defeituoso. IHMI não tem definições de dados segundo a norma, a interface criada definirá que informações essa receberá.

3.3. REDES DE COMPUTADORES

O crescimento acelerado no número de computadores produzidos e vendidos no mundo implicou em aumento dos serviços e aplicações para computadores e a Internet, o que pode ser confirmado pelo desenvolvimento da Web, pela utilização dos serviços de emails por milhares de usuários ao mesmo tempo, pela recepção de áudio e vídeo, pelo telefone por Internet, pelos serviços de

mensagens instantâneas, pelas aplicações P2P e pelo comércio eletrônico. Com isso, surge uma nova ciência que consiste no estudo das Redes de Computadores.

Porém, não só computadores estão ligados em rede atualmente. Dispositivos como TVs, celulares, automóveis, sistemas domésticos elétricos e de segurança e, de particular interesse para o nosso trabalho, IEDs podem ser sistemas finais de Internet, tornando possível a troca de informações entre eles, objetivando um aumento do desempenho da comunicação.

Os equipamentos são, usualmente, conectados através de uma rede denominada *Local Area Network* (LAN). Uma LAN é um conjunto de hardware e *software* que permite a equipamentos estabelecerem comunicação entre si, trocando e compartilhando informações e recursos. Normalmente, são utilizadas configurações de LAN em uma rede de uma empresa, um prédio ou um campus universitário, entre outros. Para a criação de uma LAN, os hubs e os switches são os dispositivos mais utilizados.

O modo mais simples de interconectar computadores e LANs é utilizando *hubs*. Um *hub* é um dispositivo da camada física, que consiste em um repetidor de várias entradas que, ao receber a informação por uma de suas portas, amplifica o sinal e reenvia para todos os demais equipamentos, sem se importar com quaisquer parâmetros da mensagem.

Os *switches* ou comutadores são dispositivos da camada de enlace, que são capazes de agir sobre o quadro Ethernet, ou seja, os campos da mensagem. Quando uma mensagem chega a interface de um switch, ele examina o endereço de destino e tenta repassá-lo através da porta que leva a esse destino.

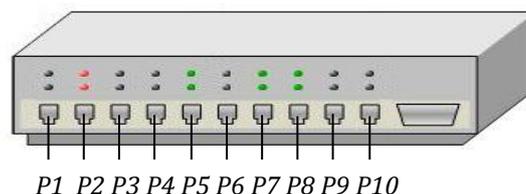


Figura 8 - Representação de um switch

3.3.1. PROTOCOLO TCP/IP

As redes de computadores, em geral, fazem uso intenso de protocolos. Um protocolo define o formato e a ordem das mensagens trocadas entre duas ou mais

entidades comunicantes, bem como as ações realizadas na transmissão e/ou no recebimento de uma mensagem ou outro evento (KUROSE, 2006).

O TCP é o protocolo de transporte confiável de dados da camada de transporte do modelo TCP/IP. Consiste em um processo orientado a conexão, pois antes de uma aplicação possa começar a enviar dados a outra, os dois sistemas precisam inicialmente enviar alguns segmentos preliminares entre si para estabelecer a transferência de dados em questão.

Uma conexão TCP é ponto a ponto, ou seja, entre um único remetente e um único destinatário e também é *full-duplex*, os dados podem fluir em ambos os sentidos das aplicações que estão conectadas.

O protocolo IP é definido na camada de rede do modelo TCP/IP. Esta camada é responsável pelo endereçamento dos pacotes de informação dos dispositivos origem e destino e possível roteamento entre as respectivas redes, se diferentes. Este roteamento é executado através do endereço IP.

O endereço IP é composto de quatro octetos, que são divididos em parte rede e parte dispositivo, chamados de identificadores de rede e de *host*, de acordo com o tipo de classe definido pelos primeiros bytes do primeiro octeto, e sub-rede, definida pelo número de máscara. Este protocolo, usando a parte rede do endereço ou identificador de rede, pode definir a melhor rota através de uma tabela de roteamento mantida e atualizada pelos roteadores.

Este protocolo recebe os dados da camada de transporte na forma de segmentos. Então ocorre o processo de fragmentação e os conjuntos de dados passam a se chamar datagramas. Estes datagramas são então codificados para envio à camada de enlace para encaminhamento

3.3.2. ATRASO DE PACOTES

A avaliação do atraso inerente à comunicação via redes de computadores é fundamental para a proteção de sistemas elétricos, por este tratar-se de um sistema crítico em tempo real.

As mensagens, que são divididas em pacotes, enviadas pela rede de um sistema inicial (origem) a um sistema final (destino) passam por uma série de elementos intermediários, sofrendo diversos tipos de atrasos em cada nó existente

no caminho. Os mais importantes tipos de atrasos são: o atraso de processamento; o de fila; o de transmissão e o de propagação. A soma destes constitui o atraso total.

3.3.2.1 ATRASO DE PROCESSAMENTO

Consiste no tempo necessário para examinar o cabeçalho do pacote e determinar para onde direcioná-lo. Também pode incluir fatores como o tempo necessário para verificação de erros em bits do pacote.

3.3.2.2 ATRASO DE FILA

O pacote sofre um atraso de fila enquanto espera para ser transmitido no enlace. O tempo de atraso dependerá da quantidade de pacotes que chegarem antes e que já estiverem na fila esperando pela transmissão.

3.3.2.3 ATRASO DE TRANSMISSÃO

Também denominado de atraso de armazenamento e reenvio, é a quantidade de tempo requerida para transmitir todos os bits do pacote para o próximo enlace.

3.3.2.4 ATRASO DE PROPAGAÇÃO

Ao ser lançado no enlace, demora um tempo para que um bit se propague até o próximo roteador ou sistema final. O bit se propaga à velocidade de propagação do enlace, a qual depende do meio físico do enlace e está na faixa de $2 \cdot 10^8$ m/s a $3 \cdot 10^8$ m/s.

