

LEONARDO RAMOS PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DIGITAL PARA GERAÇÃO
E TRANSMISSÃO DE VALORES AMOSTRADOS ATRAVÉS DO
BARRAMENTO DE PROCESSOS ("MERGING UNIT"), PREVISTO
PELA IEC 61850.**

Projeto de formatura apresentada à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título
de Graduado em Engenharia

São Paulo – SP

2010

LEONARDO RAMOS PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DIGITAL PARA GERAÇÃO
E TRANSMISSÃO DE VALORES AMOSTRADOS ATRAVÉS DO
BARRAMENTO DE PROCESSOS ("MERGING UNIT"), PREVISTO
PELA IEC 61850.**

Projeto de formatura apresentada à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título
de Graduado em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Energia e Automação
Elétrica

Orientador: Professor Doutor
Eduardo César Senger

São Paulo – SP
2010

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente às pessoas que me ajudaram este ano na elaboração deste trabalho, como os professores Eduardo César Senger, Giovanni Manassero e Eduardo Lorenzetti Pellini, o último em especial devido à paciência comigo. Acredito que o presente trabalho encerra um ciclo da vida que é fruto de muitos anos e da convivência com muitas pessoas dentro e fora da universidade. É também o fim de um período de grande crescimento profissional e pessoal, no qual julgo que me servi da universidade e a ela servi, da maneira que me foi possível. Agradeço assim a todos os professores do PEA e da Escola Politécnica.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos do PEA que se formam este ano e com os quais pude compartilhar as experiências e conhecimento acumulado ao longo do ano neste trabalho. Desejo muito sucesso às vidas dessas pessoas. Além disso, agradeço também aos amigos que começaram a graduação comigo e que já se formaram como Murilo Hinojosa de Sousa, Helber Peixoto Covre, Bruno Keiti e Daniel Paulo Silva Nunes, sendo o último estudante de graduação assim como eu. As ajudas e amizades dessas pessoas foram essenciais para cumprir este longo período. São pessoas que jamais esquecerei.

Agradeço a todas as pessoas que conviveram comigo estes anos todos, em especial aos amigos que fiz no bairro Jardim Celeste, aonde nasci e fui criado. Desejo muito sucesso a todas as pessoas de lá. Agradeço em especial aos amigos Rodrigo Feliciano da Silva e Pedro Paulo Porta, pessoas com as quais tive mais contato durante o período da universidade. São amizades muito importantes para mim.

Por fim, agradeço a minha família: aos meus pais Wanderley Cosmo Pereira e Solange Ap. S. da Costa Ramos Pereira; ao meu irmão Leandro Ramos Pereira e ao meu tio Renato da Costa Ramos por tudo que me ensinaram e vêm me ensinado até hoje. Todas as minhas vitórias se devem a eles.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento denominado *merging unit*, conforme descrito no capítulo 8 da norma IEC 60044-8 e no capítulo 9.1 da norma IEC 61850, sendo que a primeira define diretrizes para o funcionamento de transformadores eletrônicos e a última define diretrizes para sistemas de automação de subestações. O equipamento desenvolvido recebe os sinais analógicos de tensão e corrente fornecidos pelos transformadores de Tensão (TP) e de corrente (TC), faz a conversão analógico-digital desses sinais e transmite os valores amostrados através de uma rede Ethernet denominada *Process Bus*. A informação transmitida deve respeitar o encapsulamento descrito nas duas normas citadas.

Com essa solução, os modernos relés digitais de proteção (IED's) passam a receber os valores digitalizados das tensões e correntes através do *Process Bus* e podem dispensar o hardware de digitalização dos sinais analógicos presentes nos relés tradicionais.

A *merging unit* será implementada em uma plataforma digital desenvolvida em um projeto de pesquisa anterior do LPROT – Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos que visava o desenvolvimento de um relé de proteção diferencial de linhas. Além da *merging unit*, será desenvolvido um software para recepção desses sinais, visualização e análise dos sinais transmitidos. Ao final do trabalho, são feitos alguns testes para verificar a eficácia do equipamento e dos processos de amostragem e transmissão.

Palavras-chave: Subestações elétricas. Proteção de sistemas elétricos. Redes de comunicação de dados. Norma IEC-61850. *Merging Unit*.

ABSTRACT

This paper presents the development of equipment called a merging unit, as described in Chapter 8 of IEC 60044-8 and in section 9.1 of IEC 61850, the first of which sets guidelines for the operation of electronic transformers and last sets guidelines for systems substation automation. The developed device receives the analog voltage and current supplied by voltage transformers (PT) and current (CT), makes the analog to digital conversion of these signals and transmits the sampled values through a network called Ethernet Bus Process. Information transmitted must respect the encapsulation described in the two standards described.

With this solution, the modern digital relays (IED's) will receive the digitized values of voltages and currents through the Process Bus and may work without the digitization of analog signals hardware present in the traditional relays.

The merging unit is implemented in a digital platform developed in a previous research project LPROT - Research Laboratory of Power Systems, which sought the development of a differential protection relay lines. In addition to the merging unit, will be developed software for reception of this signals, visualization and analysis of the transmitted signals. At the end of the paper, some tests are done to verify the effectiveness of the equipment and procedures for sampling and transmission.

Keywords: Substations. Electric system protection. Communication network. Standard IEC-61850. Merging Unit.

SUMÁRIO

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 11 |
| 1.1 | Introdução..... | 11 |
| 1.2 | Objetivos | 16 |
| 2. | CONSIDERAÇÕES SOBRE A NORMA IEC-61850 | 18 |
| 2.1 | Desenvolvimento dos sistemas de automação de subestações..... | 18 |
| 2.2 | Desenvolvimento da norma IEC 61850 | 20 |
| 2.3 | Objetivos almejados para os sistemas de automação de subestações | 22 |
| 2.4 | Conceitos referentes a IEC 61850 | 24 |
| 3. | CONCEITOS REFERENTES À TRANSMISSÃO DE VALORES AMOSTRADOS (SV - SAMPLE VALUES)..... | 31 |
| 3.1 | Introdução..... | 31 |
| 3.2 | A norma IEC 60044-8 e o transformador eletrônico..... | 31 |
| 3.3 | A norma IEC 61850 e a transmissão dos SV | 42 |
| 3.4 | Descrição do Frame Ethernet (Camada de Enlace)..... | 45 |
| 4. | DESCRIÇÃO DOS RECURSOS UTILIZADOS..... | 51 |
| 4.1 | Introdução..... | 51 |
| 4.2 | Hardware disponível..... | 51 |
| 4.3 | Software..... | 60 |
| 4.4 | Computador de comando da merging unit | 61 |
| 4.5 | Caixa de testes OMICRON e computador de comando..... | 61 |
| 4.6 | IHM local | 64 |
| 5. | DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS E SIMULAÇÕES | 66 |
| 5.1 | Teste de linearidade do sistema de amostragem | 66 |
| 5.2 | Teste de eficiência do sistema de amostragem e transmissão | 71 |
| 5.3 | Teste de fidelidade ao sinal injetado | 77 |
| 6. | CONCLUSÕES FINAIS | 87 |
| 7. | BIBLIOGRAFIA..... | 88 |

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

A automação de subestações moderna pode ser vista como um processo que permite o controle da subestação não apenas presencialmente, mas de maneira remota. De um modo mais geral, a automação pode ser definida como "possibilitar a operação automática da subestação e das correspondentes funções de distribuição de energia de modo a gerenciar o capital ativo envolvido e aumentar a eficácia de operação e manutenção, com o mínimo de intervenção humana" [1]. Assim, o sistema de automação de subestações recebe os dados monitorados do sistema de potência e realiza intervenções sobre o mesmo, se necessário. A intervenção humana é permitida local e remotamente e tem prioridade sobre o sistema de automação, exceto em casos onde existe risco de vida dos operadores. Na solução atual, a estrutura do sistema de automação das redes elétricas de potência está fortemente baseada na utilização da moderna tecnologia digital, consistindo na digitalização e processamento dos sinais envolvidos e no intercâmbio das informações de controle, monitoramento e supervisão entre os dispositivos e os centros de operação do sistema, através de redes de comunicação de dados.

1.1.1 A estrutura dos sistemas de automação de subestações

A norma IEC 61850 refere-se à automação e proteção de subestações elétricas. Ela baseia-se na utilização de protocolos de comunicação abertos e define padrões para que dispositivos de diferentes fabricantes possam, via comunicação em rede, estabelecer um sistema confiável de proteção e

automação elétricas. Ela possui uma abordagem ampla, contemplando as diferentes soluções existentes para sistemas de automação.

A norma IEC 61850 explicita a constatação de que a modelagem de rede prevista para automação e proteção de subestações tem o aspecto mostrado na figura 1.

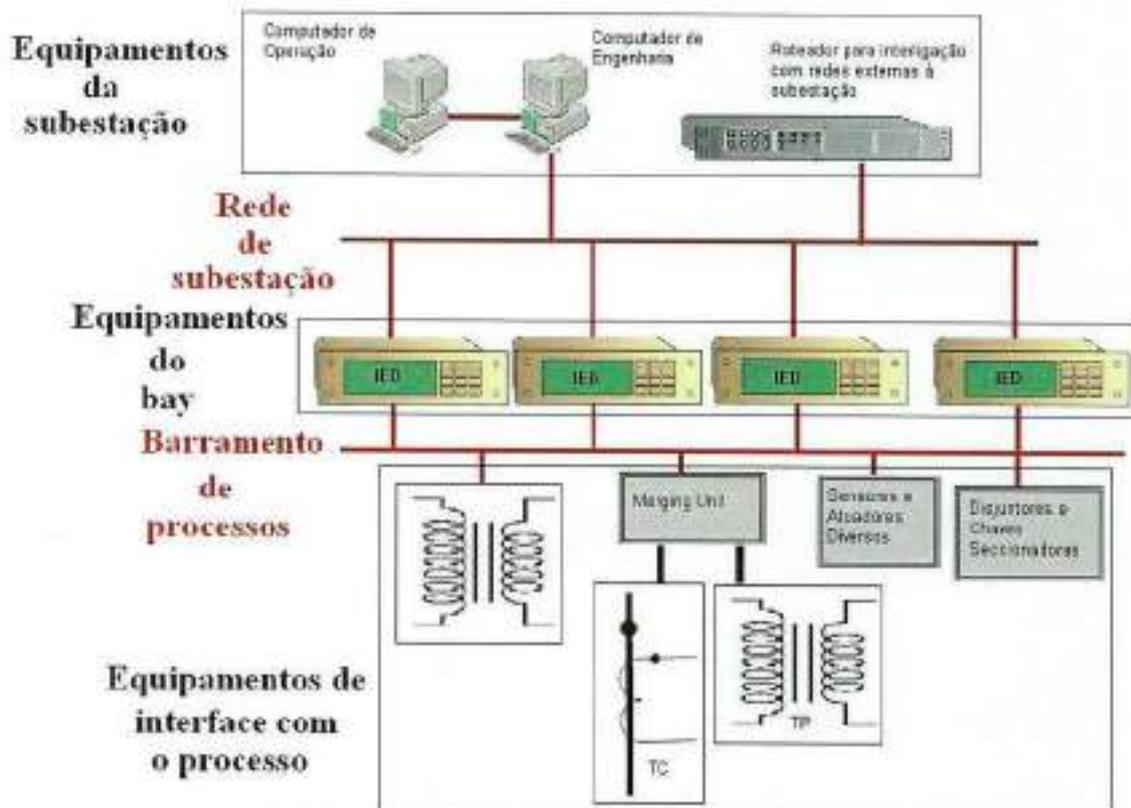


Figura 1. Modelagem da comunicação em sistemas de automação de subestações

Neste sistema, podemos distinguir os seguintes equipamentos:

Equipamentos primários da subestação: Os transformadores e diversos sensores fazem o abaixamento de tensões e correntes a níveis coerentes para que sejam amostrados. Os disjuntores, contadores, entre outros, realizam intervenções no sistema de potência quando comandados. O equipamento desenvolvido neste estudo (*merging unit*) pode ser encaixado nesta categoria. Note que neste sistema de automação a amostragem e digitalização dos sinais são realizadas no próprio ponto de sensoriamento. É

esperado que, com o advento de transformadores eletrônicos e ópticos, a função de *merging unit* seja incorporada fisicamente a todos os dispositivos sensores a atuadores da subestação. Da mesma forma, os atuadores (disjuntores e chaves seccionadoras, entre outros) serão dispositivos inteligentes, comandados por sinais digitais que representam comandos de abertura ou fechamento.

Equipamentos do bay: Recebem dados e medições dos equipamentos de interface com o processo e comandam os dispositivos que intervêm no sistema de potência por meio de lógica programável. Hoje, esses equipamentos do bay são chamados IED's (*Intelligent Electronic Devices*). São substitutos dos antigos relés eletromecânicos e implementam as funções de proteção antes realizadas pelos primeiros. Também são responsáveis por funções de medição, disponibilizando dados para os equipamentos da subestação; monitoramento, verificando estados de disjuntores e atuadores; controle, garantindo que cada operação de abertura ou fechamento solicitada respeite os intertravamentos necessários, como a abertura de um disjuntor e das chaves seccionadoras associadas, por exemplo; e análise pós falta, a partir de oscilografias e registros de eventos para análise das alterações no sistema de potência. Os IED's têm a sua programação interna de acordo com a sua função no sistema de automação (um dispositivo instalado na interligação entre duas linhas de transmissão será programado diferentemente de um instalado na entrada de uma subestação, por exemplo) e com as características dadas ao dispositivo pelo fabricante. Os IED's também podem se comunicar em uma rede, o que permite que a coordenação entre os dispositivos de proteção seja confiável, proporcionando tempos pequenos de atuação em casos de emergência. A comunicação em rede entre os IED's também é tratada particularmente na norma IEC 61850 que especifica um tipo de mensagem de alta prioridade, com transmissão contínua pela rede e com alta taxa de informação por mensagem, denominada mensagem GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Events* – Evento Genérico da Subestação Orientado a Objeto). Em sistemas de automação atuais, os IED's recebem dados do

sistema de potência diretamente dos sensores e transformadores, sendo ligados a esses através de fios de cobre. Nesses sistemas, os IED's enviam os comandos aos disjuntores e atuadores também através de fios de cobre.

Equipamentos da subestação: Interfaces homem-máquina (IHM), computadores de operação e engenharia, sistemas SCADA, sistemas de armazenamento de dados, roteadores e *links* de acesso por agentes externos à subestação se encaixam nesta categoria. Os computadores de operação e os sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition* – Sistema de Controle e Aquisição de Dados) permitem intervenções no sistema de potência e conhecimento do estado do mesmo. A IHM é um conceito presente nos computadores de operação, nos sistemas SCADA e em outros equipamentos que controlam dispositivos no sistema de potência, como chaves, botões e painéis. Nesses dispositivos com IHM, a sinalização de estado do sistema possui um caráter sensível à percepção humana e possui fácil interpretação. O contato de um disjuntor, por exemplo, pode ser representado por um desenho na tela do computador cuja cor é verde quando o disjuntor está aberto e vermelho, quando o disjuntor está fechado. Os computadores de engenharia permitem programar os IED's remotamente em caso de eventuais mudanças no sistema de automação, quando há mudanças nos níveis de corrente do sistema, por exemplo, o que exige mudanças no sistema de proteção, ou em casos de manutenção de dispositivos do sistema de potência, entre outros. Os dispositivos de armazenamento constituem um grande banco de dados, armazenando um registro histórico do estado de variáveis importantes do sistema. Esse registro pode ser consultado em caso de falhas ou faltas cuja origem é desconhecida, quando se deseja estudar o desempenho do sistema de potência e automação ou ser acessado por agentes externos interessados no funcionamento da subestação. Os roteadores e *links* com agentes externos possibilitam essa interação. Agentes externos, como o ONS (Operador Nacional do Sistema), podem inclusive operar a subestação externamente, com prioridade sobre agentes internos. Existem sistemas de operação,

sistemas SCADA e IHM's remotas, cuja forma de operação é a mesma já descrita, porém atuando fora da sala de controle da subestação.

Entre os barramentos, que fazem a ligação entre os dispositivos e possibilitam a comunicação entre eles, encontramos.

Rede da Subestação (*Station Bus*): rede onde os operadores locais ou remotos se comunicam com o sistema e onde os dispositivos do *bay* se comunicam entre si. Devido à variedade de dispositivos que podem estar presentes em uma subestação e a variedade de dispositivos de *bay* que podemos encontrar, essa rede de comunicação deve suportar vários protocolos diferentes. O dispositivo de armazenamento extrai as informações do sistema por um protocolo diferente do utilizado pelas mensagens GOOSE, por exemplo. Todas essas mensagens circulam pela mesma rede. Sendo assim, também as mensagens possuem um identificador de prioridade, que permite que possam circular na rede em detrimento de outras quando a rede está carregada, ou seja, quando existem muitos dispositivos transmitindo e recebendo informações e a taxa de comunicação se aproxima da capacidade física da rede.

Barramento de processos (*Process Bus*): rede de comunicação entre os dispositivos de interface com o processo e os dispositivos do *bay*. Nos sistemas antigos e em alguns sistemas atuais essa rede consiste de cabos elétricos que levam o sinal dos sensores e transformadores até os dispositivos do *bay*, aonde o sinal era amostrado e digitalizado. Atualmente o desenvolvimento da tecnologia torna possível a amostragem e digitalização desse sinal no próprio ponto de sensoriamento, enviando o sinal amostrado via rede até os dispositivos do *bay*. Essa mudança possibilita uma maior confiabilidade do sistema, pois a facilidade para manutenção e detecção de erros é maior. Ao invés de existirem vários cabos elétricos de comprimento longo interligando os dispositivos existe apenas um cabo de rede. A característica principal dessa rede é que ela está sujeita a um grande fluxo de dados e informações, já que os sinais são amostrados e enviados pela rede a taxas muito grandes (até 128 amostras por ciclo de 60 Hz). Como veremos nos experimentos, a precisão no envio e recepção dos sinais é muito importante

para obtenção de tempos satisfatórios de atuação dos dispositivos. O dispositivo desenvolvido nesse estudo se encaixa na categoria de dispositivo de interface com o processo e a comunicação em rede é realizada em um barramento de processos.

1.2 Objetivos

O nosso trabalho se baseará na implementação de uma interface com o sistema de potência, que faça a digitalização dos sinais amostrados e os envie pela rede a uma estação receptora. O diagrama ilustrativo é mostrado na figura 2.

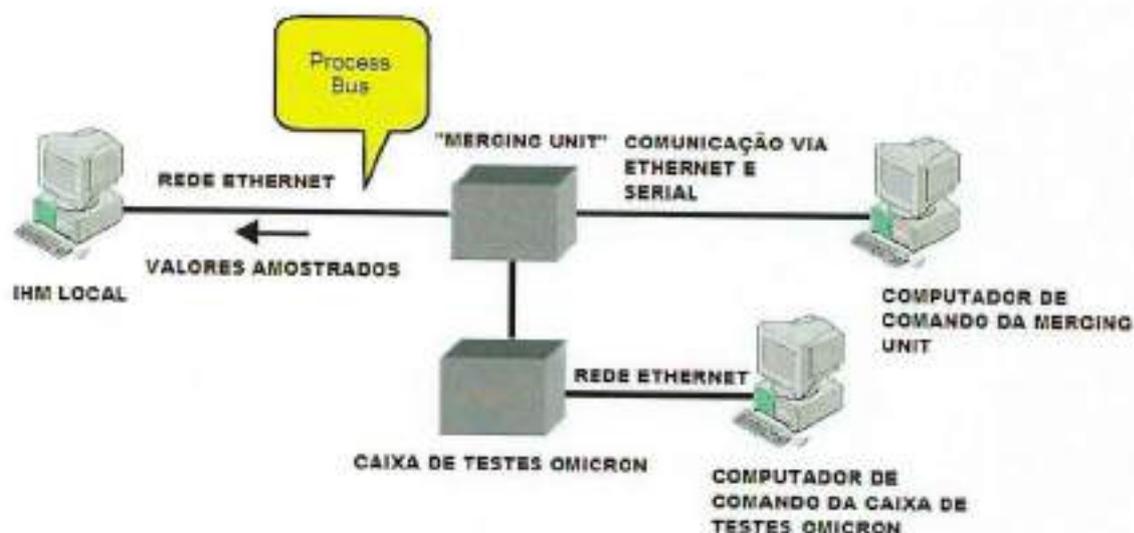


Figura 2. Diagrama ilustrativo do projeto a ser realizado.

