

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TELEINFORMÁTICA E REDES DE
COMPUTADOR

RÔMULO FABRÍCIO CORNA

**USO DA IEEE 1588 E DO SDN PARA A APLICAÇÃO DA NORMA
IEC61805-9-2: substituição de sinais analógicos por LAN em subestações de
energia elétrica**

MONOGRAFIA

CURITIBA

2015

RÔMULO FABRÍCIO CORNA

**USO DA IEEE 1588 E DO SDN PARA A APLICAÇÃO DA NORMA
IEC61805-9-2: substituição de sinais analógicos por LAN em subestações de
energia elétrica**

Monografia apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de especialista em Teleinformática
e Redes de Computadores da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Profº Alexandre S. P. Cardoso, MSc. (Orientador)

CURITIBA

2015

RÔMULO FABRÍCIO CORNA

**USO DA IEEE 1588 E DO SDN PARA A APLICAÇÃO DA NORMA
IEC61805-9-2: substituição de sinais analógicos por LAN em subestações de
energia elétrica**

Monografia apresentado como requisito parcial para obtenção do título de especialista em Teleinformática e Redes de Computadores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Campo de Conhecimento: Gestão de Tecnologia da Informação.

Data de Aprovação:

___/___/___

Banca Examinadora:

Prof° Alexandre S. P. Cardoso, MSc.

Prof° Augusto Foronda, Ph.D.

CURITIBA

2015

RESUMO

CORNA, Rômulo Fabrício. Uso da IEEE 1588 e do SDN para aplicação da norma IEC61805-9-2: substituição de sinais analógicos por LAN em subestações de energia elétrica. 2015. 47 f. Monografia. (Especialização em Teleinformática e Redes de Computadores) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Novas tecnologias nas subestações e uma necessidade de reduzir os custos de projeto e construção, estão conduzindo para a adoção do barramento de processos baseado em redes ethernet para subestações. Aplicações de controle, proteção, medição e monitoramento podem compartilhar o barramento de processo, tornando a infraestrutura da rede ethernet mais eficiente. Esta monografia define os requisitos para os protocolos usados no barramento de processos e apresenta a análise sobre outras tecnologias que deveriam ser consideradas para aplicar o conceito da norma IEC 61850-9-2, assim como PTP e SDN.

Palavra-chave: Sampled Value, IEC 61850-9-2, PTP, SDN.

ABSTRACT

CORNA, Rômulo Fabrício. Use of IEEE 1588 and SDN to apply standard IEC61850-9-2: replacement of analog signals by LAN in electrical energy substation. 2015. 47 f. Monografia. (Especialização em Teleinformática e Redes de Computadores) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

New substation technology and a need to reduce design and construction costs, are driving the adoption of Ethernet based digital process bus networks for high voltage substations. Protection and control applications can share a process bus, making more efficient use of the network infrastructure. This paper defines requirements for the protocols used in a process bus based on application and presents an analysis about other technologies that should be considered in order to apply the concepts of the standard IEC 61850-9-2, such as PTP and SDN.