4. SOFTWARE DESENVOLVIDO

O *software* foi desenvolvido na linguagem de programação C#, que é orientada a objeto. Após a compilação, o produto é apenas um executável que pode ser selecionado para operar como qualquer um dos LNs, entretanto, apenas como um dos tipos por vez.

Para executar a função de sobrecorrente instantânea, os LNs minimamente necessários são: TCTR; PIOC e XCBR.

Selecionar como qual LN o *software* está funcionando em determinada situação é o primeiro passo a ser realizado pelo usuário, conforme pode ser visualizado na Figura 9. Além de selecionar o LN, é necessário habilitá-lo, de modo a evitar erro de seleção de dois nós simultaneamente. Para habilitar o LN, basta clicar na caixa 'Enable', conforme pode ser visto na Figura 10, exemplificando para o TCTR.

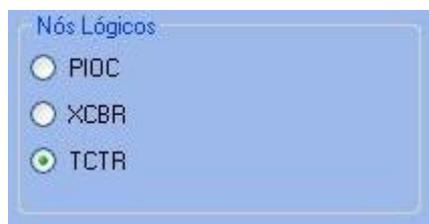


Figura 9 - Seleção do LN

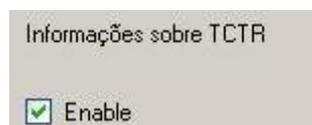


Figura 10 - Habilitar o LN TCTR

4.1. TCTR

O TCTR é o LN que está relacionado ao TC. Assim, sua função primordial é enviar amostras do sinal de corrente para o dispositivo de proteção, o PIOC para o caso da proteção de sobrecorrente instantânea.

Este LN possui o algoritmo de cliente TCP, ou seja, o que solicita conexão com o PIOC a cada vez que vai enviar uma mensagem. Como parâmetro de entrada, é necessário informar o endereço IP do destino, ou seja, do computador que está configurado como PIOC e informar também a porta que o servidor TCP está aguardando conexão. Na Figura 11 pode ser visualizada com o auxílio da seta vermelha, os campos de comunicação a serem preenchidos.

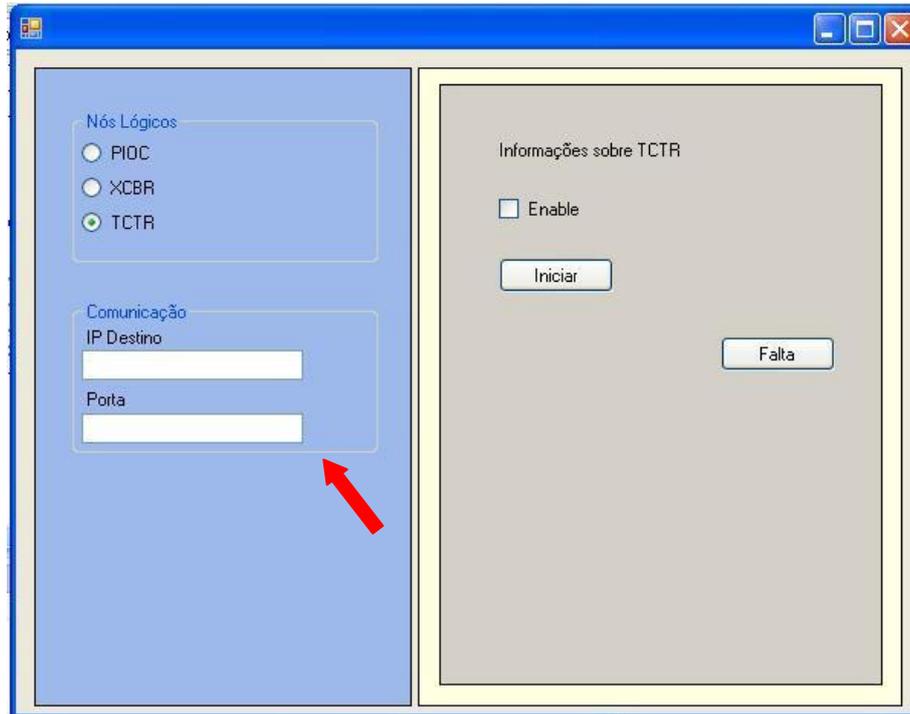


Figura 11 - Interface do software para a configuração do TCTR

Com isso, o TCTR está pronto para começar a enviar mensagens, cujo conteúdo é valor instantâneo da corrente. Para que se inicie efetivamente, basta dar um clique sobre o botão 'Iniciar'. Com esta ação, um sinal senoidal é gerado e são enviados os valores deste sinal a cada variação de tempo, dezesseis amostras por ciclo.

Para simular uma falta de baixa impedância, a qual é caracterizada por um aumento brusco na corrente do SEP, basta clicar no botão 'Falta'. Assim, o sinal passa a ser multiplicado por um fator atribuído pelo programador e continua a ser enviado ao PIOC. Os botões 'Iniciar' e 'Falta' podem ser vistos na Figura 11.

4.2. PIOC

O PIOC é o LN proteção instantânea de sobrecorrente, que é o análogo do relé. Sua função é analisar as amostras de corrente, vindas do TCTR e decidir se o sistema está operando em condições normais ou se houve falta nesta situação, enviar uma mensagem contendo um comando de abertura do disjuntor XCBB.

O PIOC, com relação aos protocolos de redes, pode utilizar tanto o cliente como o servidor TCP, a depender da situação:

- Servidor TCP – Para receber as amostras do sinal de corrente do TCTR;
- Cliente TCP – Enviar mensagem de disparo ao disjuntor XCBB. Neste caso, no campo ‘Comunicação’, deve-se preencher com o ‘IP Destino’ do computador em que o XCBB está configurado e a ‘Porta’ na qual este LN, configurado como servidor TCP, está aguardando conexão.