Nesse esquema, destacam-se os componentes:

Merging unit: dispositivo cuja função é tomar as amostras dos sinais de tensão e corrente gerados pela caixa de testes OMICRON, digitalizar essas amostras segundo taxa de amostragem pré-estabelecida (16 amostras por ciclo de 60 Hz), e enviar periodicamente essas amostras pela rede Ethernet. O dispositivo utilizado consiste na adaptação de uma plataforma de hardware

disponível no LPROT e inicialmente desenvolvida para implementação de um relé diferencial. A explicação de funcionamento de uma *merging unit* e a descrição do hardware utilizado no laboratório serão feitos posteriormente.

Computador de comando da *merging unit*: equipamento onde será programada a *merging unit* e onde se dará os comandos necessários ao seu funcionamento. A programação do firmware da *merging unit* foi realizada neste computador e o carregamento do arquivo executável gerado foi feito através de comunicação serial com o equipamento ou através de protocolo tftp, via Ethernet.

Caixa de testes OMICRON: equipamento programável por software que pode gerar valores de tensão e corrente estabelecidos pelo usuário. É possível programar também alterações automáticas nos valores de tensão e corrente com o objetivo de simular um curto circuito em um sistema de potência. O software de programação utilizado para isso denomina-se State Sequencer. Ainda existe a opção de obter uma oscilografia dos valores gerados pela caixa, que utilizaremos para comparar com os valores recebidos pela IHM local.

Computador de comando da caixa de testes OMICRON: utilizado para definir os valores de tensão e corrente gerados pela caixa de testes. Nesse computador será executado o software State Sequencer, já citado anteriormente.

Rede Ethernet: meio de transmissão utilizado cujas características podem ser consultadas na norma IEC 8802-3 e IEEE 802.3. A norma IEC 61850 especifica essa rede para transmissão dos valores amostrados e outros sinais importantes em um sistema de automação, devido a sua alta velocidade.

IHM Local: computador receptor das mensagens, no qual será implementado um software (oscilógrafo) para reconhecimento dos valores transmitidos e disposição desses valores em algum formato interpretável por operadores do sistema de automação.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A NORMA IEC-61850

2.1 Desenvolvimento dos sistemas de automação de subestações

No início, os primeiros sistemas de automação eram constituídos por equipamentos eletromecânicos que interviam e tomavam as informações do sistema de potência. A interface homem – máquina, os sistemas de armazenamento e os outros equipamentos da subestação consistiam em grandes painéis e dispositivos, todos interligados por uma grande quantidade de cabos, fios e circuitos auxiliares. Esses sistemas foram sendo substituídos progressivamente por sistemas eletrônicos, que apresentavam tamanhos reduzidos e podiam realizar muitas das funções dos sistemas eletromecânicos; mas ainda assim a automação de subestações exigia muitos fios de ligação e circuitos auxiliares para que fossem implementadas as funções específicas.

Com o surgimento da eletrônica digital, temos que ainda nos tempos atuais, os equipamentos eletrônicos estão sendo substituídos por sistemas digitais. A possibilidade de processamento dos sinais digitais manipulando-se enormes quantidades de dados deu origem a modernos equipamentos multifuncionais que centralizaram as funções de medição, automação, controle e proteção de uma subestação, antes realizadas por circuitos dedicados. Também o advento das redes de comunicação digitais possibilitou que a coordenação entre esses dispositivos de proteção (agora chamados de IED's – Intelligent Electronic Devices) utilizassem menos fiação de interligação e circuitos auxiliares, valendo-se de apenas alguns cabos por onde circulava toda a informação pertinente ao sistema de potência. Com isso, os sistemas com equipamentos digitais ganharam em confiabilidade, eficiência, reduziram custos de manutenção e instalação e houve uma evolução muito grande na automação e na proteção. Os painéis gigantes que constituíam a interface

homem-máquina foram sendo substituídos por computadores, dispositivos de armazenamento e *switches*, que são menores, possuem interfaces configuráveis e permitem a troca de dados da subestação com agentes fisicamente externos a esta em tempo quase real. Permitem também que esses agentes possam comandar o sistema remotamente, em alguns casos tendo prioridade de comando sobre os agentes internos à subestação.

Como já foi dito, com os sistemas digitais, a quantidade de cabos e fios foi drasticamente diminuída, mas ainda existem em grande quantidade na parte de interface com o processo: junto aos transformadores de corrente e tensão (que convertem essas grandezas medidas no sistema de potência em um nível menor, adequado para a amostragem pelos IED's), junto aos disjuntores e atuadores do processo (que recebem os comandos através dos IED's e influem no circuito de potência), etc... A previsão é que esses equipamentos, no futuro, possuam um nível cada vez mais avançado de amostragem dos sinais, digitalização e processamento dos mesmos ainda no local de interface com o processo. Assim, todo o sistema se comunicará apenas através de cabos de rede e fibras ópticas, o que daria ainda mais confiabilidade e eficiência ao mesmo, economizaria em custos e permitiria uma centralização no processamento dos dados, na coordenação da automação e da proteção e no controle remoto da subestação.

A figura 3 ilustra o desenvolvimento histórico dos sistemas de automação:

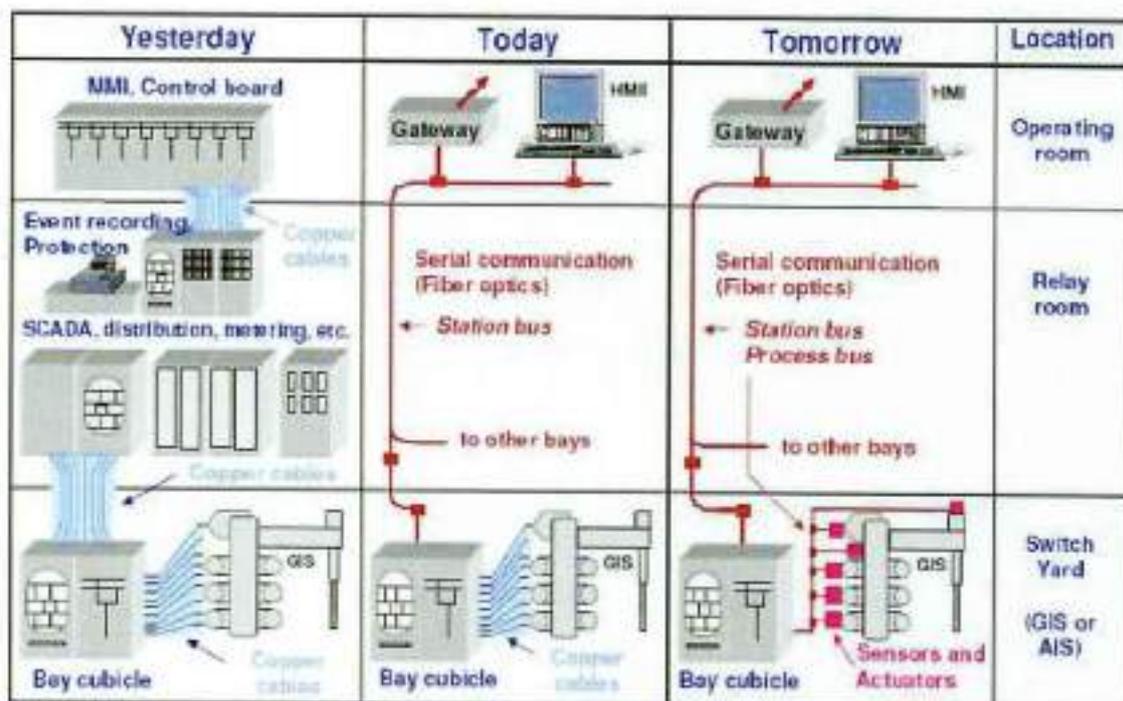


Figura 3. Desenvolvimento histórico dos sistemas de automação [2].

2.2 Desenvolvimento da norma IEC 61850

Com todo esse desenvolvimento tecnológico o cenário mercadológico mundial, constituído de grandes empresas globais vendendo e comprando sistemas e equipamentos modernos para automação e proteção, passou a conviver com mais um problema: como garantir a operabilidade de um sistema com equipamentos de diferentes fabricantes permitindo a um cliente ter um sistema de automação que, independentemente dos fornecedores, tenha a melhor relação custo-expectativa em longo prazo sem deixar de satisfazer alguns requisitos básicos de proteção?

Até então, com o advento da comunicação em rede entre os IED's e destes com as interfaces homem – máquina, cada fabricante adaptava o equipamento apenas a seus próprios protocolos de comunicação e concebia o produto segundo filosofias próprias de automação e proteção. Existiam

sistemas mais centralizados, onde poucos dispositivos concentravam os dados e o processamento, e descentralizados, onde vários pontos do sistema recebiam dados, processavam e enviavam comandos. O cliente, ao se comprometer com uma solução proposta por um fabricante, ficava preso a essa solução, dado que a manutenção ou troca de um simples equipamento podia comprometer toda a automação. A competição entre os fabricantes ficava então, comprometida.

Com tudo isso, era necessário que fosse definido um padrão ou norma que possuísse essas qualidades (permitisse comunicação entre dispositivos de fabricantes diversos e suportasse várias filosofias de automação e proteção). Com o rápido avanço da tecnologia e mudança de conceitos de sistemas ligados a ela, também se esperava que esta norma fosse "à prova de futuro", ou seja, apresentasse definições e soluções independentes de quaisquer implementações possíveis, tratando os elementos do sistema de automação e proteção da forma mais abstrata possível. Assim, uma evolução tecnológica futura (novos protocolos, novos dispositivos físicos, etc...) que alterasse a configuração dos sistemas de automação não provocaria revisões e mudanças na norma. Para que isso pudesse acontecer, essa nova tecnologia deveria mudar o modo como é descrito o sistema de automação, o que significaria uma verdadeira revolução nesse campo.

Em uma primeira análise genérica, as características de um sistema de automação podem ser divididas nas seguintes categorias:

- Dispositivos
- Funções
- Conexões
- Dados
- Comunicação
- Arquitetura

E a solução encontrada pela norma IEC 61850 foi que os dispositivos e as funções ficaram a cargo dos fabricantes e da livre concorrência entre eles, enquanto que o cabeamento (associado às conexões) e a troca de dados (associados às duas últimas categorias) seriam os itens para os quais se buscava uma padronização através dessa norma.

É bom dizer que antes da IEC 61850 foram feitas algumas tentativas de especificação de sistemas de automação, voltados para subestações de energia e outros processos, como as especificações UCA 1.0 e UCA 2.0. Todas essas tentativas geraram um grande acúmulo de conhecimento, que culminou na norma que será discutida aqui. O histórico desse desenvolvimento pode ser consultado em [1].

Embora a norma contenha definições abstratas dados, serviços e comunicação, ela dá sugestões de protocolos e algumas tecnologias atuais de implementação, de acordo com o atual estado da arte da automação de subestações. Porém, o stakeholder envolvido com o sistema é livre para utilizar protocolos e tecnologias de sua escolha, sendo que isso não deve afetar o desempenho do sistema cuja automação segue os padrões IEC 61850. As especificações de protocolos de comunicação, por exemplo, consistem em um conjunto onde cada protocolo possa ser utilizado em cada uma das 7 camadas de comunicação (na IEC 61850 foi utilizado o modelo OSI-ISO de camadas de dados), sendo que, para algumas aplicações, pode-se utilizar menos do que essas 7 camadas em trocas de dados via rede.

2.3 Objetivos almejados para os sistemas de automação de subestações

Modelagem compreensível das funcionalidades e da comunicação dos equipamentos pertencentes à subestação: Possibilidade de acesso à descrição da função de um equipamento (IED) dentro do sistema, de modo que

ele possa ser substituído por outro, de outro fabricante, sem que as funções de coordenação do sistema sejam comprometidas.

Auto descrição: Os IED's e equipamentos deveriam ser descritos de acordo com suas capacidades e parâmetros de comunicação em uma linguagem comum. Assim, os clientes (computadores) de rede que precisarem acessar dados dos IED's não precisariam ser configuradas para acessar cada IED de cada fabricante de forma diferente. Isso reduziria o esforço no desenvolvimento dos aplicativos instalados nesses clientes.

Equipamentos do sistema de potência dotados de capacidade de comunicação, aquisição de dados e controle: Essas características estariam embutidas nesses dispositivos e eles se comunicariam através de uma LAN (*Local Area Network* – Rede de área local).

Integração do sistema de automação: Definida como "captura eficaz dos dados de forma a reduzir o número de sistemas e dispositivos necessários, reduzindo assim os custos em investimento e operação da subestação" [1].

Redução de fiação convencional: Com os equipamentos de potência acompanhados por "*merging units*" comunicando-se através de LAN's, a tendência é comunicar todos os dados através de um único fio de rede, ao invés de um par dedicado a cada grandeza a ser comunicada/medida.

High-speed LAN: Com a implementação dessas especificações, a automação e proteção de uma subestação possuiriam alguns serviços que exigiriam comunicação em alta velocidade, o que pode ser conseguido através de uma LAN com boa performance. Por exemplo, quando há aumentos súbitos de tensão, curtos-circuitos ou transitórios na rede. Além disso, existem serviços disponíveis para aumentar ainda mais o desempenho da LAN, como definição de mensagens prioritárias e criação de VLANS (separação de rede através de enlaces lógicos) dos quais a proteção também pode se aproveitar.

A norma IEC 61850 não surge em caráter obrigatório. Seu sucesso depende do reconhecimento dos clientes e dos fabricantes. Assim, pode-se dizer que o alcance desses objetivos vai depender, além da adoção da norma, de cada projeto particular de sistema de automação.

2.4 Conceitos referentes a IEC 61850

2.4.1 Uso da rede Ethernet para comunicação e os protocolos de troca de dados

A norma IEC 61850 sugere o uso do protocolo Ethernet (camadas Física e Enlace de Dados) para comunicação de dispositivos. Assim, tenta-se garantir a maior taxa de comunicação a um menor custo possível. Com tamanha taxa de transferência de dados, é possível a comunicação entre dispositivos descentralizada (de forma *peer-to-peer*). Ensaios e simulações feitos no início da fase de teste das especificações mostraram que, mesmo em condições de alto carregamento de dados na rede, a comunicação entre os IED's e as funções de automação relacionadas tem atendido os requisitos mínimos de proteção de subestações.

2.4.2 IEC 61850 ACSI - Abstract Communication Service Interface (Interface Abstrata para Serviços ou Tarefas de Comunicação)

O capítulo 7-2 da IEC 61850 [3] define e descreve um conjunto de serviços abstratos de comunicação pertinentes a qualquer rotina possível de troca de dados no ambiente de uma subestação. Esse conjunto de serviços é denominado ACSI (Abstract Communication Service Interface). A definição "abstrata" é dada porque não depende de nenhum tipo de software, hardware ou norma existente, operando acima do modelo ISO de 7 camadas. São serviços a serem desempenhados ("mapeados") através de um conjunto de parâmetros (padrões e requisitos físicos) que irão disciplinar o funcionamento da subestação. Atualmente, a norma IEC-61850 faz uso do padrão MMS

(*Manufacturing Message Specification* – Mensagem de Especificação de Manufatura) para especificar a maior parte dos serviços previstos no ACSI.

A tabela 1 faz uma descrição breve dos modelos e serviços ACSI:

| Modelo | Descrição |
|--|---|
| Servidor | Representa o comportamento visível externo do dispositivo. |
| Acesso a dados | Provê os meios para acessar os objetos de informação existentes em campo. |
| Dispositivo Lógico | Representa um grupo de funções agrupadas como um dispositivo lógico. |
| Nó Lógico | Representa função específica do sistema de subestações. Ex: proteção de sobre-tensão. |
| Configuração do grupo de controle | Define como mudar os grupos de parâmetros ativos nos relés. |
| Notificação automática ou log | Descreve as condições para gerar notificações automáticas, seja periódicas ou disparadas por eventos, bem como o registro de eventos. |
| Transmissão de Valores amostrados | Transferência rápida e cíclica de amostras. Ex: Transformadores de instrumentação. |
| Controle | Descreve os modos de controle. Ex: controle direto ou SBO (<i>select before operation</i> – selecionar antes de operar) |
| Sincronização | Provê uma base de temporização para o sistema. |
| Transferência de arquivos | Define o intercâmbio de grandes blocos de dados. |
| Sistema de transmissão por eventos GOOSE | Provê uma distribuição rápida e confiável de dados: intercâmbio de dados binários no modelo <i>peer-to-peer</i> entre IED's |

Tabela 1: Descrição dos modelos e serviços ACSI.

2.4.3 Nó Lógico (*Logical Nodes*)

O principal conceito oriundo da IEC 61850 é a forma como os componentes de uma subestação são descritos e referenciados pelo sistema de automação. Os dispositivos presentes na subestação são modelados

através de nós lógicos e os dados referentes a esses dispositivos são atributos referentes aos nós lógicos. Cada nó lógico é um tipo abstrato de dados estruturado de uma maneira diferente. Como consequência, as funções de proteção, automação, comunicação, entre outras, dentro de uma subestação são modeladas como operadores que realizam o intercâmbio de dados entre nós lógicos diferentes, causando uma interdependência entre esses atributos. Assim sendo, os atributos de um nó lógico podem ser modificados por funções desempenhadas na subestação, por agentes externos, etc... Da correlação entre as funções e os nós lógicos, pode-se dizer que as funções são constituídas por nós lógicos e existem literaturas, tais como [1] e [2], que definem nó lógico como a menor parte de uma função responsável pelo intercâmbio de dados.

2.4.4 GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Events*)

GOOSE refere-se à especificação da comunicação em rede entre os dispositivos (comunicação *peer-to-peer* entre os IED's). No ambiente de uma subestação, as funções de proteção e automação exigem que essa comunicação seja rápida e eficiente.

A comunicação *peer-to-peer* (no nível dos IED's) tem os seguintes requisitos:

- Deve ser protegida em relação a falhas de comunicação;
- Deve receber prioridade de rede em situações críticas, como a comunicação de um curto-circuito;
- Permitir comunicação instantânea de eventos aleatórios no tempo;
- Deve ser altamente confiável.

A mensagem GOOSE baseia-se na transmissão assíncrona, do estado de saídas ou entradas digitais ou do estado de algum dado ou conjunto de dados internos de um IED a outro. O IED receptor utiliza a informação recebida para determinar qual ação de proteção é mais viável naquele instante, de acordo com a sua programação.

Alguns dados (trips, bloqueios) devem ser transmitidos rapidamente com alta confiabilidade. Para alcançar elevada confiabilidade, o IED manda repetidamente mensagens comunicando algum estado até haver alguma mudança nesse estado. O serviço tem a demanda mais lenta de 4 ms, sendo um serviço de tempo crítico. Não há confirmação de recebimento das mensagens e as falhas são evitadas através de um mecanismo de repetição de envio, que se torna mais freqüente quando existe alguma mudança nos dados do *dataset*. *Dataset*, neste caso, é o conjunto das informações enviadas pelo IED à rede.

As mensagens são enviadas no modo multicast. Desse modo, cada IED consegue ter acesso ao estado dos demais IED's da subestação. Cada mensagem tem um tempo de vida, um prazo de validade, após o qual a informação contida expira, perde a confiabilidade. Também se pode configurar a prioridade de tráfego na rede para determinadas mensagens.

A mensagem GOOSE contém informações que permitirão ao IED receptor saber se uma mensagem foi perdida, se algum status foi modificado e o tempo decorrido desde o recebimento da última modificação de status. Por ser um tipo de comunicação sem confirmação e dependente do receptor, pode-se conectar qualquer dispositivo à rede sem haver hardware ou software adicional e configurá-lo (qualquer dispositivo da rede pode solicitar o recebimento de mensagens de outros dispositivos ou bloquear o recebimento para determinados dispositivos) para receber as informações via mensagens GOOSE e a partir disso e de sua programação interna, influir na automação e proteção da subestação.

2.4.5 Descrição de sistemas de automação de subestações (SCL - Substation Configuration Language)

Dentro da IEC 61850 foi criada uma linguagem para descrição formal do Sistema de Automação da Subestação, baseada em XML - *Extended Markup Language* (Linguagem de Marcação Extensível). Qualquer IED poderá então ser configurado e ter sua configuração acessível através do acesso a um arquivo em formato padronizado. Os sistemas de engenharia deverão ter acesso às configurações de quaisquer dispositivos do sistema, independentemente do fabricante. Também seriam descritos todos os dados necessários para definir parâmetros de sistema para um IED, suas funções dentro da subestação e o seu lugar na rede de comunicação utilizada. Busca-se então a configuração e descrição de três aspectos relacionados ao sistema de automação como um todo:

- A descrição das funcionalidades previstas nos IED's de um modo geral;
- A descrição das funcionalidades dos IED's utilizadas na automação do sistema em questão;
- A relação dessas funcionalidades com o sistema (comunicação, topologia, funções de automação, etc...);

A norma definiu a partir dessa linguagem, três tipos de arquivos a serem gerados e armazenados pelos IED's e pelo sistema de engenharia da subestação.