Keywords: Sampled Value, IEC 61850-9-2, PTP, SDN.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Níveis Lógicos em um SAS..... | 17 |
| Figura 2 - Nós Lógicos para Diferentes Níveis | 18 |
| Figura 3 - Serviços na transmissão de SV | 19 |
| Figura 4 - Camadas do Modelo OSI..... | 20 |
| Figura 5 - Definições para SV | 20 |
| Figura 6 - Avaliação do link delay com mecanismo peer delay | 25 |
| Figura 7 - Mecanismo Delay Request-Response | 26 |
| Figura 8 - Definição do tempo de transferência..... | 27 |
| Figura 9 - Arquiteturas de Rede | 29 |
| Figura 10 - Circuitos Lógicos..... | 31 |
| Figura 11 - Reconfiguração da Rede | 31 |
| Figura 12 - Barramento de Processo | 34 |
| Figura 13 - Barramento de Processo | 36 |
| Figura 14 - Sistema Convencional | 37 |
| Figura 15 - Bay..... | 38 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Nós lógicos de proteção..... | 17 |
| Tabela 2 - Classes de Precisão para <i>Sampled Value</i> | 28 |
| Tabela 3 - Resultados de testes de Reconfiguração..... | 29 |
| Tabela 4 - Quantidade de cabos de Cobre para um <i>bay</i> | 39 |
| Tabela 5 - Interfaces Convencionais..... | 40 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|---|
| BNC | - Bayonet Neill–Concelman |
| CSWI | - Logical Node Switch Control |
| EIA | - Electronic Industries Alliance |
| GPS | - Global Positioning System |
| HSR | - High Availability Seamless Redundancy |
| IEC | - International Electrotechnical Commission |
| IED | - Intelligent Equipment Device |
| IEEE | - Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IRIG | - Inter Range Instrumentation Group |
| LAN | - Local Area Network |
| MAC | - Media Access Control |
| MMXU | - Logical Node Measuring |
| NTP | - Network Time Protocol |
| PDIF | - Logical Node Differential Protection |
| PDIS | - Logical Node Distance Protection |
| PDU | - Protocol Data Unit |
| PIOC | - Logical Node Instantaneous Overcurrent Protection |
| PRP | - Parallel Redundancy Protocol |
| PTUV | - Logical Node Undervoltage Protection |
| PTOC | - Logical Node Time Overcurrent Protection |
| PTP | - Precision Time Protocol |
| RSTP | - Rapid Spanning Tree Protocol |
| SDN | - Software Defined Network |
| SV | - Sampled value |
| TC | - Transformador de corrente |
| TCTR | - Logical Node Current Transformer |
| TP | - Transformador de Potencial |
| TVTR | - Logical Node Potential Transformer |
| VLAN | - Virtual Local Area Network |
| XSWI | - Logical Node Switch |
| XCBR | - Logical Node Circuit Breaker |

SUMARIO

| | |
|---|-------------|
| RESUMO | IV |
| ABSTRACT | V |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | VI |
| LISTA DE TABELAS..... | VII |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS..... | VIII |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 1.1 Objetivo da Pesquisa..... | 12 |
| 1.2 Justificativa Teórica e Prática..... | 14 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA..... | 15 |
| 2.1 Série de normas IEC 61850 | 15 |
| 2.2 Sincronização do tempo..... | 21 |
| 2.3 Gerenciamento e arquitetura da rede..... | 27 |
| 3 METODOLOGIA | 33 |
| 4 APRESENTAÇÃO E discussão dos resultados..... | 34 |
| 4.1 Barramento de processos | 34 |
| 4.2 Diferenças entre o sistema convencional e o proposto | 38 |
| 4.3 Reconfiguração da rede | 40 |
| 4.4 Avaliação da Precisão de Tempo entre métodos de sincronização ... | 42 |
| 4.5 Discussões dos resultados..... | 44 |
| CONCLUSÃO | 46 |
| REFERÊNCIAS | 47 |
| GLOSSÁRIO..... | 49 |

1 INTRODUÇÃO

As concessionárias de energia elétrica têm implantado redes Ethernet em subestações, sendo que muitos hardwares e softwares existem como resultante da Internet e das redes locais Ethernet (LAN) nos escritórios e fábricas. Entretanto os requisitos dentro de uma subestação são elevados, uma vez que as subestações (SE) são locais de operação no sistema elétrico de potência (SEP) (DUARTE, 2012). A comunicação dos equipamentos dentro de uma subestação é decisiva para manter elevada a taxa de disponibilidade do sistema, e requisitos devem ser levados em conta como: alta velocidade de comunicação entre relés de proteção, alta disponibilidade, garantia de entrega dos pacotes de comunicação, padrão para os protocolos utilizados garantindo interoperabilidade de vários fornecedores, suporte para transferência de arquivos e suporte para a segurança (MACKIEWICZ, 2006).

Dessa forma com a necessidade da padronização dos protocolos de comunicação dos Sistemas de Automação de Subestação (SAS), foi criada uma série de normas conhecida como IEC 61850, que é o resultado do trabalho dos grupos do Comitê Técnico do IEC (International Electrotechnical Commission). O objetivo da série de normas IEC 61850 é melhorar o padrão da comunicação e suportar desenvolvimentos que venham melhorar a comunicação no futuro. Os perfis dos protocolos de comunicação são baseados, quando possível, em normas internacionais existentes. Esta norma vem se destacado no setor elétrico, pois foi projetada sobre tecnologias de redes modernas, isso possibilita reduzir custos para projetar, fabricar, instalar, comissionar, manter e operar os Sistemas de Potência. Ela é a única norma que cobre a comunicação nos três primeiros níveis do sistema de automação e proteção de uma subestação, nível de estação, nível de vão e nível de processo, e entre eles (DUARTE, 2012).