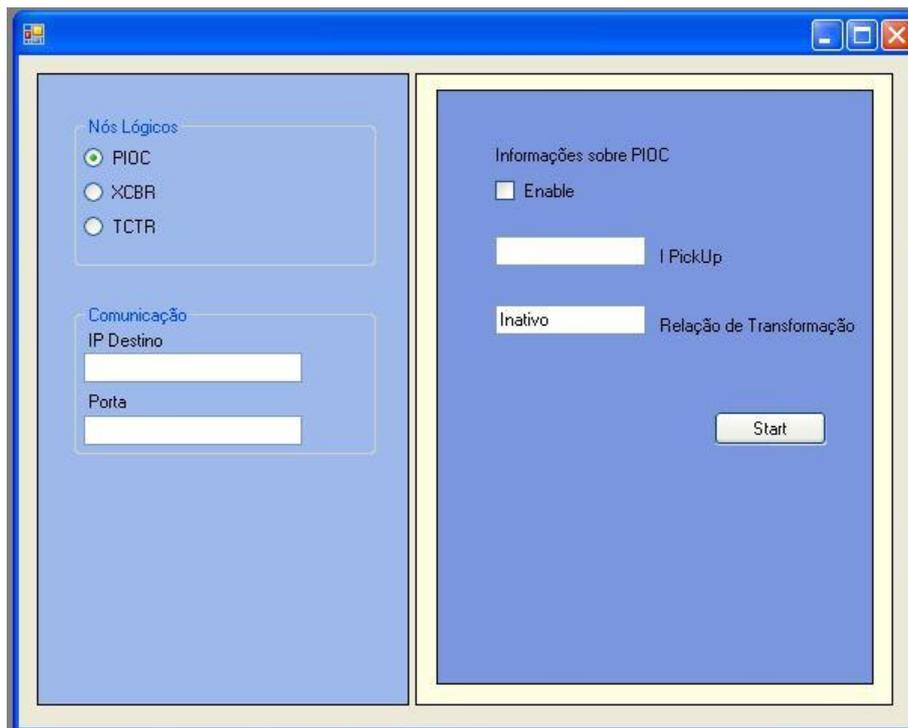


Figura 12 - Interface do software para a configuração do PIOC

Para determinar o valor da corrente, utilizando uma série de amostras, é necessário utilizar um algoritmo de estimação de fasores. Neste software, foi realizada a implementação utilizando o algoritmo de Fourier de um ciclo, cujo

desenvolvimento matemático sucinto segue no Anexo A. Esse é um método não-recursivo, baseado na aplicação de uma janela de tamanho fixo aos dados.

O processo de janelamento utilizado é ilustrado na Figura 13. Para cada janela de dados, o método estima a amplitude e a fase do fasor na frequência fundamental do sinal avaliado. Ao receber uma nova amostra, descarta-se a mais antiga de modo a ter sempre na janela atual um ciclo de pontos.

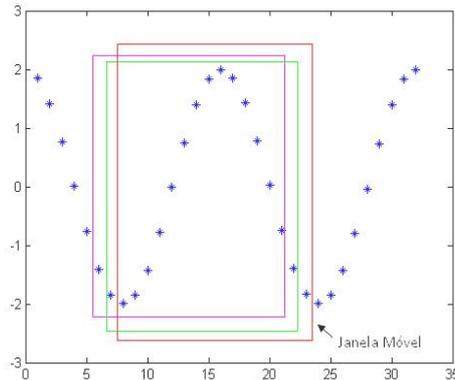


Figura 13 - Processo de janelamento utilizado

Ao receber uma nova amostra do TCTR, estima-se a amplitude do fasor e compara-se com o parâmetro 'I PickUp' informado pelo usuário, que é a corrente de pick up, ou seja, o valor máximo que a corrente pode atingir para ser considerada em operação normal. Assim, caso a amplitude estimada seja maior que a corrente de pick up, significa que ocorreu uma falta e deve-se enviar uma mensagem ao disjuntor XCBR. O fluxograma apresentado na Figura 14 facilita a compreensão do algoritmo de proteção de sobrecorrente instantânea.

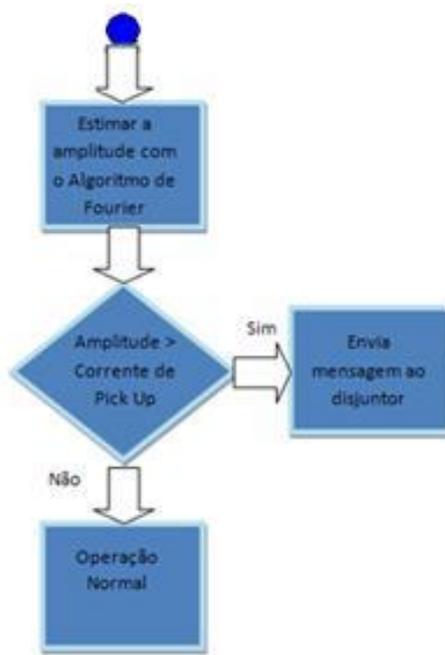


Figura 14 - Fluxograma da função de sobrecorrente instantânea

4.3. XCBR

O XCBR é o LN relacionado com o disjuntor. Sua função é receber uma ordem de abertura do PIOC e exibir uma mensagem 'Falta detectada – Abrir disjuntor', conforme pode ser visto na Figura 15.



Figura 15 - Mensagem de abertura de disjuntor

O XCBR possui um servidor TCP, ou seja, apenas aguarda a solicitação de conexão vinda do cliente TCP no PIOC. Assim, não há necessidade que o usuário preencha o campo 'Comunicações'. Para configurar o XCBR, basta selecioná-lo no campo 'Nós Lógicos' e marcar a opção 'Enable', conforme pode ser visualizado na Figura 16.