- Um arquivo para descrição formal e sem ambigüidades das capacidades dos dispositivos. (ICD - *IED Capability Description* ou Descrição das Capacidades do IED);

- Um arquivo para descrição formal e sem ambigüidades dos serviços de comunicação prestados. (SCD - *System Configuration Description* ou Descrição da Configuração do Sistema);
- Um arquivo para descrição formal das relações entre os dispositivos na subestação e das funções desempenhadas pela subestação (SSD - *System Specification Description* ou Descrição das Especificações do Sistema);

Com esses arquivos padronizados consegue-se que um IED possa ser especificado a partir das tarefas desempenhadas no sistema. Adquirindo-se um IED de qualquer fabricante e a partir de um arquivo de configuração já pronto e padronizado, faz-se com que o IED seja adaptado ao sistema sem perda de desempenho.

2.4.6 Transmissão de Valores Amostrados (SV - Sample Values)

Os serviços de comunicação em rede abordados pela IEC 61850 incluem a transmissão de valores amostrados. O escopo da norma IEC 61850 prevê a comunicação digital com os disjuntores, equipados com transformadores eletrônicos não convencionais de corrente e tensão e interface de comunicação digital. Esse tipo de transformador e interface são definidos de acordo com a norma IEC 60044 e serão apresentados posteriormente, cabendo a IEC 61850 definir a forma e o ambiente de comunicação. A informação é transmitida continuamente, em um fluxo contínuo de amostragens. Caso não haja sincronismo na aquisição dos valores, a informação de tempo entre as amostragens deverá ser acrescentada aos dados transmitidos. Essa informação deverá ser precisa para a comparação de formas de onda senoidais ou para o cálculo de fasores.

Basicamente, esse tipo de mensagem tem os mesmos requisitos que as mensagens GOOSE sendo que existe um barramento (Process Bus) quase que exclusivo para a recepção das amostras, que devem ser diferentemente sincronizadas para cada dispositivo transmissor. Assim como as mensagens GOOSE, os SV's são enviados sem permissão e é configurado um conjunto de valores a serem transmitidos (dataset) por dispositivo. A mensagem contendo a grandeza amostrada deve ser identificada e enumerada ordenadamente, o que garante a detecção de falhas e separação das amostragens por fonte. A transmissão dessas mensagens pode ser feita em modo unicast ou multicast. O esquema de prioridade a certos tipos de mensagem é feito respeitando-se o padrão IEE 802.1 para definição de prioridades.

O sistema de comunicação deve ser sensível à falhas e a confiabilidade das mensagens deve expirar após algum período de tempo subsequente à transmissão. O receptor deve ser capaz de detectar erros de amostragem e correlacionar amostragens vindas de diferentes transmissores dentro do sistema de potência. O maior tempo de atuação a partir do uso do SV deve ser compatível com o menor tempo obtido utilizando-se fiação tradicional. As eventuais falhas de transmissão são compensadas por interpolações e algoritmos de proteção presentes no receptor.

3. CONCEITOS REFERENTES À TRANSMISSÃO DE VALORES AMOSTRADOS (SV - SAMPLE VALUES)

3.1 Introdução

A norma IEC 60044-8, como pode ser visto na referência [3], define uma *merging unit* para transformadores eletrônicos de tensões e correntes, assim como a especificação para o encapsulamento dos dados advindos desta *merging unit*. Nesta norma já existem menções a norma IEC 61850, que especifica o encapsulamento de todo o pacote SV dentro de um ambiente Ethernet de transmissão, o que implica a transmissão de mais alguns bits além dos correspondentes as amostragens. Além disso, a norma IEC 61850 define características concernentes a mensagens SV como tempo crítico, não necessidade de confirmação, entre outras. Será analisada agora a transmissão de valores amostrados a partir da abordagem da norma IEC 60044-8 e da norma IEC 61850-9.1 [5].

3.2 A norma IEC 60044-8 e o transformador eletrônico

3.2.1 Modelagem do transformador eletrônico e da *merging unit*

A norma IEC 60044 tem como objeto os transformadores de medida ou medição. Eles são definidos como transformadores destinados a fornecer sinal propriamente adaptado aos instrumentos de medida, relés, IED's e dispositivos similares. Seu capítulo 8 detém-se sobre os transformadores eletrônicos de

corrente com saídas analógicas ou digitais, para uso conjunto com instrumentos de medição e proteção nas frequências de 15 Hz a 100 Hz.

O diagrama de blocos que descreve um transformador eletrônico é mostrado na figura 5.

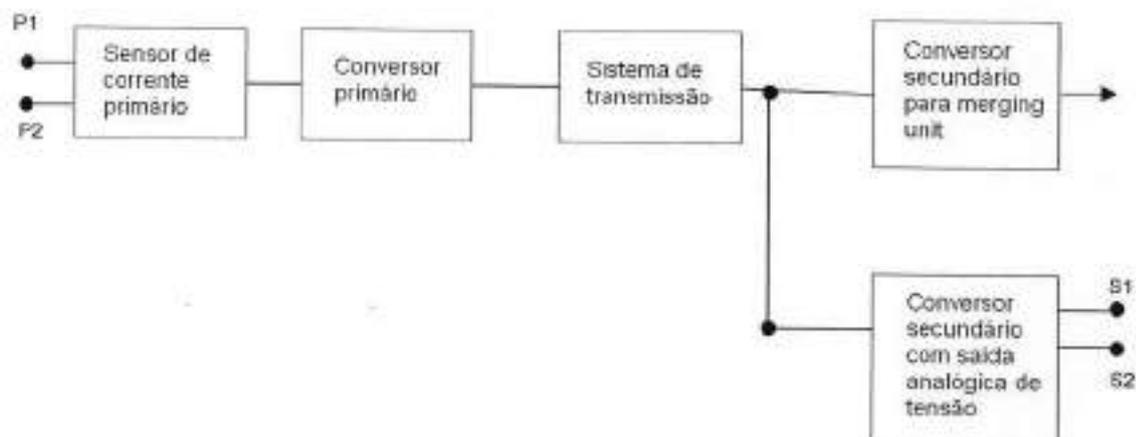


Figura 4: Diagrama de blocos de um transformador eletrônico

Podemos notar os seguintes blocos:

Sensor primário de corrente/tensão: transdutor com sinal proporcional à corrente passante na interface do equipamento com o sistema de potência. O princípio de transdução pode ser elétrico, óptico, entre outros.

Conversor primário: parte cuja função é converter o sinal vindo de um ou vários sensores em um outro tipo de sinal, passível de transmissão até o nível secundário. O conversor primário e o sensor primário podem necessitar de uma fonte de energia elétrica para o devido funcionamento. No nosso projeto, o conversor primário serão as bobinas e os materiais ferromagnéticos dos transformadores de tensão e corrente.

Sistema de Transmissão: meio de transmissão dos sinais entre dispositivos primários (que fazem interface com o sistema de potência) e secundários (que fazem interface com os sistemas subseqüentes). No nosso projeto, utilizaremos um transformador de abaixamento de tensão e um

transformador de corrente. O sistema de transmissão será então o meio ferromagnético do núcleo.

Conversor Secundário: converte o sinal vindo do sistema de transmissão (proporcional à corrente medida na parte primária) em um sinal compatível com o sistema que fará uso dessas medidas (proteção, medição, etc...). A saída do conversor secundário pode ser digital, que é o caso deste projeto, ou analógica. O conversor secundário pode necessitar de uma fonte de energia elétrica para desempenhar corretamente suas funções, que poderá ser da mesma natureza e combinada com a fonte de energia dos equipamentos primários. No nosso projeto, os conversores secundários serão as bobinas do secundário dos transformadores, descritos posteriormente. Além disso, não faz parte do escopo do projeto utilizar conversores no secundário com saídas analógicas de tensão. Utilizaremos apenas o conversor que alimentará a *merging unit*. A definição de *merging unit*, segundo a norma IEC 60044-8 é de um dispositivo que, ao receber diversos sinais de tensão do secundário, proporcionais a várias grandezas medidas, tem por função de amostrar esses sinais simultaneamente, digitalizar essas amostras e dispor, de forma ordenada, essas amostras na saída para uso do sistema de transmissão ou de outros dispositivos.

Muitas saídas digitais de transformadores eletrônicos (até 7 saídas de corrente e até 5 saídas de tensão) poderão ser conectadas em uma *merging unit*, conforme a figura 6.

A *merging unit* tem a função de disponibilizar essas amostragens em uma seqüência definida na saída digital (*digital output*), podendo acrescentar ainda a informação de tempo e de correlação seqüencial das amostragens a partir da entrada de *clock* (*Clock Input*). Na figura 6, podemos ver que os seguintes sinais são passíveis de amostragem e digitalização pela *merging unit* nas condições da norma, são:

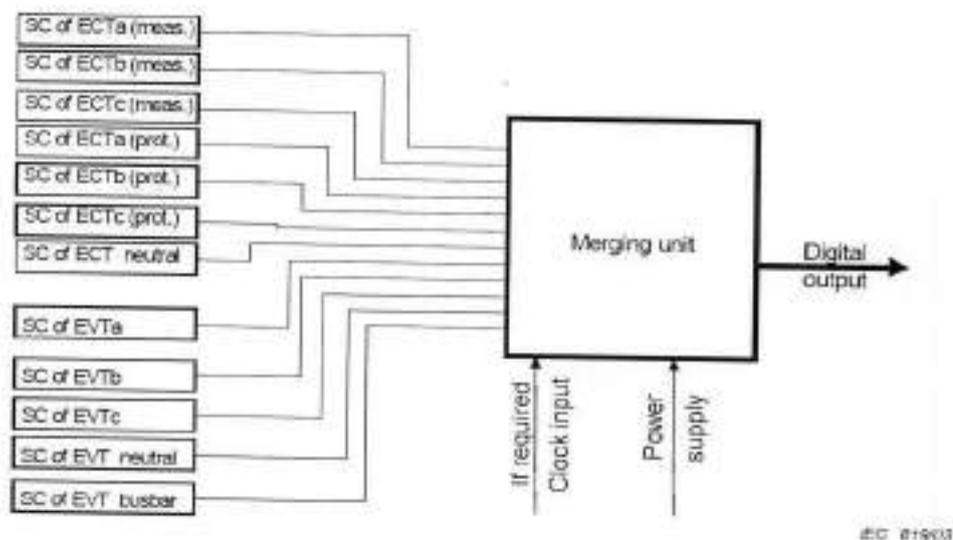


Figura 5: Diagrama relacionando a *merging unit* e sinais passíveis de digitalização, de acordo com [4].

- Correntes de fase, cujo monitoramento seja voltado à medição (*meas.* ou *measure*) precisa dessa grandeza (na figura 3 as entradas da *merging unit* correspondentes a essa grandeza são dadas por *SC of ECTa*, *SC of ECTb* e *SC of ECTc* onde *SC* significa *source* ou fonte, *ECT* significa *Eletronic Current Transformer* ou Transformador de Corrente Eletrônico e as letras adicionais representam as fases do sistema elétrico);
- Correntes de fase, cujo monitoramento seja voltado à proteção (*prot.* ou *protection*) do sistema elétrico (na figura 3 as entradas da *merging unit* correspondentes a essa grandeza são dadas por *SC of EVTa*, *SC of EVTb* e *SC of EVTc* onde *SC* significa *source* ou fonte, *EVT* significa *Eletronic Voltage Transformer* ou Transformador de Potencial Eletrônico e as letras adicionais representam as fases do sistema elétrico);
- Corrente de neutro (*SC of ECT neutral*);
- Tensões de fase (na figura 3 as entradas da *merging unit* correspondentes a essa grandeza são dadas por *SC of EVTa*, *SC of EVTb* e *SC of EVTc* onde *SC* significa *source* ou fonte, *EVT* significa

Electronic Voltage Transformer ou Transformador de Potencial Eletrônico e as letras adicionais representam as fases do sistema elétrico);

- Tensões de neutro (*SC of ECT neutral*);
- Tensão na barra de amostragem em relação à referência (*SC of ECT busbar*);

A diferenciação entre as fontes para correntes com fins de proteção e fins de medição deve-se aos diferentes requisitos que cada aplicação exige. No nosso projeto utilizaremos o mesmo sensoriamento para as duas correntes, diferenciando-as apenas nos fatores de escala aplicados pela *merging unit*, que serão apresentados mais adiante. Porém, em aplicações reais, o sensoriamento voltado à medição deve possuir boa resposta em frequência enquanto o sensoriamento voltado à proteção deve estar voltado a medir uma ampla faixa de amplitudes de corrente.

3.2.2 O dataset produzido pela *merging unit*

A saída digital da *merging unit*, de acordo com a norma IEC 60044-8 consiste no conjunto de amostras dessas medidas e mais algumas informações de controle e configuração, constituindo um dataset, que é mostrado no diagrama da figura 7.

Cada canal de dados contém a codificação em 16 bits da medição instantânea de uma das grandezas já mencionadas, sendo que a disposição das medições em relação aos canais de dados pode variar dependendo de cada aplicação. Esse dataset contém, além dos canais de dados, os seguintes campos:

| | |
|---------|---|
| Byte 1 | Comprimento em bytes do dataset (44 bytes) |
| Byte 2 | |
| Byte 3 | Logical Node Name |
| Byte 4 | Dataset Name |
| Byte 5 | |
| Byte 6 | Logical Device Name |
| Byte 7 | |
| Byte 8 | Valor nominal da corrente de fase |
| Byte 9 | |
| Byte 10 | Valor nominal da corrente de neutro |
| Byte 11 | |
| Byte 12 | Valor nominal da tensão de fase |
| Byte 13 | |
| Byte 14 | Tempo de atraso avaliado |
| Byte 15 | |
| Byte 16 | Canal de dados 1 |
| Byte 17 | |
| Byte 18 | Canal de dados 2 |
| Byte 19 | |
| Byte 20 | Canal de dados 3 |
| Byte 21 | |
| Byte 22 | Canal de dados 4 |
| Byte 23 | |
| Byte 24 | Canal de dados 5 |
| Byte 25 | |
| Byte 26 | Canal de dados 6 |
| Byte 27 | |
| Byte 28 | Canal de dados 7 |
| Byte 29 | |
| Byte 30 | Canal de dados 8 |
| Byte 31 | |
| Byte 32 | Canal de dados 9 |
| Byte 33 | |
| Byte 34 | Canal de dados 10 |
| Byte 35 | |
| Byte 36 | Canal de dados 11 |
| Byte 37 | |
| Byte 38 | Canal de dados 12 |
| Byte 39 | |
| Byte 40 | Identificador de estado 1 |
| Byte 41 | |
| Byte 42 | Identificador de estado 2 |
| Byte 43 | |
| Byte 44 | Contador de Amostras |
| Byte 45 | |
| Byte 46 | Reservado para especificações da norma IEC 61850. |

Figura 6: Dataset disponibilizado pela *merging unit*

Comprimento em bytes do dataset, excluindo-se o comprimento deste próprio campo: o valor desse parâmetro depende da aplicação e de quantos canais de dados serão ocupados.

Logical Node Name (Nome do nó lógico): o significado deste campo está intimamente ligado com a definição de nó lógico feito pela norma IEC 61850. O valor padrão para esse campo é 02 (decimal), para comunicações ponto-a-ponto, que é o caso do nosso projeto.

Dataset name: número que identifica a estrutura do dataset e a ocupação dos canais de dados, ou seja, a relação entre os canais de dados e

as amostras das grandezas medidas. Os números decimais permitidos para esse campo são 01 (*dataset* universal) e 254 (*dataset* flexível e configurável). Na nossa aplicação, utilizaremos o *dataset* universal como especificado nas normas IEC 60044-8 e IEC 61850-9.1, cuja relação entre canais digitais e grandezas medidas é dada na tabela 4.

| Canal de dados | Grandeza medida |
|----------------|-------------------------------|
| 1 | Corrente na fase A - proteção |
| 2 | Corrente na fase B - proteção |
| 3 | Corrente na fase C - proteção |
| 4 | Corrente de neutro |
| 5 | Corrente na fase A - medição |
| 6 | Corrente na fase B - medição |
| 7 | Corrente na fase C - medição |
| 8 | Tensão na fase A |
| 9 | Tensão na fase B |
| 10 | Tensão na fase C |
| 11 | Tensão de neutro |
| 12 | Tensão na barra de amostragem |

Tabela 2. Configuração dos canais de dados do *dataset* universal.

O *dataset* definido pelo número 254 é definido, sendo utilizado em várias aplicações e detalhado profundamente na norma IEC 61850-9.2, como pode ser visto na referência [6].

Logical Device Name (nome do dispositivo lógico): utilizado como identificador do dispositivo que envia a mensagem. Pode assumir qualquer valor entre 0 e 65535.

Valores nominais das correntes de fase e neutro: contém os valores nominais das correntes no circuito transmitido. As amostras a serem transmitidas são codificadas primeiramente através dos seus valores nominais, sendo referenciadas em relação a estes. O valor a ser colocado nestes campos é opcional, devendo-se transmitir zero (decimal) quando o campo não for

preenchido. Neste caso, o receptor deve estar configurado para não decodificar a amostra com base na corrente nominal.

Valor nominal da tensão de fase: Reservado ao valor da tensão nominal, valor eficaz, em $\frac{kV}{10.\sqrt{3}}$, do ponto de sistema monitorado. Como as tensões nominais dos sistemas são geralmente dadas em tensões de linha, a multiplicação por $\sqrt{3}$ evita erros de truncamento na passagem entre tensões de linha e de fase e a multiplicação por 10 otimiza a representação das tensões em conjuntos de 16 bits. Para exemplificar, um sistema com tensão de linha de 145 kV terá a seguinte representação nesse campo.

$$\frac{145}{\sqrt{3}} kV . \sqrt{3} . 10 = 1450 . \frac{1}{\sqrt{3} . 10 . KV}$$

Logo, nesse campo será colocado o número 1450.

Tempo de atraso avaliado: tempo de atraso nominal do sistema, dado em microssegundos.

Contador de amostras: permite ao dispositivo receptor ordenar as amostras recebidas em instantes de tempo próximos. Essa característica pode ser importante se o dispositivo estiver recebendo amostras de mais de uma *merging unit*. Também o dispositivo receptor se certifica que os valores pertencentes ao dataset estão sendo atualizados frequentemente. Esse campo pode conter qualquer valor entre 0 e 65535.

A *merging unit* transmite diversos tipos de medição de um mesmo local do sistema de potência (como correntes e tensões nas três fases e no neutro) através de um único meio físico.

Identificadores de estado 1 e 2: Duas cadeias de 16 bits, onde cada um dos bits representa uma informação referente ao estado do sistema de amostragem, como indicam as tabelas 7 e 8. Quando um dos sensores pára de funcionar os bits de manutenção, e o estado do correspondente canal digital, devem indicar a falha (bit 1).

| Bit | Significado | Estados | Observações |
|-----|-----------------------------------|--|--|
| 0 | Manutenção necessária | 0: sistema ok 1: manutenção necessária | Bit pode ativar aviso visual ou sonoro |
| 1 | Modo de Operação | 0: operação normal 1: testando | |
| 2 | Indicador de wake-up do sistema | 0: modo normal 1: wake-up | Bit é setado em período de wake-up. |
| 3 | Método de sincronização | 0: sem interpolação 1: com interpolação | |
| 4 | Indicador de sincronismo | 0: amostras sincronizadas 1: perda de sincronismo | |
| 5 | Status do canal de dados 1 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 6 | Status do canal de dados 2 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 7 | Status do canal de dados 3 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 8 | Status do canal de dados 4 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 9 | Status do canal de dados 5 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 10 | Status do canal de dados 6 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 11 | Status do canal de dados 7 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 12 | Tipo de transformador de corrente | 0: $i(t)$ 1: $\frac{di}{dt}$ | |
| 13 | Indicador de escala | 0: SCP = 01CF 1: SCP = 00E7 | SCP: scaling current protection |
| 14 | Reservado para usos futuros | | |
| 15 | Reservado para usos futuros | | |

Tabela 3. função de cada bit do indicador de estado 1 da *merging unit*. O indicador de escala (bit 13) só é variável no caso das correntes de proteção. As outras grandezas possuem fatores de escala fixos, discutidos posteriormente.

| Bit | Significado | Estados | Observações |
|-----|-----------------------------|----------------------|-------------|
| 0 | Status do canal de dados 8 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 1 | Status do canal de dados 9 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 2 | Status do canal de dados 10 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 3 | Status do canal de dados 11 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 4 | Status do canal de dados 12 | 0: Ok 1: Inválido | |
| 5 | Para usos futuros | | |
| 6 | Para usos futuros | | |
| 7 | Para usos futuros | | |
| 8 | Para uso proprietário | | |
| 9 | Para uso proprietário | | |
| 10 | Para uso proprietário | | |
| 11 | Para uso proprietário | | |
| 12 | Para uso proprietário | | |
| 13 | Para uso proprietário | | |
| 14 | Para uso proprietário | | |
| 15 | Para uso proprietário | | |

Tabela 4. função de cada bit do indicador de estado 2 da *merging unit*. Uso proprietário significa que o fabricante pode usar esse campo para transmitir dados específicos da aplicação na qual a *merging unit* é solicitada.