A norma IEC 61850-9-2 detalha quão rápidos os valores amostrados devem ser enviados pelo protocolo SV (*Sampled Values*) sobre a rede Ethernet. A norma IEC 61850-8-1 define como fazer a transdução dos sinais analógicos e como eles serão transmitidos sobre a rede ethernet usando os protocolos GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Events*) e o protocolo MMS (*Manufacturing Messaging*

Specification) é definido pela norma ISO 9506 (IEC-61850-8, 2004). O IED utilizado no nível de processo é a ¹*merging units* (MU) e fornece as medições em formato digital ao invés de fornecer em valores analógicos, tipicamente de 1A e 115V. Numa tentativa para reduzir a complexidade e variabilidade da implementação do SV, foi desenvolvido em 2004 uma norma chamada de "9-2 *Light Edition*" ou "9-2LE". Essa guia especifica que dados são transmitidos, taxas de amostragem, requerimentos de sincronização e interface física (IEC-61850-9-2, 2003).

Toda mudança de tecnologia exige um tempo de análise para que possa ganhar confiabilidade. O processo de implantação da norma nas subestações foi por etapas, o primeiro passo foi inserir os conceitos no nível de vão e estação. O nível de vão é constituído por Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED) que recebe os sinais do secundário do transformador de corrente (TC) e de potencial (TP), que são normalmente de 1A e de 115V, e processam lógicas de controle manobrando disjuntores e chaves seccionadoras e lógicas de proteção abrindo disjuntores com o intuito de preservar o SEP de distúrbios na rede elétrica tomando atitudes em quatro milissegundos, sendo que cada equipamento pode proteger setores distintos na subestação, como linha de transmissão, transformador, banco de capacitores, barra, entre outros. O nível de estação requisita dados do nível de vão, com o objetivo de supervisionar e exibir através de uma interface homem-máquina as informações, para que sejam analisadas corretamente pelo usuário. Dessa forma para que haja uma eficiente coordenação, proteção e controle desses equipamentos, é exigido da rede ethernet um elevado grau de confiabilidade e disponibilidade.

A próxima etapa é o nível de processo, nesse nível é realizada a medição das grandezas analógicas, no qual o esquema atual prevê cabos de cobre o sinal do secundário dos transformadores de tensão e corrente até os medidores e relés de proteção que se localizam dentro das casas de controle.

¹ Dispositivo eletrônico que converte sinais analógicos em dados digitais, com o intuito de distribuí-lo pela rede ethernet.

Sendo assim quando o sinal elétrico chega aos bornes dos IEDs, eles são convertidos por transdutores e transformados em sinais digitais, para ser realizado todos os cálculos dentro das lógicas. Nesse ponto as grandezas analógicas de corrente, tensão, e as grandezas que são calculadas através delas como potência, energia e frequência, entre outras já pode ser disponibilizado na rede ethernet para que outros relés no nível de vão ou no nível de estação possa ter acesso aos dados (IEC-61850-9-2, 2003).

A aplicação das normas IEC 61850-9-1 e IEC 61850-9-2 consistem em levar a rede ethernet até os equipamentos no nível de processo, dessa forma o próprio TC e TP teria integrado um IED que já faria no local a transdução do sinal analógico para digital, e já disponibilizaria na rede as amostras da medição, com a vantagem de não precisar lançar os inúmeros cabos de cobre pela subestação, todos os cabos seriam substituídos por um par de fibras para cada IED. Essa mudança elimina alguns problemas que serão discutidos neste trabalho, porém exige que a rede disponibilize algumas ferramentas novas e suportar um tráfego de dados muito alto, este trabalho irá apontar quais são as necessidades que a rede e os equipamentos necessitam suportar além de apontar os pontos fracos e fortes dessa nova maneira de obter as leituras analógicas do sistema elétrico.

1.1 Objetivo da Pesquisa

Apresenta-se a seguir o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar as dificuldades para a implantação das normas IEC 61850-9-1 e IEC 61850-9-2, que consiste em modernizar o arranjo atual de transdução dos sinais analógicos, disponibilizando para os relés de proteção uma medida digital no lugar de um sinal analógico de 1A ou de 115V. Essa implantação exigirá melhor desempenho da rede ethernet, sendo necessária uma melhora coletiva dos equipamentos e softwares envolvidos na comunicação dos dados. O objetivo é analisar como essa implantação ocorrerá e qual o impacto que a rede ethernet sofrerá com o acréscimo dos dados digitalizados e disponibilizados por um

protocolo específico chamado *Sampled Value* (SV). A arquitetura de switches deste sistema poderá ser em anel, estrela ou ²*Ladder*, e estará conectada com equipamentos digitais de proteção, controle, medição, monitoramento e sinalização, dedicados a cada elemento do sistema elétrico (linhas, transformadores, alimentadores, banco de capacitores, etc.).