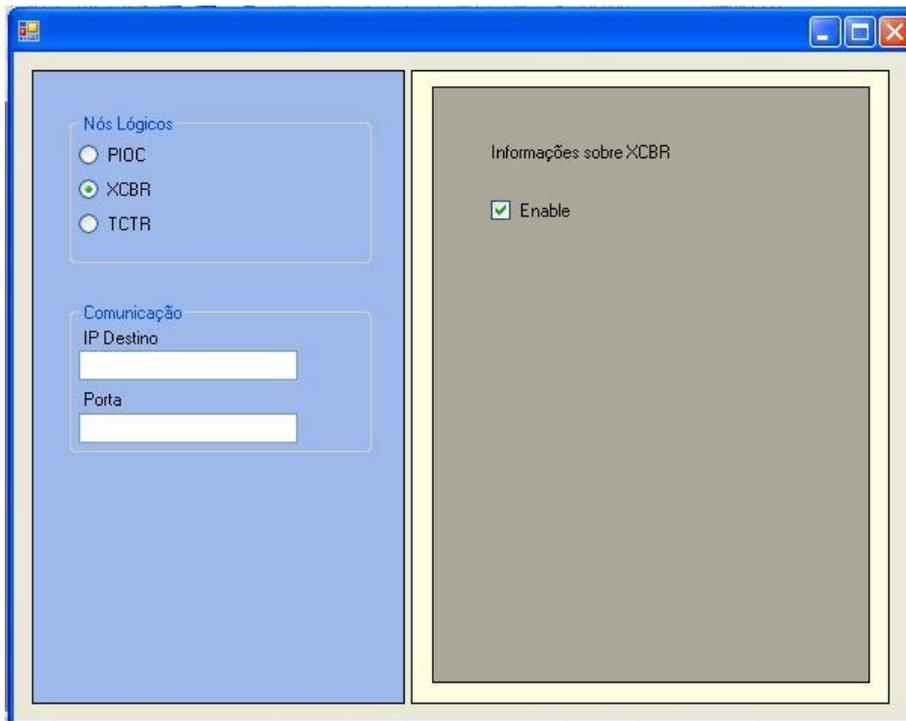


Figura 16 - Interface do software para a configuração do XCBR

5. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

As montagens foram realizadas no LAPS, na Universidade Federal de Campina Grande. Incluindo todas as montagens, foram necessários: quatro computadores e um *switch*. Os computadores já se encontravam conectados via rede LAN.

Objetivando capturar as mensagens trocadas entre os LNs do aplicativo descrito na sessão 4, foi utilizado o software *Wireshark* que é um analisador de protocolos de rede com recursos de captura de dados e apresentações das informações detalhadas, o que permitiu que os requisitos de tempo nas trocas de mensagens pudessem ser avaliados. Na Figura 17, segue apresentada a tela inicial do programa.

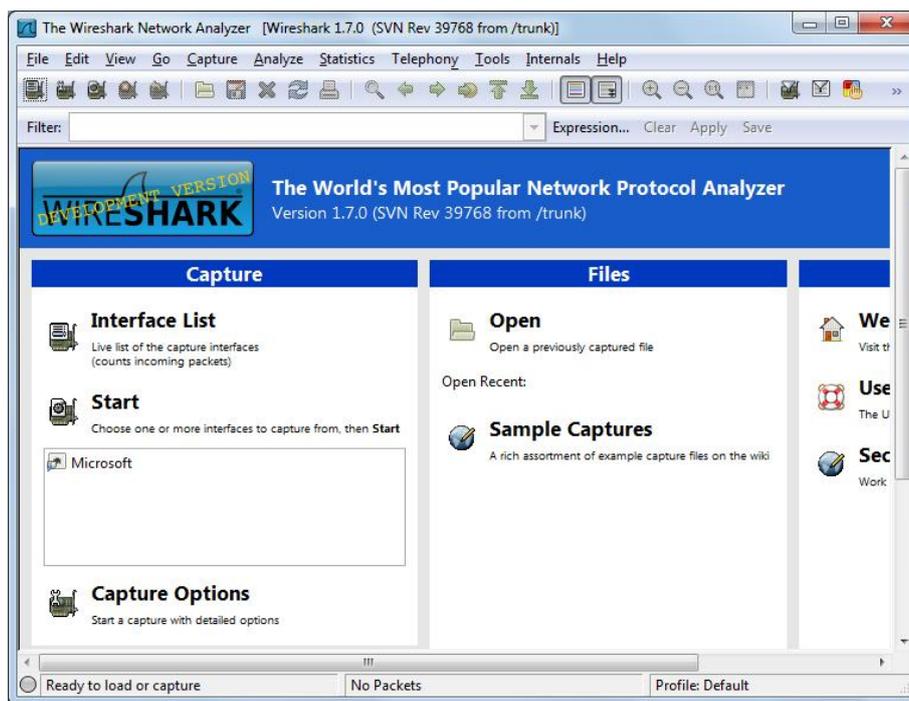


Figura 17 - Tela inicial do Wireshark

Para a realização deste trabalho, foram realizadas três montagens, que serão detalhadas posteriormente nos tópicos 5.1, 5.2 e 5.3 . Estas utilizaram o *software* desenvolvido (descrito na sessão 4) para obter uma configuração emulada de uma subestação baseada na Norma IEC 61850, contendo os elementos

(LNs) necessários para a execução de uma função de proteção de sobrecorrente instantânea.

5.1. MONTAGEM 01

Para a realização desta montagem, utilizou-se: três computadores, o *switch*, o *software* desenvolvido e o *Wireshark*.

Cada um dos computadores foi configurado como um LN distinto, conforme detalhado na Figura 18. Também se pode visualizar o IP respectivo a cada um dos LNs configurados: o TCTR, o PIOC e o XCBR. Tal parâmetro é importante para a configuração da troca de mensagens. O *Wireshark* é instalado em todas as máquinas e captura todo o fluxo de informação *Ethernet* durante toda a duração da montagem.