3.2.3 A codificação dos valores amostrados

A codificação dos valores amostrados é realizada a partir dos valores nominais de fase e de fatores de escala padronizados. A expressão que define essa codificação pode ser dada por:

$$VC = \left(\frac{VM}{VN} \right) * FE$$

Onde:

- VC: valor codificado;
- VM: valor medido;
- VN: valor nominal referente à grandeza medida;
- FE: fator de escala;

Toma-se apenas a parte inteira de VC, arredondando-se para baixo ou para cima conforme as casas decimais. O fator de escala FE é dado conforme a tabela abaixo:

| Valor do indicador de escala (bit 13 do indicador de estado 1) | TEC de medição | TEC de proteção | TEP |
|--|----------------|-----------------|------------|
| 0 | FE = 11585 | FE = 463 | FE = 11585 |
| 1 | FE = 11585 | FE = 231 | FE = 11585 |

Obs: TEC's de proteção podem medir correntes de 25 ou mesmo 50 vezes a corrente nominal do primário sem apresentar *overflow*. Já TEC's de medição e TEP's podem medir correntes até 2 vezes maiores que a corrente nominal do primário sem apresentar *overflow*. Veja que, quando mudamos o estado do indicador de escala, a faixa de medição de valores de corrente é dobrada.

Tabela 5. Fatores de escala para os "Sample Values".

O receptor deverá realizar a decodificação desse valor para ter acesso ao valor medido no ponto de amostragem. Para tanto, utilizará o valor nominal da grandeza, que vem junto com o dataset e o fator de escala, que pode ser obtido através da grandeza medida e da informação contida no identificador de estados, retirada do dataset. A expressão que representa a decodificação do valor a partir do valor codificado é:

$$VM = \left(\frac{VC}{FE} \right) * VN$$

- VC: valor codificado;
- VM: valor medido;
- VN: valor nominal referente à grandeza medida;
- FE: fator de escala;

3.3A norma IEC 61850 e a transmissão dos SV

Para as saídas digitais da *merging unit*, o capítulo 9.1 da norma IEC 61850 leva em conta uma conexão ponto a ponto e unidirecional entre a mesma até o ponto onde esses valores digitais serão utilizados, como instrumentos de medida e/ou dispositivos eletrônicos, dado que a amostragem é realizada continuamente e não há mudanças no conjunto de valores que serão amostrados (dataset). Este será o caso do nosso projeto.

O capítulo 9.2 complementa o capítulo 9.1, descrevendo e modelando todos os serviços que podem ser oferecidos e configurados com base na transmissão de valores amostrados. Nos dá a base para que possamos configurar a recepção dos valores amostrados por qualquer dispositivo do sistema de automação, por exemplo, ou como configurar, via rede, a partir de uma interface IHM, quais serão os valores a serem amostrados pela *merging unit* e enviados aos dispositivos correspondentes. Esse estudo não se utilizou destas situações ou semelhantes.

3.3.1 A IEC 61850 e o modelo OSI/ISSO de comunicação

A norma IEC 61850 define a comunicação entre os dispositivos a partir do modelo OSI/ISO. Os serviços de comunicação (muitos utilizando o padrão MMS) utilizam todas as camadas do modelo para as codificações. Já as mensagens de tempo crítico (GOOSE e SV), utilizam apenas as três primeiras camadas (Física, enlace e rede), devido as suas características próprias. Dentro desse aspecto, o diagrama do empilhamento das mensagens SV, seguindo este modelo de comunicação (OSI/ISO) é dado e comentado a seguir:

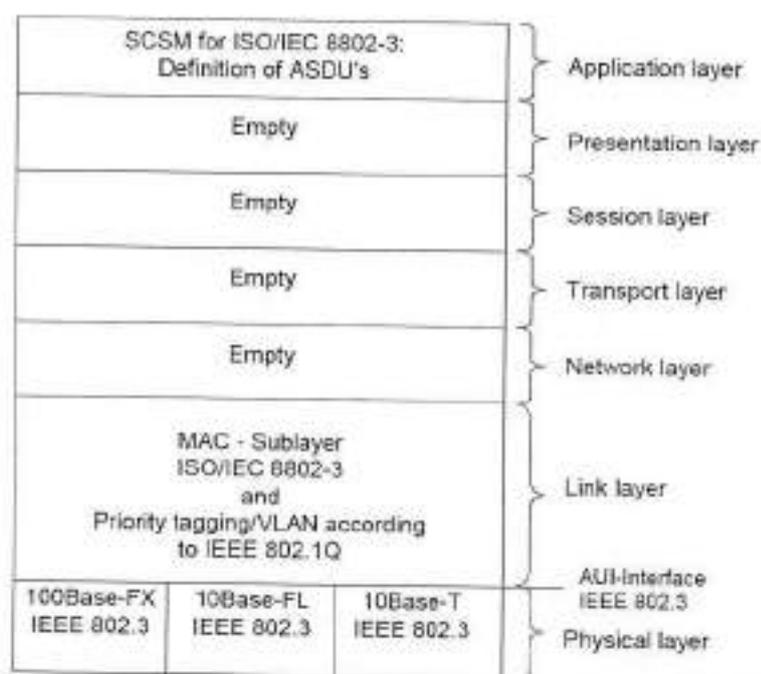


Figura 7. Diagrama de empilhamento das mensagens "Sample Values", de acordo com [5].

Camada Física (Physical Layer): no caso do uso de fibra ótica para a transmissão dos valores amostrados, a versão mais recomendada é a IEEE 802.3 100Base-FX (Fast Ethernet - fibra ótica). O sistema 10Base-FL (fibra ótica - 10 Mbps) pode ser usado para taxas de amostragem de $48 \cdot fr$ (fr - frequência da fundamental que se deseja medir). No geral, essa interface é

ideal quando mais de um dispositivo compartilha o canal de transmissão (recebe os valores amostrados). É recomendável o uso dos conectores BFOC (IEC 60874-10-1). Quanto ao uso do par trançado (cobre), o modelo de acordo com IEEE 802.3Base-T pode ser uma opção, desde que se leve em conta os efeitos eletromagnéticos associados. Esse último modelo foi utilizado no nosso estudo. Devido ao caráter experimental do projeto, não foram considerados os efeitos eletromagnéticos associados.

Camada de Enlace: O frame Ethernet, objeto de análise desta camada, será descrito posteriormente.

Camadas de Rede, Transporte e Sessão: não são utilizadas para definição e transmissão de valores amostrados.

Camadas de Apresentação e Aplicação: Um serviço de engenharia atuante no sistema de automação deve ser capaz de especificar quais valores amostrados serão enviados pela *merging unit*, qual será a taxa de amostragem para cada dataset - dentro dos limites possíveis, dentre outros serviços. A definição de um conjunto de valores a serem enviados continuamente significa a definição de um dataset. Cada um desses datasets forma uma ASDU (application service data unit) e o conjunto dessas ASDU's forma uma APDU (application package data unit). Um buffer de comunicação é definido para conter uma APDU e sua taxa de refresh terá forte relação com o número de ASDU's e com a taxa de amostragem. A definição da estrutura e do tipo de dados dos APDU's é feita baseando-se em ASN.1 (Abstract Syntax Notation).

Utilizaremos a configuração do dataset universal, definido na norma IEC 60044-8, contendo os valores mais comumente amostrados um ponto de um sistema de potência. Para inclusão de mais valores além dos definidos no dataset universal, a norma IEC 61850-9.2 deverá ser consultada. O capítulo 9.2 da norma IEC 61850 ainda contém requisitos de comunicação que permitem configurar a taxa de amostragem, incluir mais conjuntos de valores amostrados, comunicação de SV entre os IED's e inclusão de sinais de sincronismo na tomada das amostras.

Essa especificação do capítulo 9.1 e na qual reside o nosso projeto é restrita a definir a comunicação entre *merging units* acopladas a transformadores eletrônicos de tensão/corrente e dispositivos no "bay level", que necessitam desses dados em seus algoritmos internos. Apesar de ser definida uma comunicação unidirecional, entre a *merging unit* e dispositivos do "bay level", isso não exclui a possibilidade de uma comunicação bi-direcional no âmbito da rede, visando aumentar a qualidade e confiabilidade da comunicação. A comunicação bidirecional pode ser utilizada para fins como sincronização de clock, carregar configurações nos dispositivos, alternar modos de operação, etc... mas não pode alterar o modo de transmissão dos *datasets*.

3.4 Descrição do Frame Ethernet (Camada de Enlace)

Este frame mostra a definição do pacote que deverá ser enviado à rede a partir das amostras coletadas na *merging unit*. As amostras deverão ser coletadas do sistema de potência, digitalizadas e enviadas à rede da forma como simboliza a tabela 6.

Vamos a definição dos campos:

Cabeçalho Ethernet: padronizado e constante para qualquer mensagem que trafega pela rede, é o cabeçalho da mensagem.

Endereçamento (Header – Mac: Destination Address e Source Address): Como padrão, é adotado o endereçamento Ethernet broadcast (destinado a todos da mesma rede). Por essa razão (broadcast), nenhuma configuração correspondente a endereçamento é necessária no lado do transmissor. Contudo, o endereço de destino poderia ser configurado como uma característica adicional para uma aplicação alternativa, por exemplo, fazer um endereçamento multicast para conectar uma *merging unit*, através de um *switch* aos dispositivos do "bay level". Um único endereço Ethernet poderá ser

usado neste campo. O padrão, para aplicações multicast é (dado que o endereço consiste de uma série de seis octetos, divididos dois a dois):

- Os três primeiros octetos são: 01-0C-CD;
- O quarto octeto é: 01 para mensagens GOOSE, 02 para GSSE e 04 para valores amostrados;
- Os dois últimos octetos podem variar na faixa entre 00-00 e 01-FF, distinguindo endereços individuais;

| Bytes | Descrição |
|---------|---|
| 1 – 7 | Cabeçalho Ethernet |
| 8 | Início do frame |
| 9 – 14 | Endereço MAC destino |
| 15 – 20 | Endereço MAC origem |
| 21 – 22 | Identificador de Protocolo (TPID) |
| 23 – 24 | Informação de Controle (TCI) |
| 25 – 26 | Ethertype |
| 27 – 28 | Identificador de Aplicação |
| 29 – 30 | Tamanho |
| 31 – 34 | Espaços reservados (sem preenchimento) |
| 35 – 78 | Dados de Aplicação (APDU) |
| 79 – 82 | Alinhamento da mensagem e checagem de erros |

Tabela 6. Diagrama do frame Ethernet a ser enviado à rede.

Definição de mensagens prioritárias/criação de VLAN's: Criada de acordo com a especificação IEEE 802.1Q, a definição de mensagens prioritárias é utilizada para separar as mensagens de tempo crítico, que são altamente relevantes para o sistema de proteção das mensagens com menos prioridade que carregam a rede. A estrutura do identificador de protocolo e do identificador de controle, que se propõe a esses objetivos, é discutida a partir da figura 8.

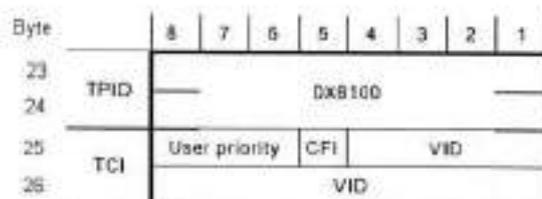


Figura 8: Identificador de protocolo e de controle do pacote Ethernet

E os subcampos envolvidos são:

TPID (Tag Protocol Identifier - Etiqueta de Identificação de Protocolo): Identifica o frame como padrão IEEE 802.1Q; O valor usual para este campo é 8100 (hexadecimal);

User priority (3 bits - entre 0 e 7): valor configurado pelo usuário. As prioridades mais altas (7 é a máxima) deverão ser de mensagens de tempo crítico, relevantes para proteção, de modo que o seu desempenho não seja afetado diante do carregamento da rede.

CFI (Canonical Format Indicator - Indicador de Formato Canônico): Se em 0, indica que o quadro está em formato canônico, com os bits menos significantes sendo transmitidos primeiro. Se em 1, indica que o formato do quadro não é canônico. Esse bit não será utilizado nas aplicações da norma (correspondendo ao valor 0).

VID (VLAN Identifier - Identificador de VLAN): Possui 12 bits para identificar a VLAN cujo domínio a mensagem pertence. O recurso de VLAN é utilizado para separar o tráfego de mensagens na rede. Caso esses bits não forem configurados, o valor padrão é 0. Recomenda-se setar esse campo com o valor 4, pois muitos pacotes que carregam a rede setam esse campo com o valor 1 automaticamente.

Os outros campos do frame Ethernet definido na IEC 61850 são descritos a seguir:

Ethertype: é um campo de 2 octetos utilizado para identificar o protocolo sob o qual a mensagem contida no frame é encapsulada. O para

mensagens SV é utilizado o valor 88BA (número na base hexadecimal), para mensagens GOOSE é utilizado o valor 88B8 e para mensagens GSSE é utilizado o valor 88B9.

APPID (Application ID - Identificador de Aplicação): Neste caso (valores amostrados) é este campo que permite distinguir as diversas aplicações de transmissão de valores amostrados. A faixa determinada para SV está entre 4000 até 7FFF (valores em hexadecimal). Se não for configurado, o valor padrão será 4000. É altamente recomendado na configuração do sistema que este valor seja o mesmo no transmissor e receptor.

Length (comprimento) - tamanho da mensagem, a partir do campo APPID.

Reserved 1/Reserved 2: Campos com 2 bytes cada um. Reservados para futuras aplicações que a norma poderá prever.

APDU (Application Protocol Data Unit): Campo de tamanho variável, onde constam os valores digitais das amostras de grandezas medidas. Será descrito posteriormente.

Frame Check Sequence (Checagem de sequência do quadro): São 4 bytes que servem para detecção e correção de erros na mensagem.

3.4.1 Descrição da Camada Ethertype APDU

Após o procedimento de amostragem terminar, a APDU, contida dentro do frame Ethernet analisado, armazenará os valores a serem transmitidos, divididos em uma ou mais ASDU's (Application Service Data Unit), conforme a figura 9:

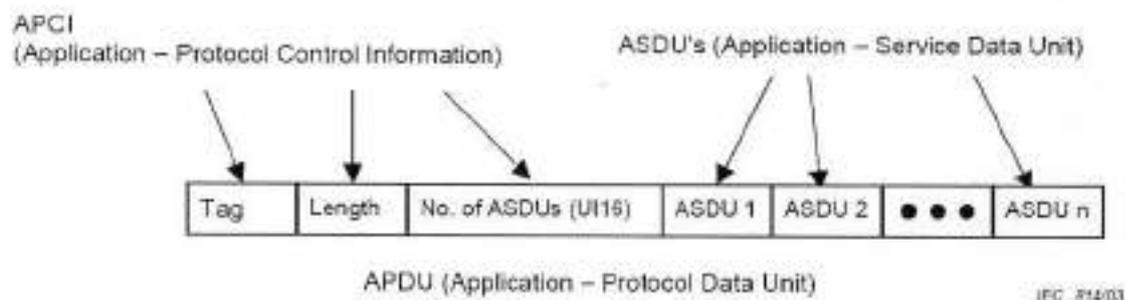


Figura 9: Diagrama representando uma APDU (Application Package Data Unit – Unidade de Dados de Aplicação)

Os campos a serem citados aqui são:

Tag: A APDU é descrita dentro de uma sintaxe abstrata (ASN.1 - definida em ISO 8824 e ISO 8825) e sua codificação obedece a umas regras básicas (BER). Dentro dessas regras, deve existir um octeto cujos 3 primeiros bits contém a natureza do dado (inteiro, binário, string, etc...) e da sua estrutura (complexa ou simples) e os outros bits contém tamanho do pacote de dados que está sendo enviado. No caso deste projeto, a norma nos pede para utilizar a string 0x80, que se refere a um tipo de dado primitivo – uma cadeia de bytes, cujo significado é inerente ao contexto da mensagem.

Length: Como foi dito no último item, este campo contém o tamanho, em bytes do dado que está sendo enviado. Se 5 bits dentro de um octeto - utilizado para definir a natureza dos dados - não forem suficientes, mais um octeto pode ser utilizado.

Nº de ASDU's concatenadas na mensagem: Número inteiro (até 16 bits em binário). Vale dizer que esse estudo considera apenas uma ASDU. Transmissões considerando mais de uma ASDU são tratadas no capítulo 9.2 da norma IEC 61850.

ASDU (Application Service Data Unit): Parte principal do frame que contem os dados. Na descrição da estrutura de dados e codificação da ASDU deverão estar presentes os datasets escolhidos para serem enviados continuamente ao sistema. Nesse estudo o ASDU consistiu do *dataset* universal, que foi especificado na norma IEC 60044-8 e discutido

anteriormente. Ao byte 45 e 46 do diagrama especificado na figura 1 foram atribuídos os seguintes campos:

Byte 45 – Sampling Rate (taxa de amostragem): Inteiro sem sinal de 8 bits. Taxa de amostragem. Utilizada pelo receptor para recompor o sinal enviado, juntamente com a numeração das amostras. A cadeia de bits desse campo representa o número de amostras por ciclo da fundamental do sinal a ser medido. É fundamental no projeto que utilizemos uma taxa de amostragem coerente com a taxa de envio de dados. A norma IEC 61850, capítulo 9.1 nos recomenda a seguinte equação:

$$S_R \times T_L \times n_{MU} \leq D_R$$

onde:

S_R é a taxa de amostragem do sinal em Hz;

T_L é o número de bits por pacote de informação (incluindo frame ethernet);

n_{MU} é o número de *merging units* conectadas ao ponto de amostragem.

D_R é a taxa de envio de dados do sistema.

Byte 46 – Configuration revision (revisão de configuração): Mostra o número de mudanças já ocorridas na configuração do dispositivo. Trata-se de um inteiro sem sinal de 8 bits.

O presente trabalho consiste na abordagem da norma IEC 61850 através deste conceito. Faremos a transmissão de valores amostrados a partir de uma *merging unit* até uma estação receptora, onde esses dados serão visualizados através de uma interface. Passemos à descrição do hardware utilizado.

4. DESCRIÇÃO DOS RECURSOS UTILIZADOS

4.1 Introdução

O presente trabalho consiste na transmissão de valores amostrados a partir de uma *merging unit* até uma estação receptora, onde esses dados serão visualizados através de uma interface. O diagrama ilustrativo do projeto é mostrado novamente na figura 15.