1.1.2 Objetivo Específico

- Analisar como o Sistema de Automação da Subestação é proposto pela série de normas IEC 61850;
- Descrever o que é *sampled value* e definir como é realizada sua transmissão;
- Apresentar quais são os métodos de sincronização convencionais;
- Definir os requisitos da norma IEC 61850 para o sincronismo dos IEDs;
- Conceituar o PTP melhor opção de sincronismo para os requisitos da norma IEC 61850;
- Apresentar método amplamente utilizado para reconfiguração de redes;
- Conceituar o SDN como opção de reconfiguração de redes;
- Discutir e analisar os arranjos dos equipamentos no nível de processo e no nível do *bay*;
- Pontuar as diferenças entre o sistema convencional e o proposto pela norma IEC 61850-9-2;
- Discutir as diferenças e vantagens entre o SDN e o RSTP para reconfiguração de rede;
- Discutir as diferenças e vantagens entre o PTP e o IRIG-B para sincronização do tempo.

²Arquitetura de switches com um formato que lembra uma escada, os switches são dispostos de dois em dois, como camadas e conectados entre si.

1.2 Justificativa Teórica e Prática

O entendimento e a aplicação da série IEC 61850 ainda passa por um processo de estudos e experimentação, principalmente pelo fato de enfrentar conceitos tradicionais que estão estabelecidos e muito bem difundidos entre os profissionais do setor elétrico, a parte da norma IEC 61850-9-2 traz inúmeros avanços na forma de trabalhar com o sistema de potência, e entender essas mudanças para aplicá-las da melhor maneira é fundamental.

Este trabalho tem o intuito de discutir as tecnologias envolvidas na implementação da norma IEC 61850-9-2 a fim de compreender a complexidade, abordando novos conceitos que devem também ser compreendidos e implementados dentro de uma subestação de energia elétrica.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Apresenta-se a seguir, em forma de tópicos, a série de normas IEC 61850, a sincronização no tempo e o gerenciamento e arquitetura da rede.

2.1 Série de normas IEC 61850

Ela pode ser melhor entendida através dos três tópicos a seguir:

2.1.1 Qual seu objetivo

O objetivo da série de normas IEC 61850 é permitir a integração e interoperabilidade das informações de uma subestação utilizando padrões abertos e não proprietários, visando à redução dos custos de engenharia, projetos, comissionamento, monitoramento, diagnóstico e manutenção, mas ao mesmo tempo este padrão tem compromisso com as exigências de desempenho, suportando futuros desenvolvimentos. A série compreende muito mais que um protocolo de comunicação, pois cobre não apenas a comunicação, mas também filosofias, modelos e ferramentas de engenharia, abordando a automação como um conjunto de funções que possam interoperar de forma distribuída, permitindo intertravamentos de alta velocidade incluindo sinais de disparo e transmissão de sinais analógicos de TC e TP transdutados, conectados através de uma rede ethernet confiável e segura (DUARTE, 2012, p. 15).

Para reduzir as caras, complexas e longas conexões elétricas de cabos de cobre que conectam os equipamentos de pátio, tais como disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores de corrente e de tensão bem como para facilitar os sinais de comunicação a seção da norma IEC 61850-9-2 sugere uma LAN entre os equipamentos do pátio e os equipamentos de proteção e de controle. Essa LAN é conhecida como barramento de processo. A comunicação entre os equipamentos do nível de processo e do nível de estação seria feito por dois tipos de mensagens *peer-to-peer*: o GOOSE (*generic object-oriented substation event*) estaria responsável por enviar valores digitais com alta prioridade como um disparo ou um bloqueio, além de leituras analógicas sem estampa de tempo, essa comunicação dispensaria os cabos elétricos que levariam os sinais de estado e de comandos dos equipamentos de pátio até os painéis de controle e proteção. A

outra mensagem *peer-to-peer SV (sample Value)* estaria responsável em substituir todos os cabos de corrente e tensão que saem dos secundários dos transformadores e levam os sinais analógicos até os transdutores de cada IED. Essa mensagem leva diretamente do transformador as mensagens já digitalizadas através de uma fibra óptica diretamente para a LAN que estaria compartilhando toda essa informação (SUN; REDFERN; CROSSLEY, 2011).