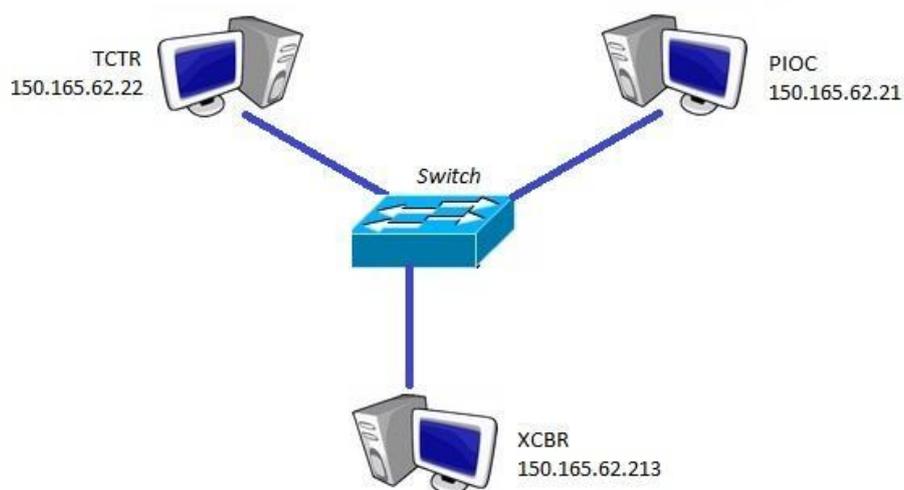


Figura 18 - Montagem 01

A sequência para a configuração desta montagem é detalhada agora:

- Inicia-se pelo XCBR: Começa a captura das mensagens. No *software*, habilita o LN XCBR e marca a opção '*Enable*', conforme mostrado na Figura 16. Vale ressaltar que, como o XCBR é apenas um Servidor TCP, não faz-se necessário nenhuma configuração no campo '*Comunicação*'.

- Para a configuração do PIOC: Inicia-se também o *Wireshark*. No *software*, a sequência de configuração é: (Para uma melhor compreensão, recomenda-se identificar os campos na Figura 19)
 - Habilita o LN PIOC e marca a opção '*Enable*';
 - Informa o valor na corrente de pick up no campo 'I PickUp';
 - Informa o valor do IP do XCBR, 150.165.62.213 e da porta que este LN está aguardando conexão, no caso 5001, no campo 'Comunicações';
 - Clicar no botão '*Start*'.

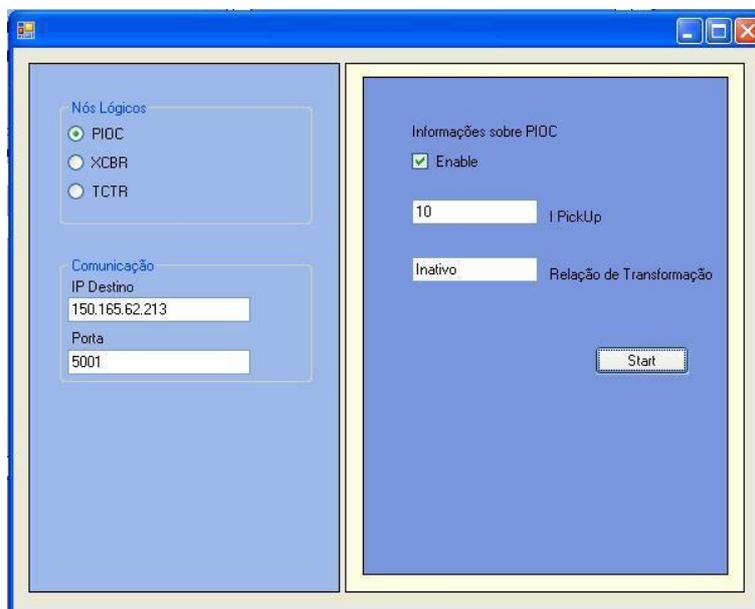


Figura 19 - Configuração do PIOC

- Para a configuração do TCTR: Inicia-se também a captura dos pacotes. Analogamente, habilita o LN TCTR, marca a opção '*Enable*' e configura o campo 'Comunicação' com o IP do PIOC, 150.165.62.21 e a porta é a 5000. Feito isto, basta apertar o botão 'Iniciar' e as mensagens estão sendo trocadas entre os IEDs emulados como uma situação de operação normal. Para uma melhor compreensão, na Figura 20 é mostrada a tela de configuração do TCTR.

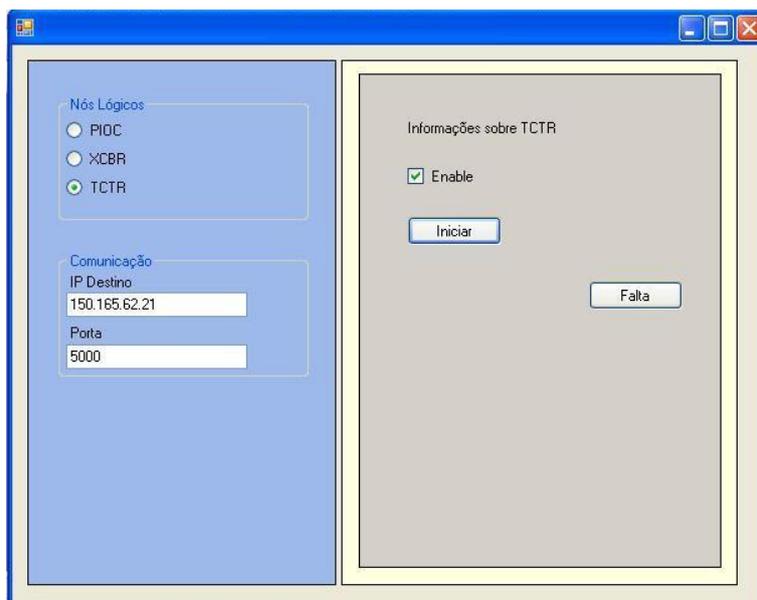


Figura 20 - Configuração do TCTR

- Para que o *software* simule uma situação de falta, basta apenas que, na tela do TCTR, Figura 20, clique sob o botão 'Falta'. Com essa ação, no XCBB, deve ser exibida a mensagem de falta e abertura do disjuntor, conforme mostrado na Figura 15.