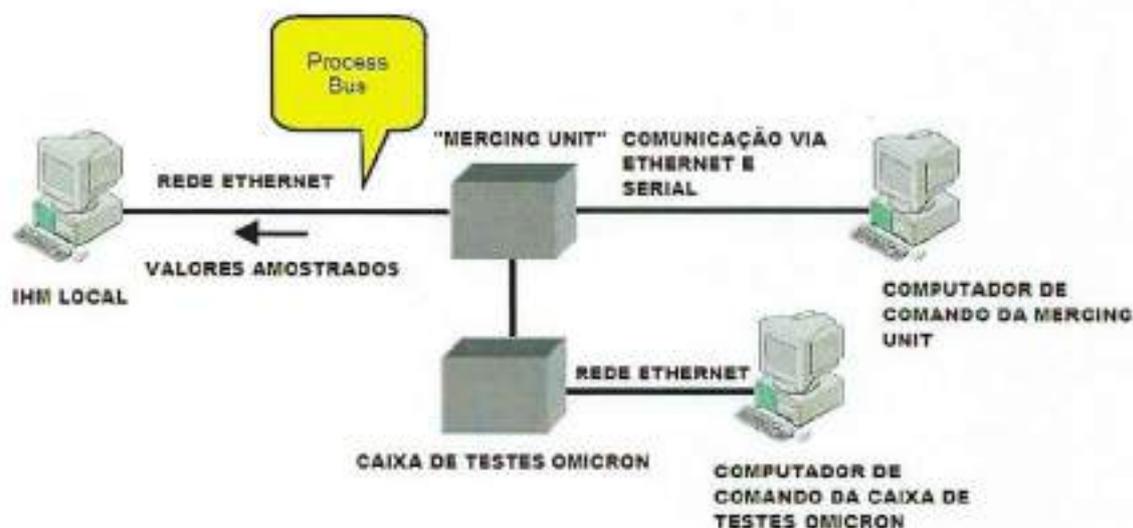


Figura 10: Diagrama ilustrativo do projeto

4.2 Hardware disponível

O Hardware utilizado para implementação da *merging unit* é uma adaptação de um projeto existente no LPROT, cujo projeto foi realizado pelo professor Guido Stolfi, que consistia inicialmente em um relé diferencial. Este relé possui as funções das quais a *merging unit* irá se utilizar como conversão analógico-digital de sinais, com taxa de amostragem a ser configurada;

processamento digital desses sinais, comunicação em rede através de plataforma Ethernet e serial (necessária para configuração); e *firmware* já instalado, sendo realizada apenas a adaptação. Alguns circuitos presentes no hardware não serão utilizados no projeto, para a simplificação da parte executiva do mesmo. Faremos uma descrição de todo o hardware, atendo-se apenas aos detalhes necessários ao projeto da *merging unit*. Para informações completas sobre o hardware, consultar as referências ao fim do trabalho.

O hardware original consiste de 7 placas ou módulos acondicionados em uma gaveta metálica para bastidor 19 polegadas. O diagrama é mostrado na figura 11.

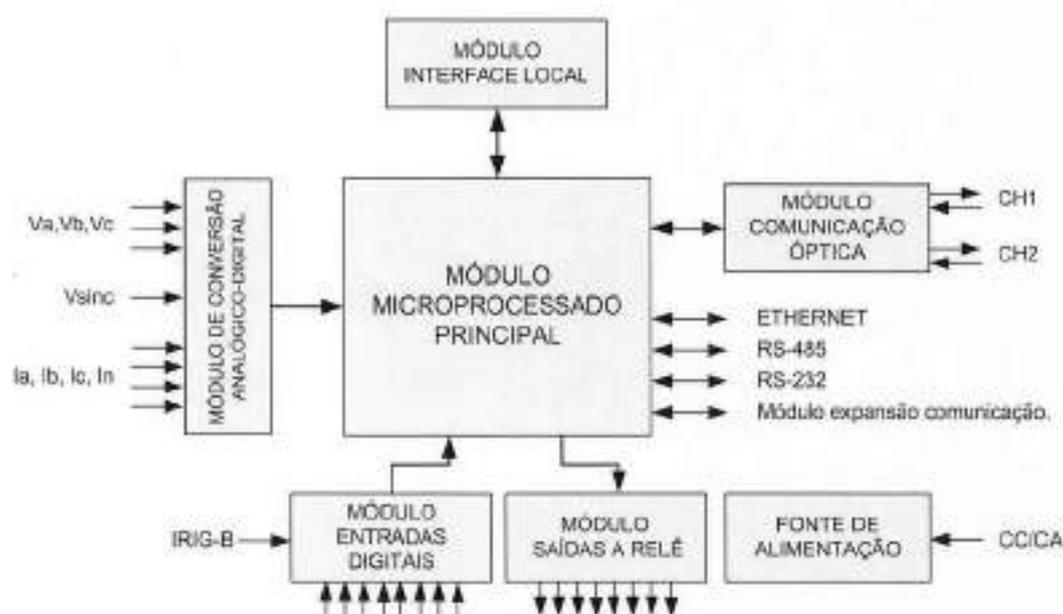


Figura 11: Diagrama do Hardware utilizado para a *merging unit*.

Quanto às comunicações realizadas pelo módulo microprocessado principal, utilizaremos a comunicação Ethernet e a comunicação via RS-232 (serial) para fins de configuração. Será feita agora a descrição dos módulos.

Módulo microprocessado principal: é o módulo central do hardware, que realiza o processamento dos sinais amostrados e os envia a rede, já no formato de acordo com a norma IEC 61850. Para isso, o *firmware* dentro desse módulo, que será descrito posteriormente, foi adaptado. Constituído por uma

placa multi-layer, usando tecnologia SMD, o diagrama deste módulo (e dos componentes envolvidos) é mostrado na figura 12:

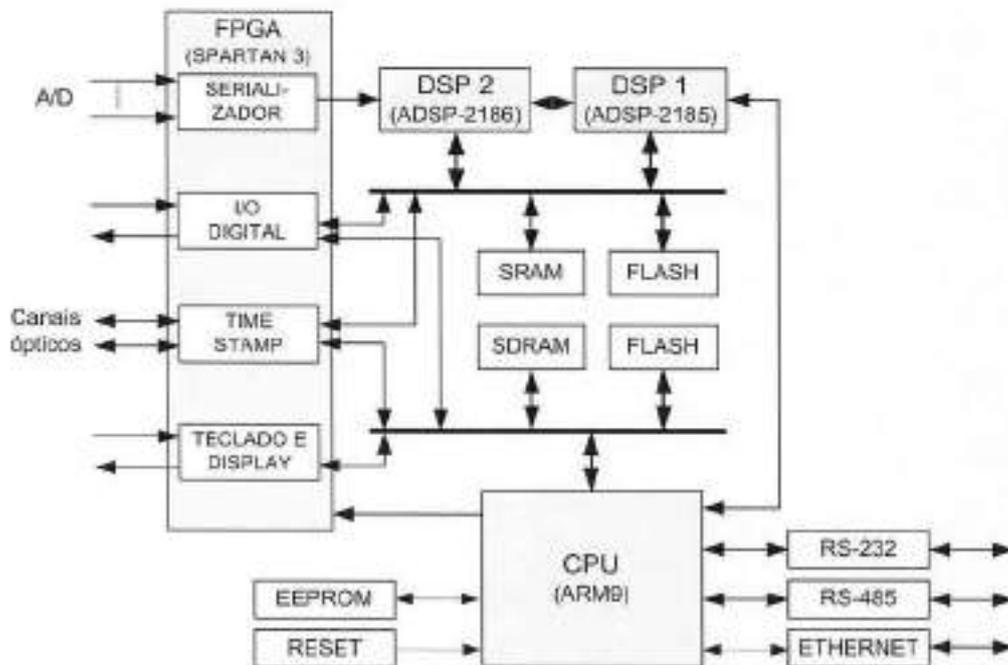


Figura 12: Diagrama do módulo microprocessado principal.

Podemos identificar os seguintes componentes:

FPGA (Field Programmable Logic Array - Xilinx - Spartan 3): hardware com função configurável, customizada no LPROT. Implementa alguns circuitos adicionais necessários ao funcionamento da *merging unit*.

Esses circuitos são:

Serializador: agrupa as entradas provenientes dos 8 canais analógicos existentes, gerando um único fluxo serial com os oito canais em sequência. A informação é então transmitida para o DSP 2 através de uma interface serial síncrona.

I/O Digital: registradores que recebem as informações do módulo de comunicação óptica (presente na *merging unit* e que será descrito posteriormente) e as disponibiliza aos DSP's e à CPU através dos barramentos. Da mesma forma, estes registradores recebem dados de saída

provenientes do DSP ou CPU e enviam esses dados para o módulo de comunicação óptica.

Time Stamp: circuito que produz um sinal de clock necessário ao sincronismo. Foi utilizado para o propósito original do hardware, mas não foi utilizado neste projeto.

Teclado e Display: recebe os dados do módulo de interface local e envia dados para o mesmo, isto é, realiza a varredura das teclas e leds, independentemente da CPU, envia valores aos displays de LCD, recebe as entradas do teclado de função programável e do teclado numérico. De modo mais geral, é responsável por gerenciar a interface local com o usuário.

Outros circuitos auxiliares existentes e não descritos são:

Processador de sinal IRIG-B: recebe as entradas provenientes do sinal GPS, faz a deserialização e disponibiliza aos DSP's e a CPU, em formato paralelo.

Dual-Port RAM: Utilizado para troca de dados entre o DSP e a CPU, principalmente fasores, que são calculados no DSP2.

Gerenciador de comunicação: necessário para comunicação entre IED's. Não foi utilizado no projeto.

Sinal de watch-dog dos conversores A/D: sinal de verificação da operação correta dos conversores A/D. Não foi utilizado no projeto.

2 DSP's (Digital Signal Processor - ADSP 2186M e 2185M, ambos da Analog Devices): operadores de ponto fixo, operam com clock interno de 65 MHz. Possuem largura de palavra de dados de 16 bits e instruções de 24 bits além de multiplicador com acumulador de 40 bits e barramento para memórias de 8 bits. Trocam dados com a CPU através de interface serial síncrona de alta velocidade, simbolizada pela conexão entre a CPU e o DSP1, ou através da Dual-Port RAM implementada na FPGA e já comentada. Utilizados para processamento digital dos sinais, realizam com bastante eficiência operações repetitivas e são responsáveis por tarefas como:

- Calibração, interpolação e decimação dos sinais digitais fornecidos pelo módulo de conversão analógico digital;
- Filtragem digital de componentes aperiódicas presentes no sinal;
- Cálculo dos fasores pelo método de Fourier;
- Cálculo de grandezas elétricas como potência ativa, reativa, aparente, fator de potência, etc...
- Debounce e controle das entradas digitais;

Processador Principal (CPU - Atmel - AT91RM9200): responsável pelo gerenciamento da comunicação externa (ethernet e serial RS - 232), provendo o encapsulamento dos dados e pelo gerenciamento da interface local com o usuário (teclado, display e leds). Suas características são:

- ✓ Interfaces I2C, SPI, USB 2.0, MAC Ethernet 10/100 Mbps, 3 interfaces seriais síncronas e 4 assíncronas;
- ✓ Suporte a memória estática/flash até 16 Mbytes e a memória dinâmica até 64 Mbytes;
- ✓ Memória cache interna com 16 kB de instruções e 16 kB de dados;
- ✓ Capacidade de processamento de até 200 Mips (milhões de instruções por segundo) com barramento de dados e endereços de 32 bits;

Módulo de Conversão analógico-digital: realiza a digitalização dos sinais advindos dos oito canais analógicos existentes - 3 de tensão, 4 de corrente e um canal de tensão isolado utilizada para uma função verificadora do sincronismo. Os canais de tensão correspondem às tensões de fase e os canais de corrente correspondem as correntes de fase mais a corrente de neutro (retorno). Existe uma parte analógica, onde a tomada os sinais analógicos são tomados após a conversão dos mesmos a níveis aceitáveis, o que é realizado através de transformadores de corrente e tensão. O diagrama

ilustrativo da parte analógica, mostrando a forma de conexão dos sinais, é mostrado na figura 13 :

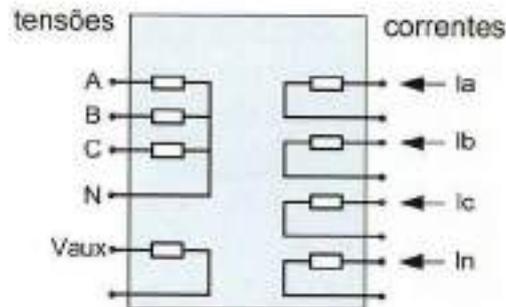


Figura 13: Diagrama das entradas do conversor analógico-digital

As características da parte analógica são:

- Suportabilidade elétrica de 10 kV durante 10 segundos (IEC 60255-5; IEC 37.90);
- Suportabilidade a transitórios rápidos de 4 kV a 2,5 kHz (IEC 602-22-4; IEC 61000-4-4);
- Utilização de transformadores de corrente auxiliares para isolação galvânica;
- Utilização de um amplificador de isolação para isolar a tensão de sincronismo da entrada do conversor A/D;

A outra parte refere-se ao conversor A/D propriamente dito. Como mostra o diagrama, temos oito canais analógicos para entrada dos sinais descritos. Porém, a entrada do conversor A/D possui apenas 4 canais. Logo, cada canal do conversor A/D recebe dois sinais analógicos e o resultado da conversão é uma sequência serial de bits onde a primeira metade corresponde a um dos canais e a segunda metade ao outro. Cada um dos canais da parte conversora A/D é um conversor analógico-digital modelo PCM 1801 da Burr Brown, baseado em modulador sigma-delta de quinta ordem, 16 bits de resolução e frequência de amostragem ajustável na faixa de 4 a 48 kHz. A

frequência de amostragem utilizada é 142 vezes a frequência da fundamental do sinal analógico medido.

Essas quatro saídas, cada uma contendo a digitalização de um instante para 2 canais analógicos são conectadas ao circuito serializador da FPGA já descrita. Essa conexão se dá através de foto-acopladores, de forma a garantir isolamento galvânica e entre as tensões de neutro e de terra dos circuitos.

Módulo de Comunicação Óptica: Contém os circuitos de acoplamento com as fibras ópticas, meio de comunicação entre a *merging unit* e outros dispositivos do sistema de automação e proteção.

Módulo de Entradas Digitais: recebe as entradas digitais, acondiciona-as e as envia ao módulo microprocessado principal. Este último suporta a conexão de até dois módulos de entradas digitais (total de 16 entradas digitais). As entradas deste módulo têm as características:

- São opto-acopladas;
- Permitem as seguintes tensões nominais: 24; 48; 110; 125; 220 ou 250 Vcc, dependendo dos valores dos resistores instalados na placa.
- Suportabilidade dielétrica de 3.0 kV por 10 segundos (IEC 60255-5; IEC 37.90)
- Suportabilidade de transitórios rápidos de 2 kV a 2.5 kHz (IEC 602-22-4; IEC 61000-4-4)

Módulo de Saídas a Relé: recebe os sinais do módulo microprocessado principal e os disponibiliza como sinal elétrico padronizado de saída, através de 8 relés de uso geral, com contatos NA e NF. É suportada a conexão de até dois módulos de saída a relé. As características a se destacar são:

- Interface com este módulo através de acopladores ópticos (maior imunidade contra transientes);

- Contatos protegidos contra faiscamento por varistores MOV (metal oxide varistor);

Módulo de Interface Local: constituída por

- Display LCD de 4 linhas e 20 caracteres;
- Teclado numérico;
- Teclado com 12 teclas funcionais;
- 12 LED's (10 programáveis, um de Power e um de Falha de Watch-dog).
- Módulo Fonte de Alimentação: chaveada, de alta frequência, aceita tensões de entrada alternada entre 80 e 250 V.

Portas de Comunicação:

- Interface RS - 232;
- Ethernet 10/100;
- RS- 485;
- Módulos de expansão: até 3 módulos com portas RS-232, RS-485 ou Ethernet (traseira).

O hardware utilizado é mostrado nas figura 15 a 17.



Figura 15: Painel Frontal do hardware adaptado.

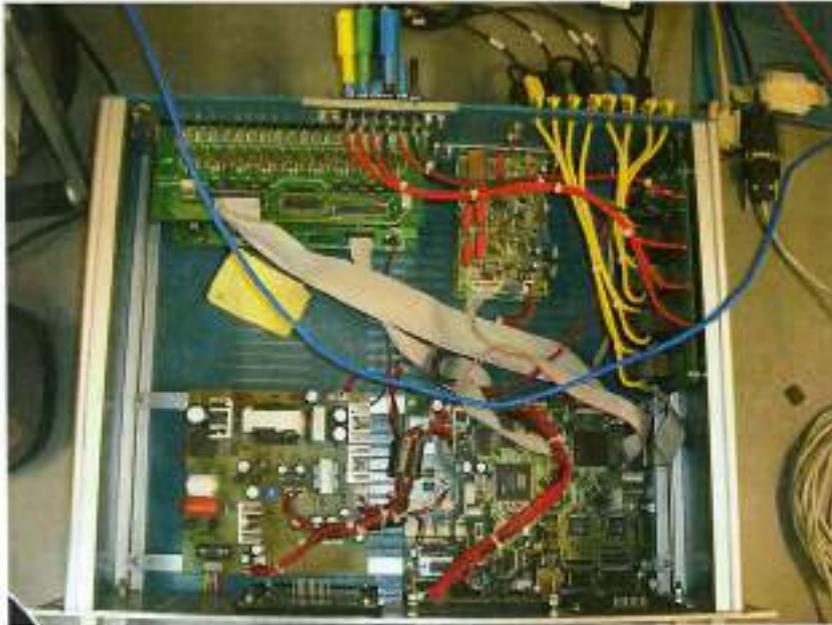


Figura 16: Vista superior da *merging unit*.

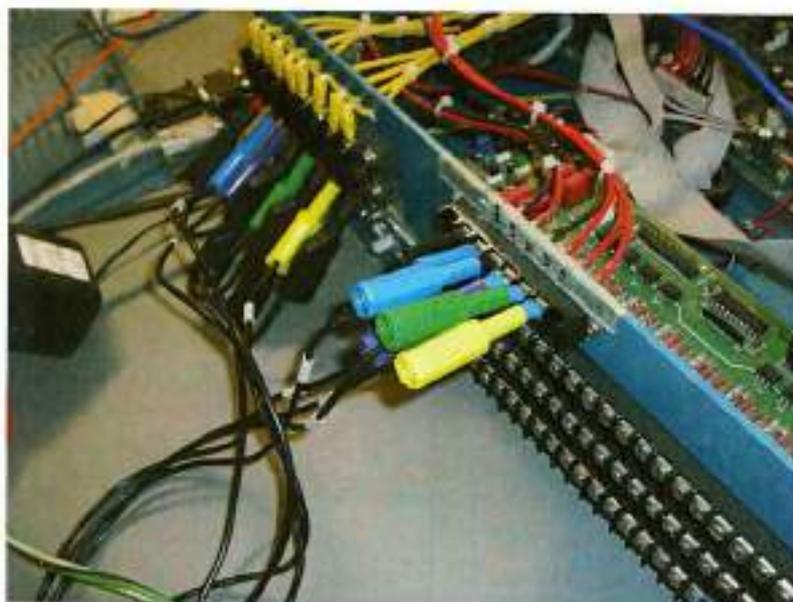


Figura 17: Conexões feitas no painel traseiro do equipamento.

4.3 Software

O software implementado na *merging unit* também deverá ser uma adaptação do software utilizado para a implementação do relé diferencial, porém com algumas modificações. Ele deverá ser modificado para enviar pela rede, a todo tempo os valores amostrados de tensão e corrente com o encapsulamento previsto pela norma IEC 61850. Não haverá confirmação de recebimento ou requisição de permissão de envio.

Existe uma memória EEPROM programada com as instruções iniciais a serem executadas pela CPU ARM9, dentro do módulo microprocessado principal. Essas instruções carregam as interfaces mais elementares de comunicação com o usuário e instruem o processador a carregar o sistema executivo desse sistema (caso haja alguma falha no carregamento do sistema executivo principal). Esse sistema permite que a CPU tome conhecimento de todas as funcionalidades de hardware acima, permitindo que os agentes externos comuniquem-se com a *merging unit* através dos módulos de interface

local e das portas de comunicação descritas. O código-fonte foi programado na estação de comando da *merging unit* através de linguagens C e assembly, predominantemente.

Os programas utilizados para as modificações do código fonte são:

- Programmer's Notepad: utilizado para editar o código-fonte dos programas.
- WinARM: para compilar o código fonte.

Depois de compilados, os arquivos executáveis, via protocolo tftp ou comunicação serial, foram copiados para a memória da *merging unit*.

4.4 Computador de comando da *merging unit*

Consiste em uma estação de trabalho comunicando-se serialmente com o dispositivo. Através da interface serial de comunicação, comandos apropriados fazem a *merging unit* transmitir valores amostrados até qualquer botão do teclado ser pressionado. Foram implementados também outros comandos, como mostrar na tela os valores de pico das tensões e correntes medidas, transmitir um pacote SV por vez, para fins de depuração de erros de hardware, imprimir na tela uma tabela com 32 amostras de cada fonte, entre outros. O computador de comando, juntamente com a *merging unit* são mostrados na figura 18.

4.5 Caixa de testes OMICRON e computador de comando

Para gerar os valores de tensão e corrente a serem amostrados, simulando o sistema de potência, foi utilizada a caixa de testes OMICRON,

programada a partir dos softwares State Sequencer e Quick CMC. O posicionamento da caixa de testes e do respectivo computador de comando, relativamente a *merging unit*, é mostrado nas figuras 19 e 20. A interface do state sequencer é mostrada na figura 21 e a do Quick CMC é mostrada na figura 22.