Assim, a montagem foi finalizada, bastando apenas salvar os dados capturados no *Wireshark* para análise destes posteriormente.

5.2. MONTAGEM 02

Para a realização desta montagem, utilizou-se: quatro computadores, o *switch*, o *software* desenvolvido e o *Wireshark*.

De fato, a montagem 02 consiste em sincronizar os relógios de todos os computadores envolvidos para garantir que os dados obtidos, repetindo-se a montagem 01, referem-se ao atraso real nas mensagens.

O protocolo utilizado para sincronizar o relógio do sistema de computadores é o *Network Time Protocol* (NTP). Para montar uma rede baseada em NTP, é necessário configurar um servidor NTP, que será a referência de horário para todos os outros computadores da rede, que serão os clientes NTP.

O servidor NTP foi configurado na máquina, cujo IP é 150.165.62.13. O sistema operacional utilizado para esta configuração foi o Linux Ubuntu. Para a

instalação deste servidor, basta digitar o comando `sudo aptitude install ntp` que isto irá instalar todos os pacotes requeridos para o NTP.

Após a configuração do servidor NTP, o passo seguinte é sincronizar todas as máquinas utilizadas para a montagem (TCTR, PIOC e XCBR). Vale ressaltar que o sistema operacional utilizado em todas as outras máquinas, exceto no servidor NTP, é o Windows XP, o que não representa nenhum problema de compatibilidade, a diferença consiste apenas na forma de configurar o cliente NTP.

Máquinas Windows usam uma versão simplificada do NTP, chamada *Simple NTP* ou *SNTP*, e pode sincronizar com servidores NTP. Para realizar a sincronização com o servidor NTP, dê um clique duplo no relógio e vá para a aba 'Internet Time'. Escreva o endereço IP do servidor NTP no campo 'Server' e clique no botão 'Update Now'. Aparecerá uma mensagem informando que o horário foi sincronizado com sucesso, o que significa que o cliente NTP foi configurado corretamente. O processo deve ser repetido para cada um dos computadores na rede. A tela de configuração do Windows XP para o SNTP, no qual o que foi explanado neste parágrafo pode ser mais bem esclarecido, segue apresentado na Figura 21



Figura 21 - Configuração SNTP para Windows

Um esquema da montagem 02 pode ser visualizado na Figura 22.

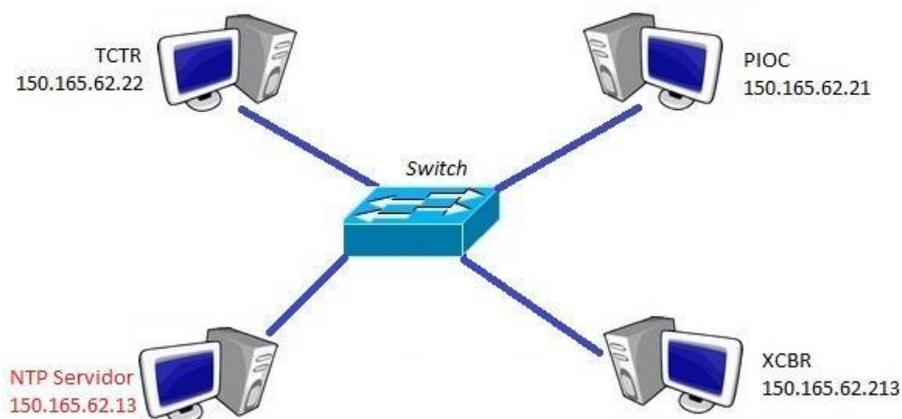


Figura 22 - Montagem 02

5.3. MONTAGEM 03

A montagem 03 consiste em aumentar o tráfego na rede LAN, para verificar a influência de um número elevado de mensagens numa rede para a proteção, que é um sistema crítico em tempo real.

Para aumentar o tráfego, utiliza-se o aplicativo IPLoad. Este aplicativo serve para enviar um grande número de quadros IP para um endereço de *broadcast* ou individual, usando uma conexão TCP ou UDP especificada pelo usuário, e permitindo que seja definido o pacote de dados.

Configurou-se o IPLoad para enviar 1000 pacotes/s, da máquina que estava o TCTR (150.165.62.22) para o computador que é o servidor NTP (150.165.62.13). A tela de configuração completa do aplicativo pode ser visualizada na Figura 23.

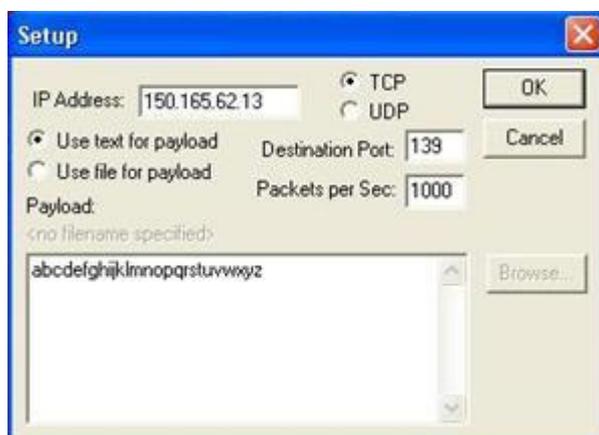


Figura 23 - Configuração do ILoad

Assim, mantendo-se o elevado trafego na rede, realiza-se novamente a montagem 01.