Figura 18: *merging unit* ao lado do computador de comando

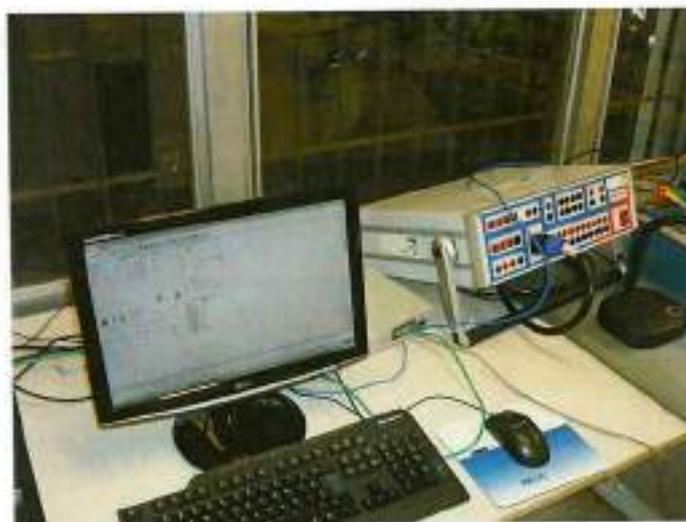


Figura 19: Caixa de testes OMICRON ao lado do computador de comando



Figura 20: Caixa de testes posicionada ao lado da *merging unit*.



Figura 21: Interface do programa State Sequencer

O State Sequencer permite programar diversos estados assumidos pela caixa de testes e a duração desses estados em segundos ou milissegundos. Também se pode associar o início ou limite de um estado a partir de eventos ligados às conexões frontais da caixa de testes, como apertar uma botoeira conectada a caixa de testes, como mostrado na figura. O estado da caixa de testes, neste caso, está associado a um conjunto particular de valores de tensão e corrente gerados. A programação desses estados se dá no computador de comando da *merging unit*, mostrado abaixo juntamente com a

caixa de testes. Já o Quick CMC tem um funcionamento mais simples, permitindo escolher valores gerados pela caixa de testes e alterar qualquer desses valores com a caixa em funcionamento. A interface deste programa é mostrada na figura 22.

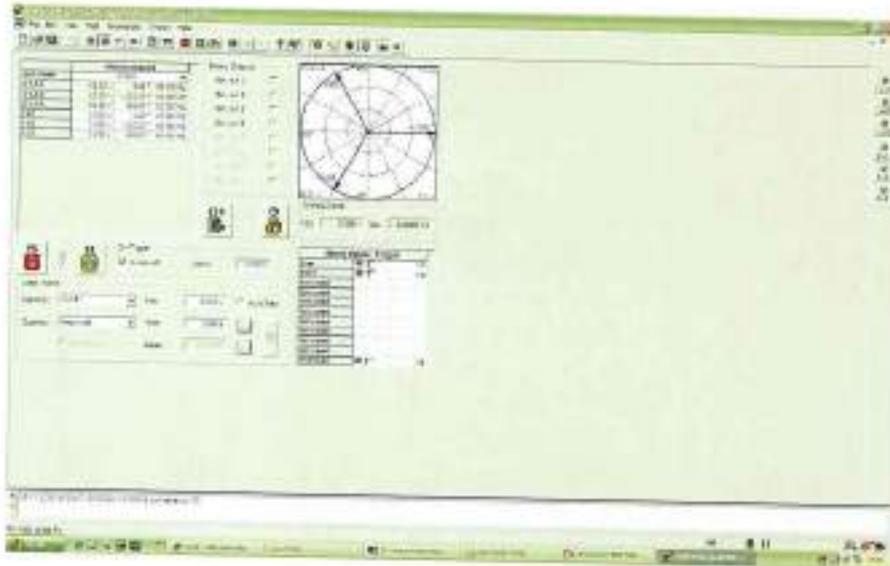


Figura 22: Interface do programa Quick CMC

4.6 IHM local

Computador onde foi implementada a recepção dos valores amostrados, de modo a verificar a eficácia da transmissão dos *sample values*. Nesse computador já estava instalado o sistema Linux e o algoritmo de recepção e população da memória foi escrito em C. O software de captura Wireshark foi utilizado na depuração de erros até a plataforma de recepção ficar confiável. O programa desenvolvido em C neste computador observa a rede de comunicação, comparando todas as mensagens recebidas com a estrutura especificada na norma IEC 61850 para *sample values*. Ao chegar qualquer mensagem cujo dataset é referente a valores amostrados, o programa começa a popular a memória do computador organizadamente. Além de receber os

valores amostrados que chegam pela rede, a IHM registra o tempo de recepção de cada um dos datasets e guarda na memória. Esse tempo de recepção é registrado através de contagem do número de ciclos do processador, acessível através de função própria do sistema Linux. O número de ciclos é multiplicado então pela frequência do processador (aproximadamente 2 GHz – a frequência do processador sempre é verificada no início do programa a partir da contagem de ciclos em 1 segundo), dando o tempo decorrido após uma referência. À medida que as mensagens com *sample values* são recebidas, é registrado o tempo de chegada, o tempo entre a recepção de cada duas mensagens consecutivas e o atraso em relação à taxa de amostragem ideal de 16 amostras/ciclo de 60 Hz. Ao final da população de memória, o programa calcula a média e desvio-padrão de todos esses valores. Faz também uma regressão linear, que indica o atraso médio de cada pacote em relação à amostragem ideal. Além disso, o programa calcula o índice de perda de pacotes através do contador de amostras (campo *sample counter*). Quando a diferença entre o contador de duas amostras consecutivas não é de uma unidade, uma unidade é acrescentada às perdas do sistema.

Após a memória do computador ser populada, o usuário pode salvar um arquivo em formato de valores separados por vírgula (.csv – comma separated values), ver a oscilografia de toda a mostra ou de instantes específicos de tempo. A oscilografia que o programa consegue disponibilizar foi programada em OpenGL, que é uma linguagem própria para desenho e animação. Como exemplo de animação, o programa oferece a possibilidade de visualizar o comportamento instantâneo de qualquer uma das grandezas amostradas. Além disso, para as oscilografias feitas após a população da memória, o programa oferece a possibilidade de janelas de visualização definidas pelo usuário. Isso significa que podemos exibir oscilografias de 1 segundo na tela visualizando o seu comportamento a cada 200 ms, alternando as janelas de visualização através do teclado.

5. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS E SIMULAÇÕES

5.1 Teste de linearidade do sistema de amostragem

Esse teste consiste em verificar, no hardware disponível no LPROT, a linearidade de conversão entre corrente injetada e sinais digitais obtidos. O sinal proveniente das entradas analógicas passa pelo conversor analógico digital e pelo serializador, onde há a decimação para 16 amostras por ciclo, e pelo DSP, que calcula os fasores, amplitudes instantâneas, valores de pico de todas as amostragens realizadas e disponibiliza os resultados desses cálculos em uma região de memória, que é alterada sempre que uma nova amostragem é realizada. O DSP disponibiliza esses resultados na forma de um grande vetor estruturado, contendo, entre outros valores:

- Correntes e tensões de fase e neutro instantâneas (módulo e fase, calculada a partir de uma referência);
- Amplitude das correntes e tensões de fase e neutro (calculadas a partir de transformadas de Fourier para valores discretos);
- Potências ativa e reativa, dada pelo produto das tensões e conjugados das correntes;

Foi então desenvolvida uma função que escreve na tela, a partir da média aritmética de várias amostragens, a amplitude das tensões e correntes a partir dos valores disponibilizados à memória pelo DSP, para ser comparada com os valores injetados. Para injetar os valores foi utilizada a caixa OMICRON, programada para injetar os mesmos valores de corrente e tensão constantemente. A partir das amplitudes injetadas pela caixa e dos valores registrados na memória na *merging unit*, foi obtida uma tabela de equivalência no Excel. A partir do coeficiente angular entre essas duas grandezas, foi

estimado um fator de escala para o equipamento. A taxa configurada de renovação da memória é de 16 amostras/ciclo de 60 Hz.

Nota-se que o tratamento dado a essa questão nesse estudo foi bem simplificado. As três fases não foram estudadas separadamente, para averiguar se o conversor introduz algum desequilíbrio na rede. A dependência entre a relação de conversão e parâmetros como temperatura e interferência eletromagnética não foi estudada.

5.1.1 Resultados

A tabela 7 mostra os resultados obtidos no ensaio de linearidade de corrente e a tabela 8 mostra os resultados obtidos no ensaio de linearidade de tensão.

| Corrente Injetada (A) | Valor registrado pelo DSP (DSPu) | constante KI (DSPu/A) |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 0 | 0 | - |
| 1 | 635 | 635,00 |
| 2 | 1275 | 637,50 |
| 3 | 1916 | 638,67 |
| 4 | 2557 | 639,25 |
| 5 | 3198 | 639,60 |
| 6 | 3838 | 639,67 |
| 7 | 4480 | 640,00 |
| 8 | 5121 | 640,13 |
| 9 | 5763 | 640,33 |
| 10 | 6403 | 640,30 |
| 11 | 7045 | 640,45 |
| 12 | 7687 | 640,58 |

Tabela 7: Resultados obtidos no ensaio de linearidade do DSP

| Tensão Injetada (V) | Valor do DSP (DSPu) | constante KV (DSPu/V) |
|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 0 | 0 | - |
| 1 | 161 | 161,00 |
| 10 | 1626 | 162,60 |
| 20 | 3256 | 162,80 |
| 30 | 4881 | 162,70 |
| 40 | 6508 | 162,70 |
| 50 | 8136 | 162,72 |
| 60 | 9763 | 162,72 |
| 70 | 11391 | 162,73 |
| 80 | 13019 | 162,74 |
| 90 | 14645 | 162,72 |
| 100 | 16272 | 162,72 |
| 110 | 17899 | 162,72 |

Tabela 8: coeficiente de linearidade de tensão em função da tensão injetada.

Cada um desses resultados obtidos da *merging unit* (enviado pelo DSP à memória, por isso dado em DSPu ou unidades do DSP) foi obtido de uma média de 100 amostras de amplitude, calculadas através da transformação de Fourier, como já explicado. Isso foi feito para compensar imprecisões na medição, erros de truncamento no cálculo das amplitudes, entre outros. Embora não tenha sido definido critério rígido na escolha do número de amostragens, esse experimento foi repetido diversas vezes, não havendo alteração sensível nos valores obtidos. Observou-se que, dado que a taxa de amostragem é de 16 amostras/ciclo, tem-se que 100 amostras representam pouco mais de 6 ciclos, sendo considerado um número suficientemente adequado ao propósito de compensar os erros descritos.

Embora possamos ver uma variação de aproximadamente 5 unidades na relação entre DSP e as correntes injetadas, ela não chega a ser significativa em relação ao valor absoluto total. O mesmo vale em relação à tensão, cuja variação no fator de escala é ainda menor. A figura 23 mostra a evolução do fator de escala em relação às correntes injetadas e a figura 24 mostra a evolução do fator de escala em relação às tensões injetadas.

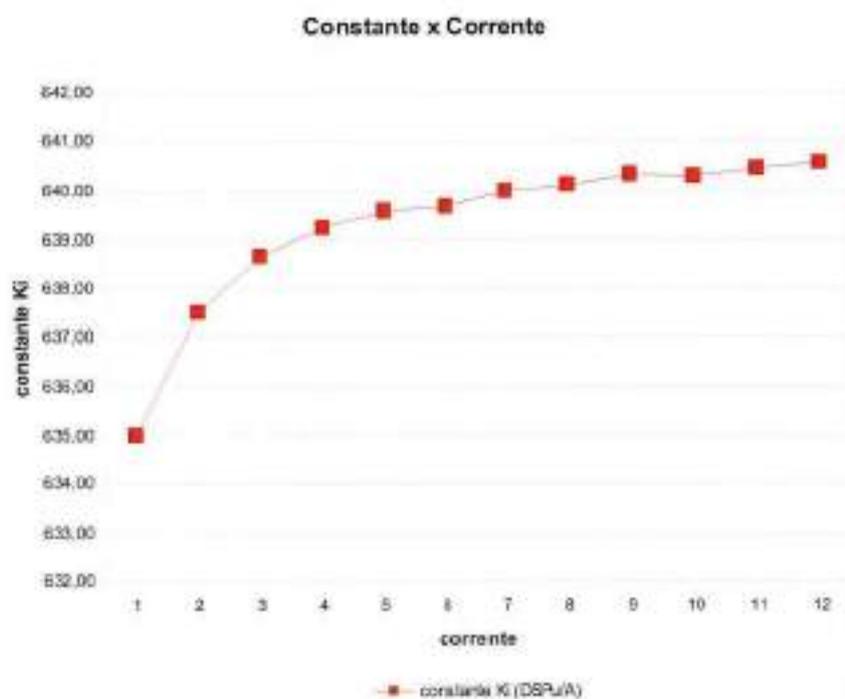


Figura 23: Gráfico com a evolução da constante de linearidade em função da corrente injetada na *merging unit*.

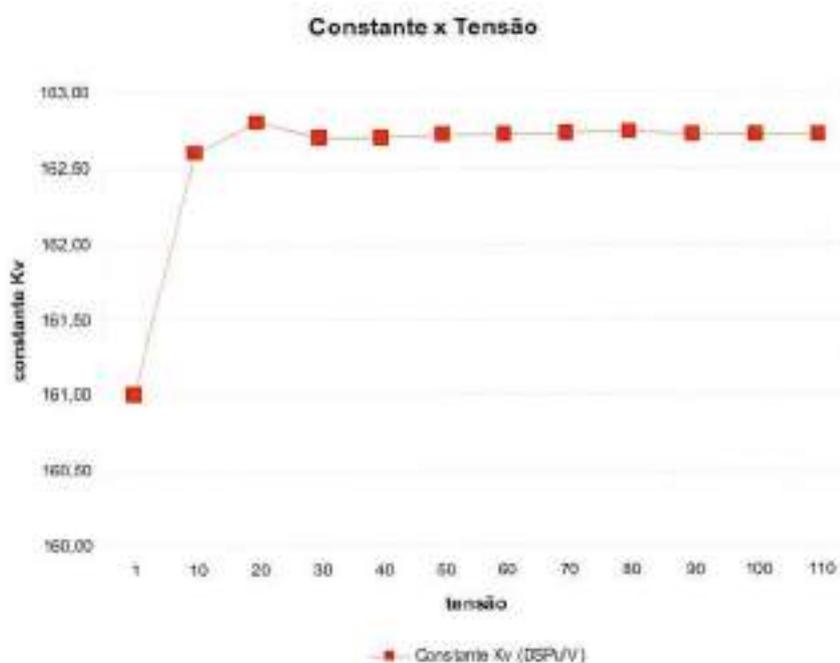


Figura 24: Gráfico com a evolução de constante de linearidade de tensão em função da tensão injetada na *merging unit*.

Há uma variação destacada no gráfico da constante, que ocorre para pequenos valores. Porém, se formos considerar a magnitude do menor valor de D, veremos que a diferença é pouca em relação ao limite do gráfico, dado pela constante K_v ou K_i que é representada pela tendência do gráfico. Observando os gráficos que relacionam diretamente os valores de tensão e corrente com os valores registrados pela *merging unit* (figuras 25 e 26), podemos nos certificar de que as variações na constante não são relevantes.

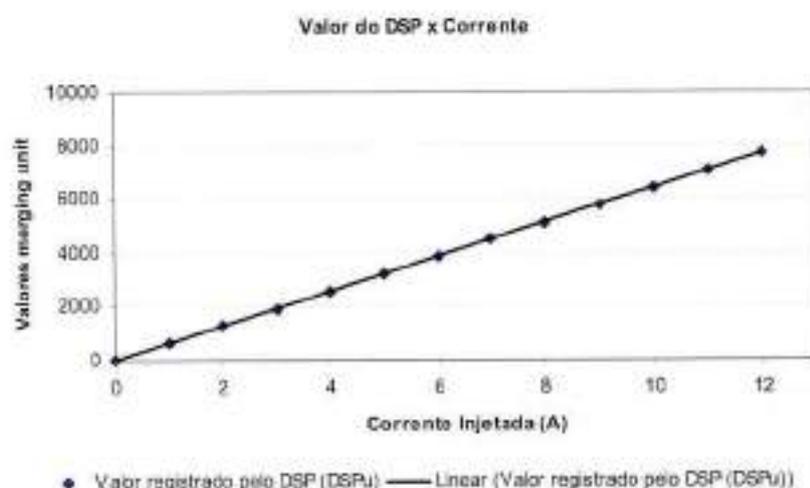


Figura 25: Relação entre os valores de corrente injetados pela caixa OMICRON e os valores registrados pela *merging unit*.

A partir da regressão linear feita com os valores obtidos, chegou-se ao seguinte resultado:

$$\text{Constante de corrente (DSPu/A)} = 640,22$$

$$\text{Constante de tensão (DSPu/V)} = 162,73$$

5.1.2 Conclusões Parciais

Notou-se que o hardware que foi utilizado para amostrar e digitalizar os sinais apresentou bom desempenho no teste de linearidade e variações pouco significativas. Em uma análise mais aprofundada do que a conduzida neste estudo, pode-se dar um tratamento mais estatístico à questão, obtendo-se

intervalos de confiança e incertezas relacionadas aos coeficientes medidos. Outro aspecto que poderia ser levado em conta seria a diferença entre as amostragens por fase, discutindo-se se há eventual desequilíbrio introduzido pelo sistema de amostragem e digitalização. Além disso, poderia ser estudada a variação desse parâmetro de conversão devido à temperatura, umidade, interferência eletromagnética, entre outros fatores, o que não foi o foco deste estudo. Para fins de transmissão de valores amostrados e verificação da eficácia da norma IEC 61850 para transmissão de valores amostrados, considera-se que o teste foi realizado com sucesso.

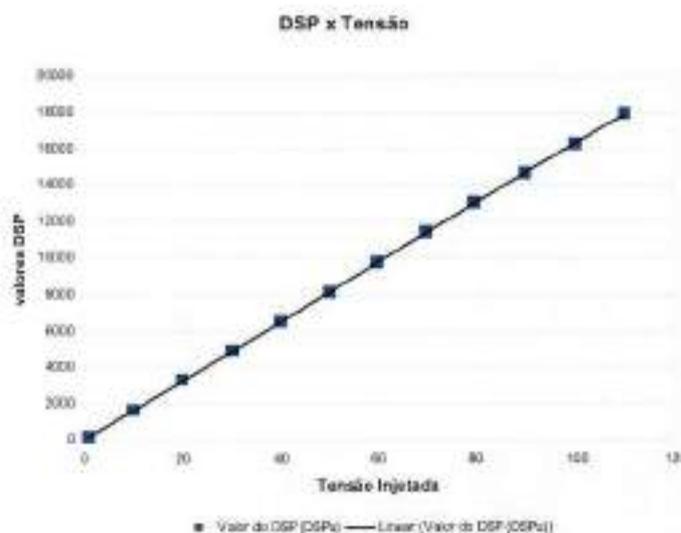


Figura 26: Valores registrados pelo DSP em função dos valores de tensão gerados pela caixa de testes.

5.2 Teste de eficiência do sistema de amostragem e transmissão

Consiste em determinar a taxa real de transmissão do sistema e a sua estabilidade com o tempo. Para isso, foram feitos 5 ensaios onde a IHM estava programada receber 960 pacotes *sample values* e cinco ensaios nos quais se recebiam os primeiros 28800 pacotes. De acordo com a frequência de

transmissão de 16 amostras/ciclo de 60 Hz, os tempos ideais para a chegada de 960 pacotes e 28800 pacotes são 1 s e 30 s, respectivamente. Após a recepção dos pacotes, o conteúdo da memória era escrito em um arquivo, para análise dos tempos com o excel. As figuras 27 e 28 mostram, para uma das capturas realizadas, a estatísticas e amostras recebidas, calculadas e disponibilizadas pelo programa em um arquivo que pode ser aberto com o excel.

GRAVACAO DOS VALORES SAMPLE VALUES CAPTURADOS

```

DADOS DE REDE:
Mac Destino: 01 0c cd 04 0a 0b
Mac Origem: 00 0a 0b 0c 0d 0e
Tag Protocol Identifier: 8100
Tag Control Information: 8004
Ethertype: 88BA
Application Identifier: 4000
Abstract Syntax Notation 1: 80 34 01
MSVID: 01 0c cd 04 0a 0b
Logical Node Name: 2
Dataset Name: 1
Logical Device Name: 1
Status Word 1: 0
Status Word 2: 0
Sample Rate: 16
Configuration Revision: 0

DADOS DE BASE:
Corrente de Fase: 1
Corrente de Neutro: 2
TensÃO de Fase: 100
Base de Tempo: 1

DADOS DE ESCALA - IEC 61850:
Corrente de Fase - Protecao: 0x01CF (rflag = 0)
Corrente de Fase - Medicao: 0x2D41
Corrente de Neutro: 1TensÃO de Fase: 0x2D41
TensÃO de Neutro: 1

DADOS GERAIS E ESTATISTICAS
Foram recebidos 0 pacotes.
Houveram 0 pacotes perdidos.(0 %)
Media de tempo entre as amostras: 1,039483
Desvio Padrao de tempo entre as amostras: 0,048560
Atraso acumulado: -1,054673
Atraso em relacao ao ideal por pacote: -0,001060

```

Figura 27: Dados gerados pelo programa contendo as informações sobre a transmissão de dados.

| Captura | Tempo Máximo (s) | Atraso Acumulado (ms) |
|---------|------------------|-----------------------|
| 1 | 29,970 | -29,308 |
| 2 | 29,985 | -13,513 |
| 3 | 29,969 | -30,159 |
| 4 | 29,972 | -27,166 |
| 5 | 29,965 | -34,330 |

Tabela 10: resultados do teste de eficiência do sistema de transmissão. Capturas seguidas de 28800 amostras.

Esse resultado nos mostra que a *merging unit* está adiantada em relação ao tempo ideal, por isso o atraso acumulado na tabela tem valor negativo. Esse adiantamento pode ser atribuído ao circuito eletrônico do sistema de amostragem da *merging unit*. Trata-se de componentes eletrônicos dos quais é exigida muita precisão e acredita-se que determinadas condições como temperatura, umidade, ventilação, entre outras, podem afetar a frequência de oscilação dos circuitos geradores de *clock*, responsáveis pelos temporizadores e pelo sistema de amostragem dos conversores analógico – digitais do sistema. O gráfico da figura 29 relaciona o tempo de recebimento do dataset com o número da amostra (vai de 0 a 960) na captura 1 para 960 pacotes e adotando-se taxa de amostragem ideal. Note que é impossível fazer qualquer distinção dada o número grande de pontos utilizados para o gráfico;

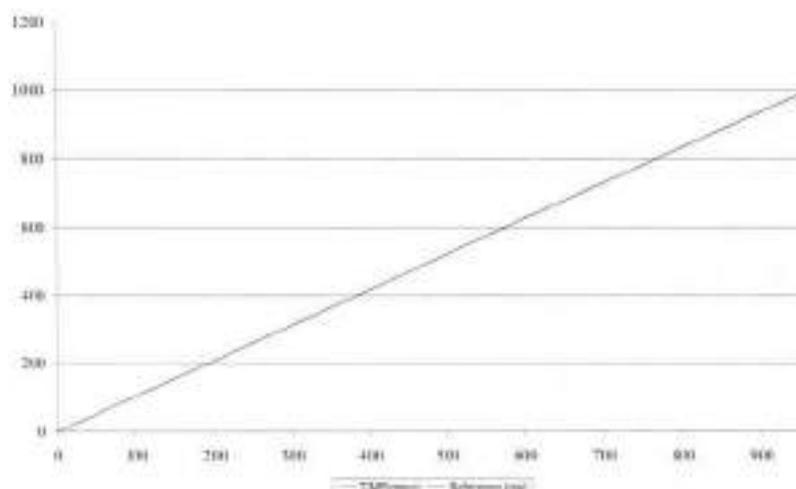


Figura 29: Instante de recepção dos pacotes em uma transmissão real em relação a uma transmissão ideal. Não há diferença visível na escala utilizada.

Porem, na figura 30 onde o gráfico relaciona a diferença entre o tempo real de amostragem e o ideal, pode ser visto que embora a diferença seja oscilante, há uma tendência de adiantamento em relação ao processo com taxa de amostragem ideal.

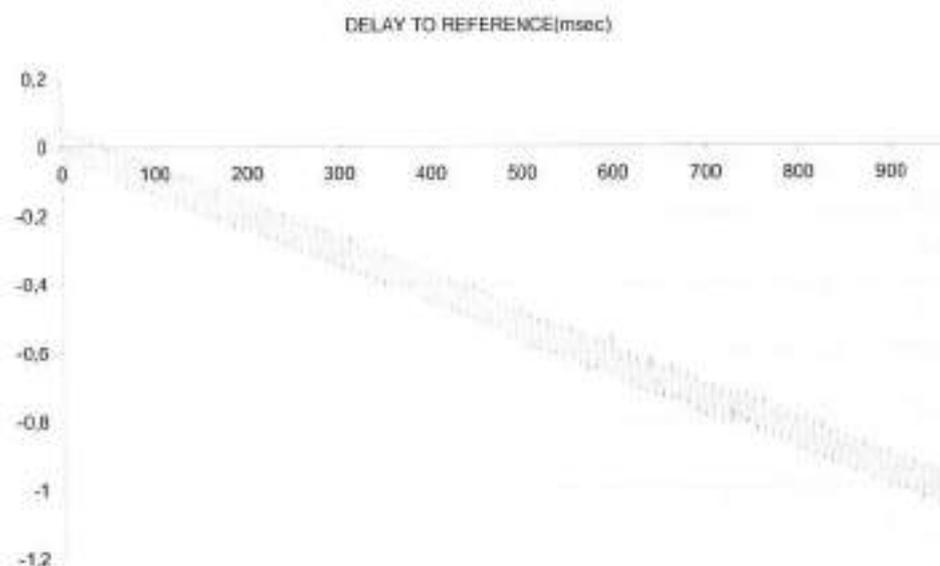


Figura 30: Comparação entre os instantes de chegada real e os instantes esperados, considerando-se 16 amostras por ciclo de 60 Hz.

Não se pode dizer que essa tendência prossegue indefinidamente. Ensaio com duração mais próxima às condições de operação almejadas, ou seja, a partir de 1 dia, podem dar uma visão muito mais realista dessa tendência. A questão é que para realizar este ensaio, deve ter uma metodologia específica para tratar o grande volume de amostras geradas. Deve-se também monitorar e observar a variação das condições ambientais de funcionamento da *merging unit*. Mas a expectativa desse estudo é que, devido ao valor padronizado para o qual foi projetado o sistema de amostragem, o sistema se aproxime da taxa de amostragem ideal para períodos de funcionamento cada vez mais longos do sistema.

5.2.2 Conclusões Parciais

O teste de transmissão da *merging unit* apresentou resultados conclusivos, porém, seria necessário um estudo mais aprofundado para averiguar a possível causa da diferença dos resultados em relação ao esperado. Estudos mais aprofundados podem se deter na relação entre a taxa de transmissão sob diversas condições de operação, assim como na análise feita para períodos longos de funcionamento. Baseado na análise para funcionamento por períodos relativamente longos, pode se ter uma base para o impacto da análise nos requisitos de proteção e de sistema. Também se pode dizer que o sistema de recepção e os cálculos de tempo baseados em ciclos do processador poderiam ser averiguados precisamente. Sabe-se que os computadores têm uma variação lenta do clock de funcionamento em relação ao nominal. Embora seja uma variação lenta e pequena, seu acúmulo pode influenciar os tempos que estamos medindo, que são da ordem de microssegundos. O uso de uma fonte de sintonia e sincronismo proveniente de um relógio externo tipo GPS, por exemplo, poderia garantir um melhor sincronismo do sistema ao compensar as variações locais e globais do *clock* interno da *merging unit*. Além disso, um outro aspecto que pode ser levado em conta é a simulação com um carregamento de rede mais próximo às condições de campo. Neste estudo, a rede ficou praticamente dedicada a *merging unit*, assim como o *switch* utilizado para endereçar as mensagens. Um estudo onde o carregamento da rede fosse maior seria útil para testar e discorrer sobre a eficiência do sistema de prioridades e de VLAN's, adotado pela norma IEC 61850 para valores amostrados. O tempo hábil disponível não permitiu essa profundidade em frente aos outros ensaios realizados. Como veremos no teste de fidelidade, o adiantamento da taxa de transmissão não é sensivelmente prejudicial a oscilografia e podemos considerar diante do enfoque desse estudo, que o teste de eficiência de transmissão e amostragem foi realizado com sucesso.

5.3 Teste de fidelidade ao sinal injetado

Nesse teste a caixa OMICRON assume 4 estados diferentes de tensão e correntes e a oscilografia gerada pelo software State Sequencer será comparada com a oscilografia gerada pela IHM local para a corrente e tensão na fase A. Depois a oscilografia para as três fases da caixa OMICRON será comparada com o gráfico gerado pelo Excel, a partir do arquivo escrito pela IHM. Nos testes realizados, a IHM foi programada para receber e analisar 1920 pacotes (equivalente a 2 s). Os estados programados e assumidos pela caixa durante os ensaios são descritos na tabela 12. A seqüência de estados simula uma queda na tensão e aumento de corrente.

| Estado | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------|------------------|--------|--------|--------|
| Condição de início | Apertar botoeira | - | - | - |
| Duração (ms) | 100 ms | 200 ms | 500 ms | 200 ms |
| Tensão de fase (V) | 0 | 70 | 50 | 70 |
| Corrente de fase (A) | 0 | 3 | 5 | 3 |

Tabela 11: Seqüência de estados que foram programados e assumidos pela caixa OMICRON.

O estado 1 era ativado a partir de uma botoeira e tinha duração de 100 ms. Logo após esse tempo, iniciou-se automaticamente o estado 2, com duração de 200 ms, seguindo-se depois os estados 3 e 4, com durações de 500 ms e 200 ms, respectivamente. A seqüência de ações do ensaio foi:

- a) Executou-se o programa de recepção, para que capturasse os pacotes *sample values* na rede;

- b) A partir de um programa que permite a operação remota do computador de comando da caixa OMICRON, foi executada a seqüência de estados acima e o comando de início das injeções de corrente ficou dependente da botoeira;
- c) A partir de um programa que permite a operação remota do computador de comando da *merging unit*, foi dado o comando de iniciar o processo de transmissão intermitente dos valores amostrados. Este último comando foi executado simultaneamente com o comando da botoeira. Assim, a *merging unit* transmitiu os valores nulos gerados pelo estado 1 e os valores gerados pelos outros estados.

Como a seqüência de estados da caixa de testes teve duração de 1 segundo e o sistema de recepção estava configurado para 2 segundos de amostragem, veremos que durante grande intervalo de tempo o sistema transmite valores nulos de tensão e corrente. No início, o intervalo de 100 milisegundos nos quais os valores de tensão e corrente são nulos garantem que a *merging unit* conseguirá transmitir todos os estados não nulos gerados pela caixa de testes e o tempo de recepção da interface IHM programado para aproximadamente dois segundos garante que a recepção se estenderá até o último estado gerado pela caixa de testes.

5.3.1 Resultados

No teste de fidelidade do sistema de oscilografia da interface IHM, foi obtido o perfil de corrente e de tensão na fase A injetados pela caixa mostrados pelas figuras 31 e 32.

Essas figuras foram obtidas de dois ensaios, um apenas para a avaliação da tensão e outro que serviu a avaliação da corrente.

Nas figuras 33 e 34, podemos ver a oscilografia dos sinais recebidos, programadas em OpenGL:

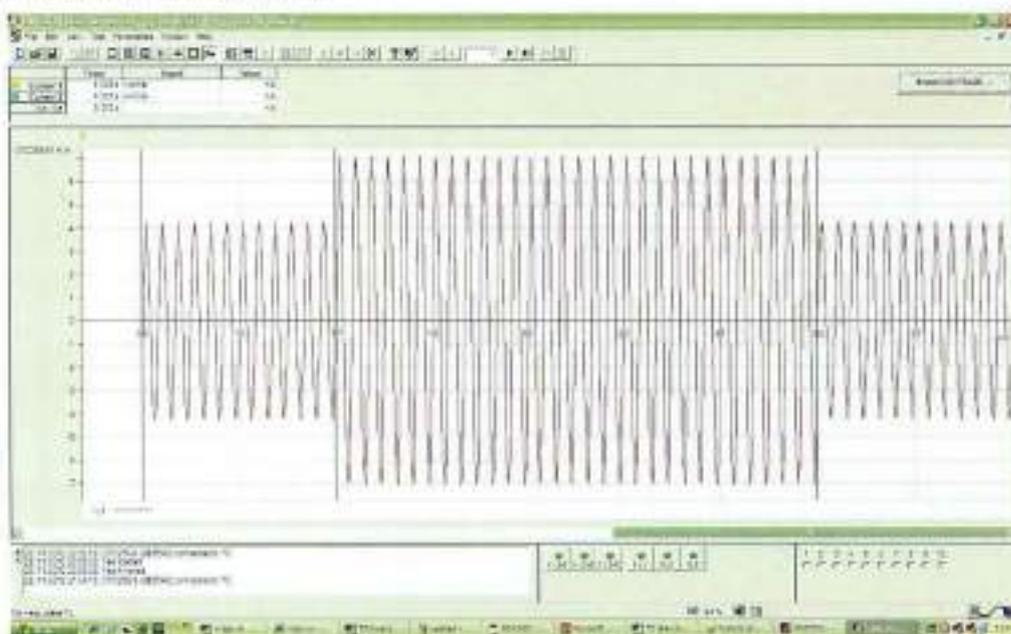


Figura 31: forma de onda de corrente gerada pela caixa de testes para o ensaio de fidelidade ao sinal transmitido.

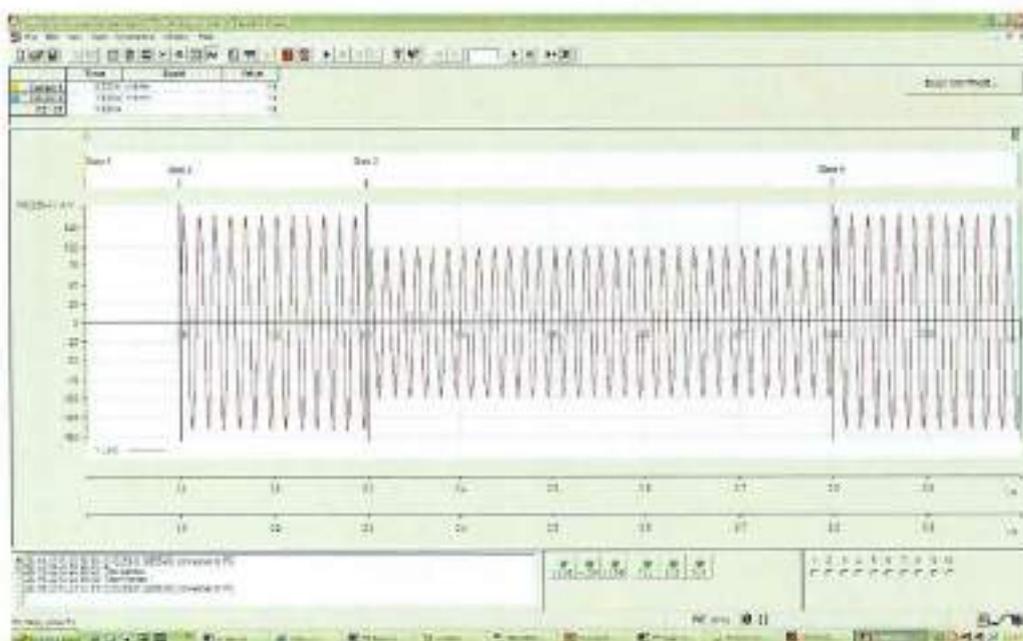


Figura 32: forma de onda de tensão gerada pela caixa de testes para o ensaio de fidelidade ao sinal transmitido.

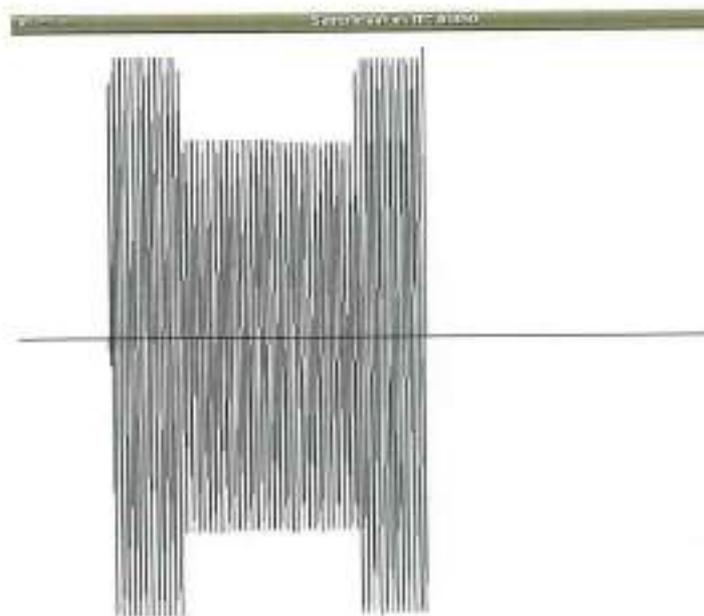


Figura 33: Oscilografia gerada no computador de captura para o ensaio da tensão.

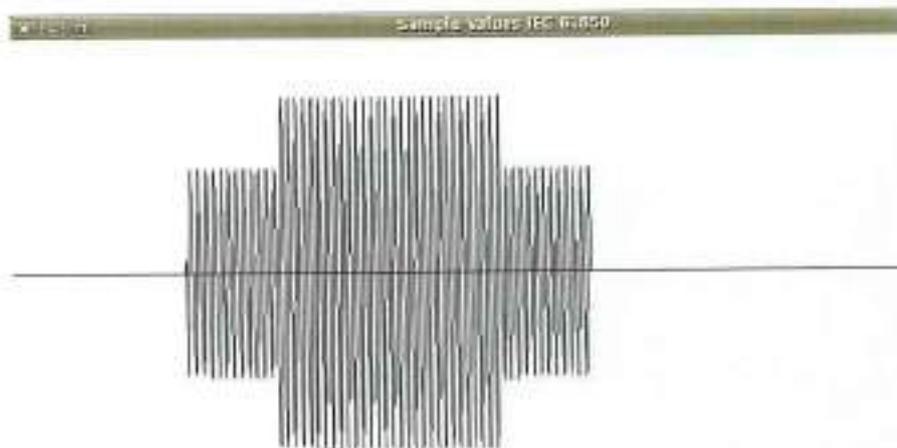


Figura 34: Oscilografia gerada no computador de captura para o ensaio de corrente.

Embora as figura sejam apenas qualitativa e não contenham graduações de escala, para subsidiar discussões mais profundas, ela nos dá uma visão qualitativa da fidelidade da oscilografia da recepção e da geração, comprovando a funcionalidade do projeto.

Para o teste de escrita em arquivo, foram geradas correntes e tensões em todas as fases, com o mesmo comportamento, como mostra a figura 35.

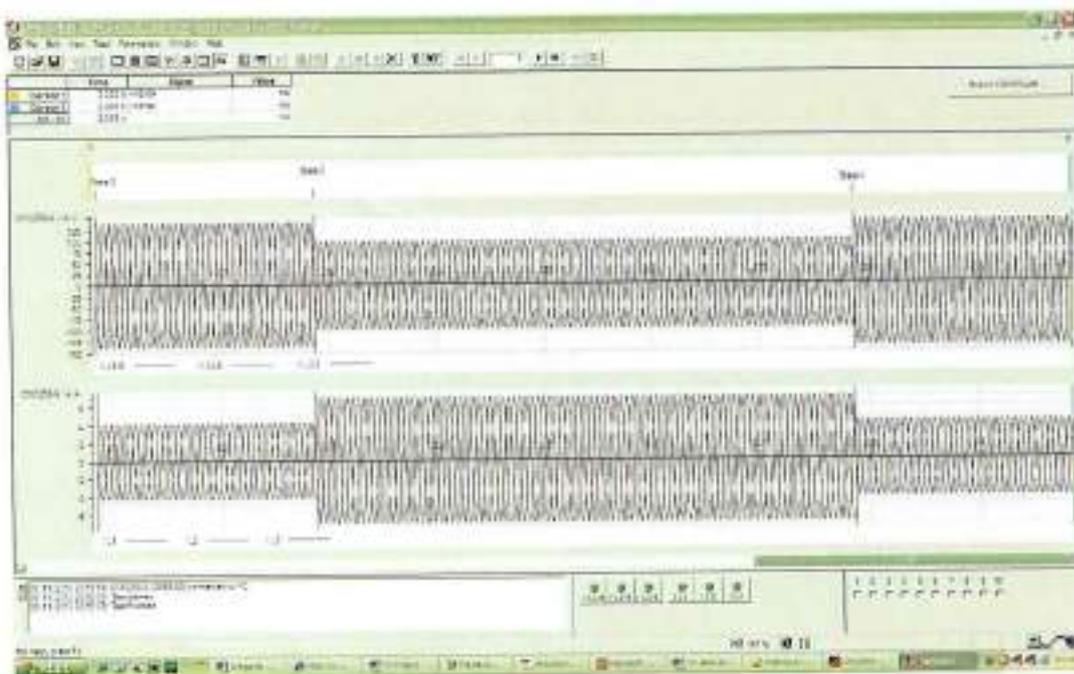


Figura 35: oscilografia gerada pela caixa para o ensaio de fidelidade simultâneo das três fases e grandezas.