O procedimento descrito foi repetido para outros valores de carregamento do IPLoad. Os demais valores configurados foram:

- 2000 pacotes/s;
- 5000 pacotes/s;
- 10000 pacotes/s;
- 100000 pacotes/s.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na montagem 01, como as máquinas marcavam tempos distintos durante a realização da troca de mensagens, o atraso medido não corresponde ao atraso real em uma mensagem enviada de uma máquina até ser recebido pela outra, ou seja, o atraso inerente ao processo da transferência da mensagem sem tráfego elevado na rede.

Os relógios estão sincronizados, na montagem 02, via NTP e deste modo, pode-se medir os atrasos reais para o envio/recebimento de uma mensagem. Entretanto, a situação emulada é bastante diferente do contexto real devido à quantidade mínima de informações trafegando na rede.

Na montagem 03, foi proposta uma aproximação a realidade, sobrecarregando a rede e fazendo com que o *switch* gere uma fila e possivelmente, haja a perda de pacotes.

Os requisitos de tempo, os tipos e prioridades das mensagens envolvidas nesta emulação são definidos na Norma IEC 61850.

As mensagens de disparo são do tipo 1A. Este é o tipo mais importante e mais rápido, ou seja, tem os requisitos mais exigentes em comparação com todas as outras mensagens rápidas. Para a classe P1, que é tipicamente aplicada a sistemas de distribuição, o tempo total de transmissão máximo deve ser 10ms. Para a classe P2, que é aplicada a sistemas de transmissão, este tempo não deve exceder 3ms. Para este trabalho, assume-se um sistema de transmissão, ou seja, o atraso máximo obtido deve ser inferior a 3ms.

As mensagens de dados não processados, que inclui os dados de saída de transdutores como o TC e o TP, são do tipo 4. A classificação quanto à classe P1, P2 ou P3 é dada pela frequência de transmissão em amostras/s. Para o trabalho desenvolvido, são utilizadas 16 amostras/ciclo, o que corresponde a 960 amostras/s e assim, o *software* que realiza a emulação encaixa-se na classe P2, em que o tempo máximo é de 3ms.

Ressaltando a importância da sincronização do tempo no contexto deste trabalho, a Norma IEC 61850 define um tipo de mensagem apenas para este propósito. O tipo 6 é usado para sincronizar os relógios internos dos IEDs, que

dependendo da finalidade são requeridas diferentes classes de precisão de sincronização de tempo.

Nas montagens realizadas, as mensagens enviadas do PIOC para o XCBR são classificadas como tipo 1A e as enviadas do TCTR para o PIOC são do tipo 4, da classe P2.

Demonstrando numericamente o quão relevante é o fluxo de informação que circula em uma rede de comunicações em uma subestação, tem-se inicialmente que o LN TCTR, que realiza a amostragem dos valores de corrente apenas, coloca na rede 16 amostras/ciclo, que como a frequência do sistema é de 60 Hz, pode-se notar facilmente que o TCTR envia 960 mensagens/s. Observando a Figura 24, pode-se notar o elevado número de mensagens enviadas pelo TCTR.

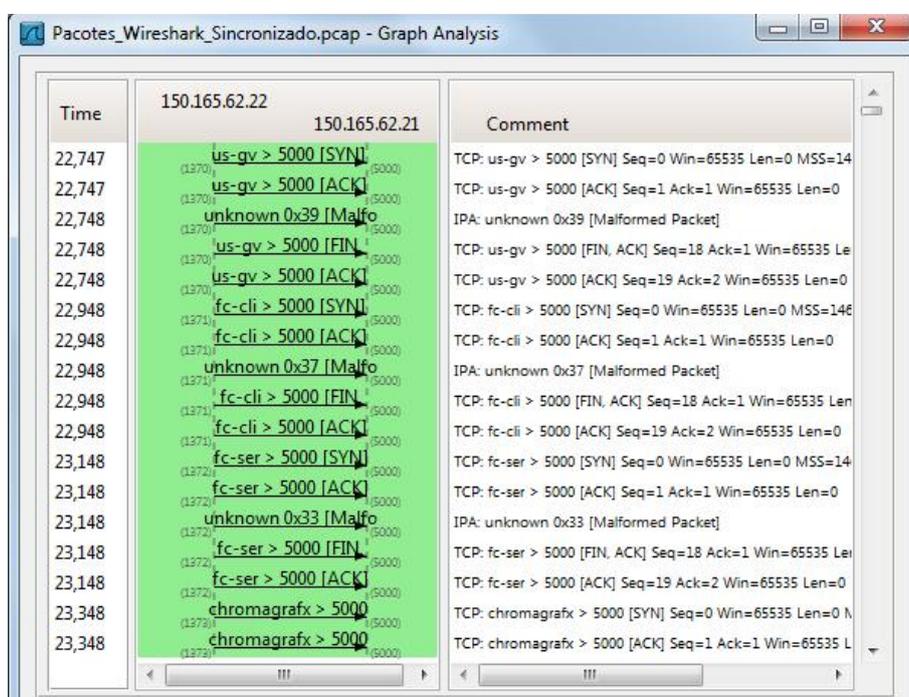


Figura 24 - Gráfico da quantidade de mensagens (capturadas pelo *Wireshark*) enviadas pelo TCTR em menos 0,6s

O SEP é trifásico e por isso, têm-se três TCTRs para cada linha de transmissão, um para cada fase, o que leva a mais de 2880 mensagens em um segundo. Uma subestação de médio porte, por exemplo, possui 10 linhas de transmissão, o que significa mais de 28 mil mensagens/s.

Lembrando que esta taxa refere-se apenas as amostras dos valores de corrente. Somado a estas, temos amostras de tensão e diversos outros tipos de

mensagens necessárias para o funcionamento de funções de todos os tipos de proteção, automação, controle, interface homem-máquina, entre outras.

Portanto, nota-se a relevância do estudo do atraso nos pacotes causados pelo elevado fluxo de informações na rede de comunicação em uma subestação para o desempenho de funções em tempo real, como é o caso de proteção de sistemas elétricos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da configuração da rede contendo apenas três nós lógicos, proposta neste trabalho, ser básica, esta forma de avaliação dos requisitos de tempo, emulando uma rede de IEDs com o uso de computadores, é inédita.