A possibilidade de escrita em arquivo no Excel não dá uma definição tão boa para tantos ciclos e três fases, como acontece com a oscilografia da caixa OMICRON, mas ainda assim podemos mostrar que os resultados têm fidelidade ao valor transmitido. A tabela 12 nos dá os parâmetros de rede para transmissão utilizados neste ensaio. Já a tabela 13 nos mostra dados de codificação (valores de base utilizados) e estatísticas relacionadas à recepção dos pacotes *sample values*. As figuras 23, 24 e 25 mostram a tensão e as correntes de proteção e medição nas três fases obtida no início do estado 1, baseando-se em 32 amostras de cada fase. As primeiras amostras foram tomadas no instante 226,7591 ms (*sample counter* = 219) e as últimas foram tomadas no instante 275,699 ms (*sample counter* = 266).

| DADOS DE REDE: | |
|-----------------------------|-------------------|
| Mac Destino: | 01 0c cd 04 0a 0b |
| Mac Origem: | 00 0a 0b 0c 0d 0e |
| Tag Protocol Identifier: | 8100 |
| Tag Control Information: | 8004 |
| Ethertype: | 88BA |
| Application Identifier: | 4000 |
| Abstract Syntax Notation 1: | 80 34 01 |
| MSVID: | 01 0c cd 04 0a 0b |
| Logical Node Name: | 2 |
| Dataset Name: | 1 |
| Logical Device Name: | 1 |
| Status Word 1: | 0 |
| Status Word 2: | 0 |
| Sample Rate: | 16 |
| Configuration Revision: | 0 |

Tabela 12: Parâmetros de transmissão utilizados no ensaio de fidelidade simultâneo.

| DADOS DE BASE: |
|--|
| Corrente de Fase: 1 |
| Corrente de Neutro: 2 |
| Tensão de Fase: 100 |
| Base de Tempo: 1 |
| DADOS DE ESCALA - IEC 61850: |
| Corrente de Fase - Proteção: 0x01CF (rflag = 0) |
| Corrente de Fase - Medição: 0x2D41 |
| Tensão de Fase: 0x2D41 |
| Corrente de Neutro: 1 |
| Tensão de Neutro: 1 |
| DADOS GERAIS E ESTATISTICAS |
| Foram recebidos 1920 pacotes. |
| Houveram 0 pacotes perdidos.(0 %) |
| Media de tempo entre as amostras: 1.040033 |
| Desvio Padrão de tempo entre as amostras: 0.094865 |
| Atraso acumulado: -2.095003 |
| Atraso em relação ao ideal por pacote: -0.001043 |

Tabela 13: Valores referentes à codificação das amostras utilizados no ensaio simultâneo de fidelidade.

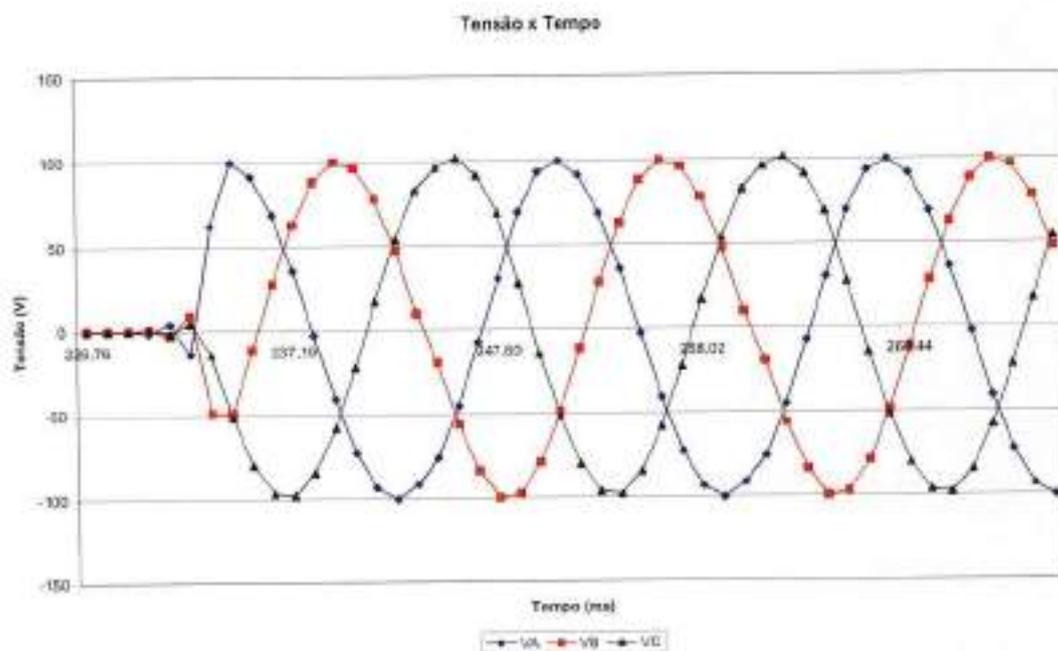


Figura 36: Amostras tomadas no início do estado 1. A caixa liga após um comando da botoeira e começa a gerar 100 V.

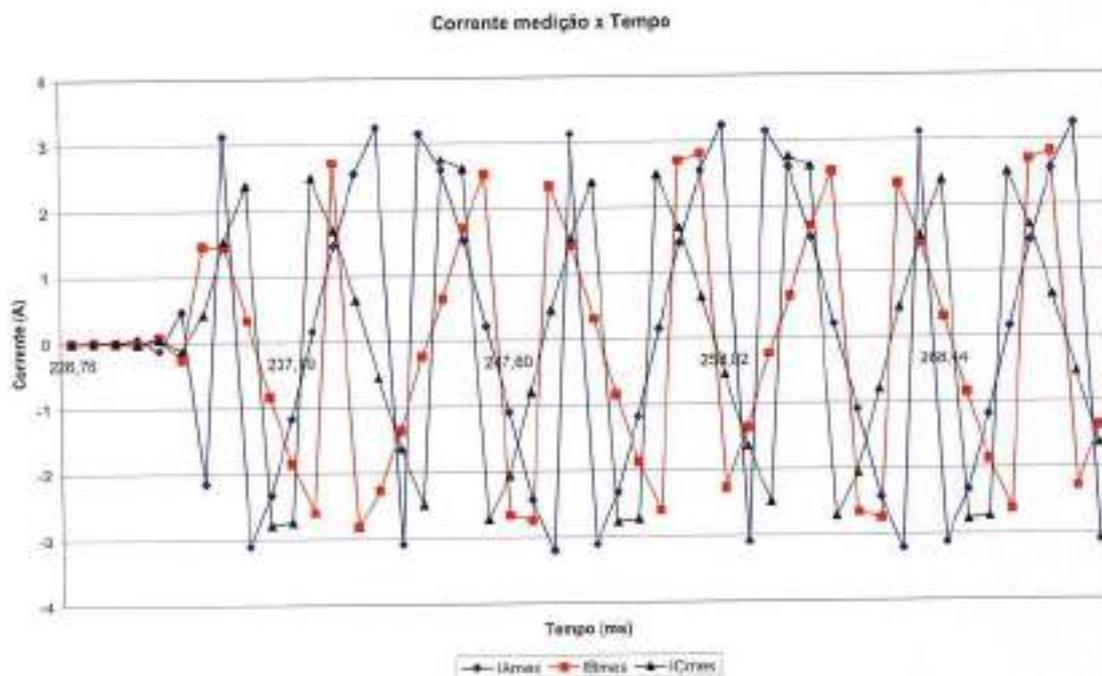


Figura 37: Amostras tomadas no início do estado 1, codificadas segundo escalas de medição. Como a corrente de base é de 1 A, há ocorrência de *overflow*.

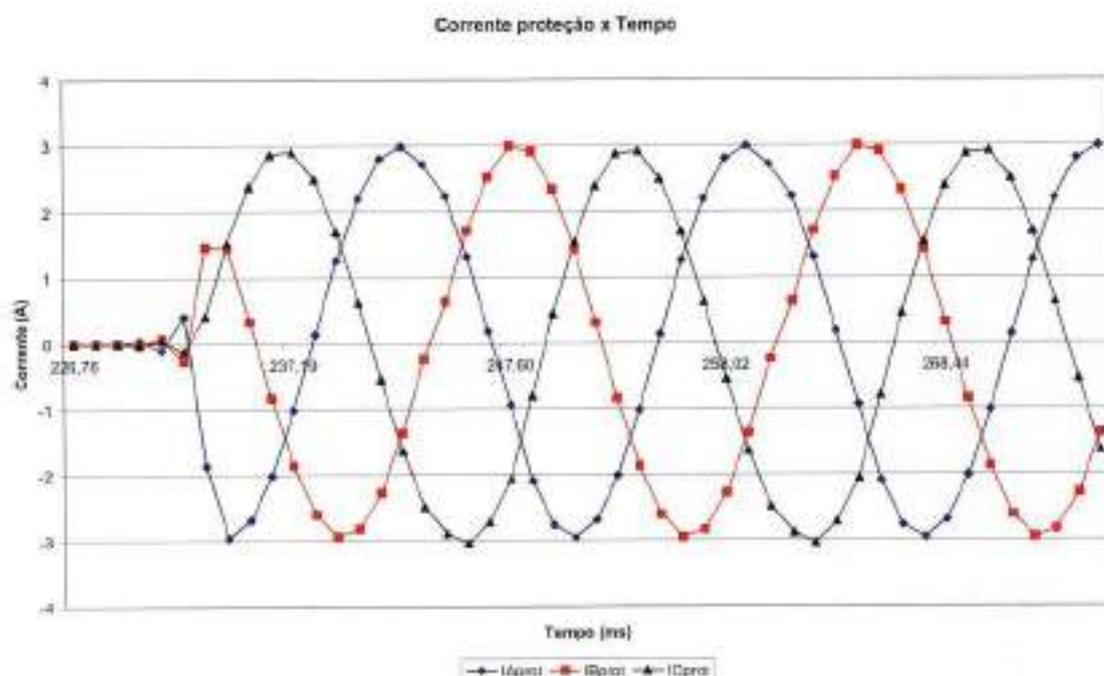


Figura 38: Amostras tomadas no início do estado 1, codificadas segundo escalas de proteção.

Além da fidelidade da onda trifásica recebida, cabe notar mais um fenômeno. Como a corrente de base é 1 A, note que os conjuntos de amostras de corrente destinados à medição, como foi ponderado anteriormente, conseguem representar até duas vezes o valor de base sem a ocorrência de *overflow*, o que acaba acontecendo devido à corrente máxima ser de 3 A. Por sua vez os conjuntos de amostras destinados à proteção, multiplicado por um fator de escala diferente, apresenta fidelidade na representação da corrente. Já os valores de tensão se comportam como o esperado na oscilografia. Em todos os gráficos, as amplitudes correspondem ao valor esperado.

As figuras abaixo ilustram o momento onde foi registrada a sobrecorrente e a subtensão na caixa de testes. As amostras foram tomadas do instante 384,9291 ms (sample counter = 371) ao instante 478,586 (sample counter = 461).

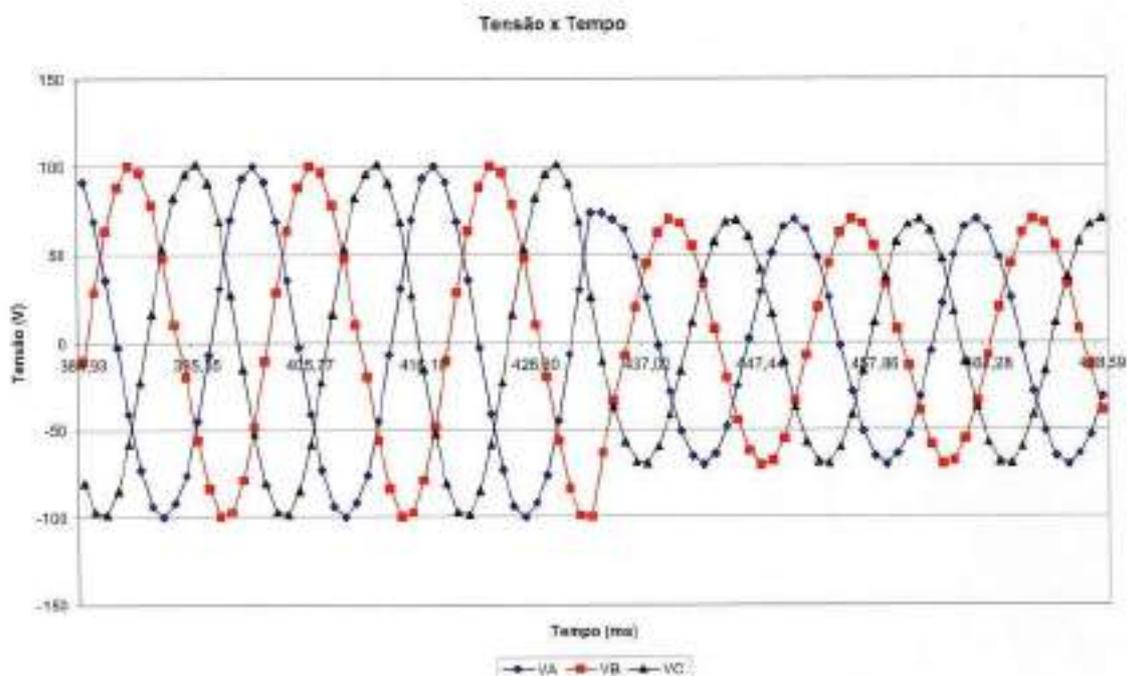


Figura 39: Início do período de subtensão programado na caixa de testes (estado 3).

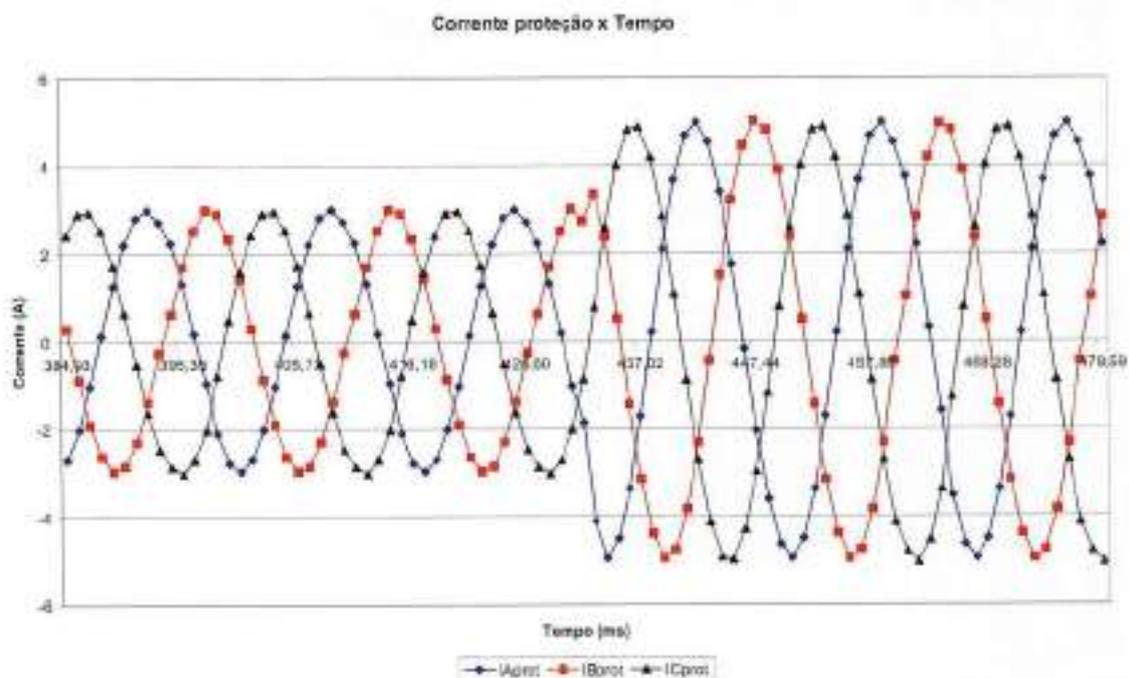


Figura 40: Início do período de sobrecorrente programado na caixa de testes (estado 4).

5.3.2 Conclusões Parciais

Nota-se que houve a reprodução fiel dos valores gerados pela caixa de testes, inclusive no que se refere à amplitude, como verificado no Excel. Pode-se ainda verificar a ocorrência de *overflow* nas amostras multiplicadas pelas escalas voltadas à medição dos valores. Os aspectos que poderiam ser levados em conta em estudos de aprofundamento são: influência de parâmetros como tempo de funcionamento e temperatura dos componentes da *merging unit* no valor das amostragens; injeção de tensões com componentes harmônicos de modo a verificar sua representação a partir das amostragens voltadas à medição e levantar a resposta em frequência deste sistema; injeção de tensões e correntes desequilibradas, verificando o desempenho das amostragens de corrente de medição e proteção; simulação de curtos fase-terra e fase-fase, para monitoramento da oscilografia da corrente de neutro e tensão na barra, entre outros. Em virtude do propósito do estudo, considera-se que o teste de fidelidade aos sinais injetados foi realizado com sucesso.

6. CONCLUSÕES FINAIS

O propósito deste estudo foi averiguar a possibilidade de transmissão de valores amostrados seguindo as especificações da norma IEC 61850. Isso implicou a necessidade de consulta também à norma IEC 60044-8, o desenvolvimento de um sistema de transmissão e recepção de valores amostrados e a escolha de parâmetros que avaliassem este sistema. Tudo isso resultou em um longo projeto de engenharia desenvolvido ao longo desse ano. Muitos conceitos referentes à amostragem de dados, redes de computadores, transmissão, recepção e estudo dos tipos de dados, programação de firmware, programação em C e OpenGL, entre outros, foram requisitados.

Com relação aos testes de desempenho, pode-se dizer que todos tiveram o resultado esperado, porém, todos abrem caminhos para estudos mais aprofundados. O principal aprofundamento apontado em todos os testes seria a influência de fatores externos no funcionamento do hardware adaptado à implementação de uma *merging unit*. A conclusão a que se chega, baseado nos requisitos exigidos pela proteção é a de que os componentes de uma *merging unit* devem apresentar máximo desempenho e a operação do equipamento deve ser cuidadosamente monitorada.

Verificou-se que a IEC 61850 é passível de implementação e dentro das condições permitidas do LPROT, os testes apresentaram bons resultados. Estudos mais aprofundados poderão simular condições mais adversas, avaliando o impacto dessas condições no sistema de transmissão de valores amostrados. De qualquer forma, tanto esse estudo como outros que se realizarão apontam para o futuro dos sistemas de automação: além a digitalização de valores em campo e a transmissão em rede, de modo a aumentar a confiabilidade do sistema de automação, a especificação garantida por um sistema aberto de modo a garantir a autonomia dos clientes deste mercado em relação aos fabricantes.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE PSRC H6; Application Considerations of IEC 61850/UCA 2 for Substation Ethernet Local Area Network Communication for Protection and Control
- [2] Brand, K. P. Introduction to the Standard IEC 61850. ABB University Switzerland. [s.n]. 2006. Paginação irregular.
- [3] IEC International Electrotechnical Commission. Draft Communication networks and Systems in substations. Part 7-2: Basic Communication Structure for substation and feeder equipment – Abstract communication service interface; IEC 61850-7-2. 2003.
- [4] IEC International Electrotechnical Commission. Draft Instrument Transformers. Part 8: Electronic Current Transformers; IEC 60044-8. 2002.
- [5] IEC International Electrotechnical Commission. Draft Communication networks and Systems in substations. Part 9-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled Values over serial unidirectional multidrop point-to-point link; IEC 61850-9-1. 2003.
- [6] IEC International Electrotechnical Commission. Draft Communication networks and Systems in substations. Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled Values over ISO/IEC 8802-3; IEC 61850-9-2. 2004.