Para uma avaliação mais precisa do que pode vir a ocorrer na realidade em uma subestação, as montagens devem ter um maior número de equipamentos interligados e se comunicando entre si; a utilização de mensagens com prioridade, conforme previsto na Norma, que pode ser realizado com a substituição do *switch* por outro com esta função e uma implementação mais fiel a IEC 61850, como por exemplo, em uma melhor decomposição dos LN em dados, atributos de dados, PICOMs, etc.

Contudo, o trabalho proposto tem sua relevância no contexto abordado, pois com os dados avaliados já se pode concluir a necessidade de um detalhado planejamento da rede de comunicação regida pela Norma IEC 61850 a ser implantada em uma subestação, tendo em vista que os danos causados por uma falha na comunicação entre IEDs podem chegar a ser catastróficos.

Segue algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Adicionar outras funções de proteção e controle a montagem atual e identificar problemas de atuação indevida.
- Conectar um IED real à rede de comunicação emulada para avaliar a influência dos problemas inerente as redes de computadores em um algoritmo de proteção desenvolvido para fins comerciais.
- Implementar o protocolo *Publish/Subscribe* que é o definido pela Norma para fazer o envio das mensagens, ao invés do Cliente/Servidor.
- Tratar as mensagens segundo as prioridades definidas na Norma IEC 61850 e aumentar a carga de informação na rede, tendo em vista que para as subestações de grande porte, o sistema pode vir a possuir centenas de dispositivos que irão gerar um elevado tráfego de mensagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IEC STANDARDS. **IEC 61850 - Communication Networks and Systems in Substation**, 2003-04.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**; 2. Ed, 2005, Edição do autor.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de computadores e a Internet: Uma abordagem top-down**. Tradução Arlete Simile Marques; 3. Ed - São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2006.

NETTO, U. C. **Aplicações de controle e supervisão distribuídas em subestações de energia elétrica através dos relés digitais de proteção**. São Carlos, 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo.

NOBRE, C. **Estudo da Norma IEC 61850**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Porto, 2006.

PAULINO, M. E. C. **Teste de IEDs Operando com Redes de Comunicação Baseados na IEC 61850**. XII ERIAC, Foz do Iguaçu-PR.

PEREIRA, A. C.; ORDACGI FILHO, J. M.; CORREIA, J. R. G.; CÁCERES, D; PELLIZZONI, R. **Automação de subestações e usinas - estado da arte e tendências utilizando a norma IEC 61850**. In: VII SIMPASE, Salvador, Brasil, 2007.

SÁ, J. A.; COSTA, F. B.; OLIVEIRA, N. L. S.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A.; GURJÃO, E. C. **Uso de um simulador em tempo real no ensino de proteção de sistemas elétricos**. In: XXXVIII COBENGE, Fortaleza, Brasil, 2010.

SILVA, K.M. **Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão**; Campina Grande, 2009. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande.

ANEXO A – O ALGORITMO DE FOURIER DE UM CICLO

Apresenta-se a seguir, de forma sucinta, o algoritmo de Fourier de um ciclo.

Inicialmente, considere um sinal periódico qualquer $x(t)$ e sua representação em série de Fourier:

$$x(t) = \frac{Y_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{cn} \cos(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{sn} \sin(2\pi nft). \quad (1)$$

Sendo: f a frequência fundamental de $x(t)$ e nf , a n -ésima harmônica de $x(t)$.

Os coeficientes de Fourier são determinados pelas expressões a seguir:

$$Y_0 = \int_t^{t+T} x(t) dt \quad (2)$$

$$Y_{cn} = \int_t^{t+T} x(t) \cos n\omega t dt \quad (3)$$

$$Y_{sn} = \int_t^{t+T} x(t) \sin n\omega t dt. \quad (4)$$

Sendo T o período do sinal.

O algoritmo de Fourier de um ciclo consiste em extrair a componente de frequência fundamental do sinal $x(t)$ a partir de um ciclo de amostras de $x(t)$. Para isso, considere apenas a frequência fundamental. Neste caso, as equações 3 e 4, tornam-se:

$$Y_{c1} = \int_t^{t+T} x(t) \cos \omega t dt \quad (5)$$

$$Y_{s1} = \int_t^{t+T} x(t) \sin \omega t dt. \quad (6)$$

Considere: N amostras de um ciclo da frequência fundamental de $x(t)$, Δt o passo de amostragem e $t_k = k\Delta t$.

O processo de filtragem digital do algoritmo de Fourier de um ciclo é executado através das equações:

$$Y_{c1} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k h_{ck} \quad (7)$$

$$Y_{s1} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k h_{sk}. \quad (8)$$

Sendo: h_{ck} e h_{sk} os coeficientes dos filtros de Fourier de um ciclo h_c e h_s , respectivamente:

$$h_c = \frac{2}{N} [\cos\omega t_0 \quad \cos\omega t_1 \quad \cos\omega t_2 \quad \dots \quad \cos\omega t_{N-1}] \quad (9)$$

$$h_s = \frac{2}{N} [\sin\omega t_0 \quad \sin\omega t_1 \quad \sin\omega t_2 \quad \dots \quad \sin\omega t_{N-1}]. \quad (10)$$

Uma característica importante deste algoritmo é o fato dos filtros h_c e h_s serem ortogonais na freqüência fundamental. Além disso, o algoritmo não requer esforço computacional elevado, pois os coeficientes do filtro podem ser calculados *off-line*.

Por fim, a amplitude e a fase do fasor na freqüência fundamental podem ser calculadas da seguinte forma:

$$A_1 = \sqrt{Y_{c1}^2 + Y_{s1}^2} \quad (11)$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{Y_{s1}}{Y_{c1}} \right) \quad (12)$$