2.1.2 Definições retiradas da Norma

Dentro da norma encontramos algumas definições, que necessitam ser esclarecidas para o entendimento geral e de onde pretendemos chegar. O Objetivo da norma é estabelecer requisitos específicos para fornecer uma PDU que possibilite a interoperabilidade entre os fabricantes.

As funções do sistema de automação da subestação (SAS) é controlar, monitorar e proteger os equipamentos da subestação e dos ³*bays*. As funções do SAS podem ser logicamente alocadas em três diferentes níveis: processo, estação e *bay*. Esses níveis podem são apresentados na Figura 1:

- a) Nível de processo: são os equipamentos que possuem interface de entradas e saídas digitais e sensores inteligentes;
- b) Nível de *bay*: equipamentos que servem para controlar, monitorar e proteger o *bay*;
- c) Nível de estação: consistem no computador com a base de dados, o lugar de trabalho do operador e a interface com comunicação remota.

³Conjunto de chaves seccionadoras e disjuntor que interliga uma linha de transmissão ou uma linha de distribuição a um barramento de uma subestação de energia elétrica.

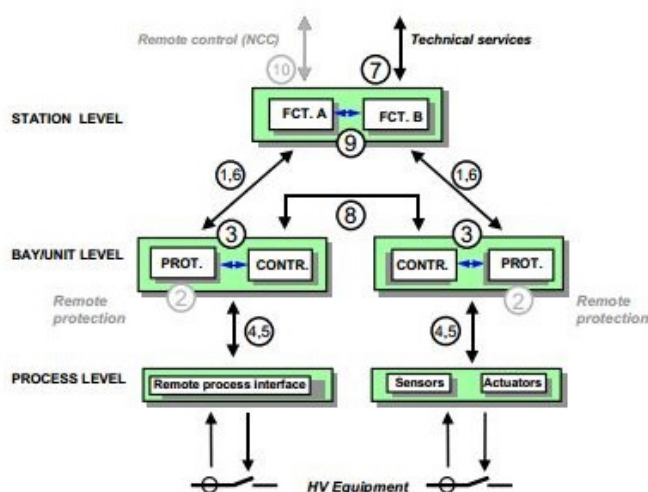


Figura 1 - Níveis Lógicos em um SAS
Fonte: IEC61850-5 (2003).

A numeração das interfaces de acordo com a Figura 1 é útil para identificar os tipos de interface. Os equipamentos que constituem esses níveis são construídos segundo o modelo de dados orientado a objeto, composto de funções, nós lógicos, classe de dados e atributos que modelam o serviço de uma subestação. As funções são compostas por partes menores chamadas de nós lógicos, por exemplo, temos o nó lógico XSWI que monitora o estado de uma chave seccionadora, e o CSWI que controla a seccionadora, os atributos dessas funções são as entradas e saídas digitais de dispositivo controle (IEC 61850-5). Os dispositivos de proteção possuem nós lógicos e seus atributos são tensão e corrente dos *bays*. Na Tabela 1 temos alguns nós lógicos e sua equivalência com a norma IEEE C37.2-1996:

Tabela 1 - Nós lógicos de proteção

| <i>Nó lógico</i> | <i>IEC 61850</i> | <i>IEEE C37.2-1996</i> |
|----------------------------------|------------------|------------------------|
| <i>Proteção de distância</i> | PDIS | 21 |
| <i>Proteção de Subtensão</i> | PTUV | 27 |
| <i>Proteção de Sobrecorrente</i> | PIOC | 50 |
| <i>Proteção Diferencial</i> | PDIF | 87 |

Há também os nós lógicos para o sistema de medição, o TCTR e o TVTR fornecem respectivamente a corrente e a tensão de uma fase do transformador que está medindo a linha ou a barra. O nó lógico MMXU requisita os valores do TCTR e do TVTR para calcular potência ativa, reativa e aparente, além de frequência e ângulo. As funções de proteção também requisitam informações dos

nós lógicos como atributos para executarem suas funcionalidades. Nos três níveis lógicos temos inúmeros nós lógicos, sendo que a Figura 2 apresenta a composição dos diferentes nós lógicos nos diferentes níveis:

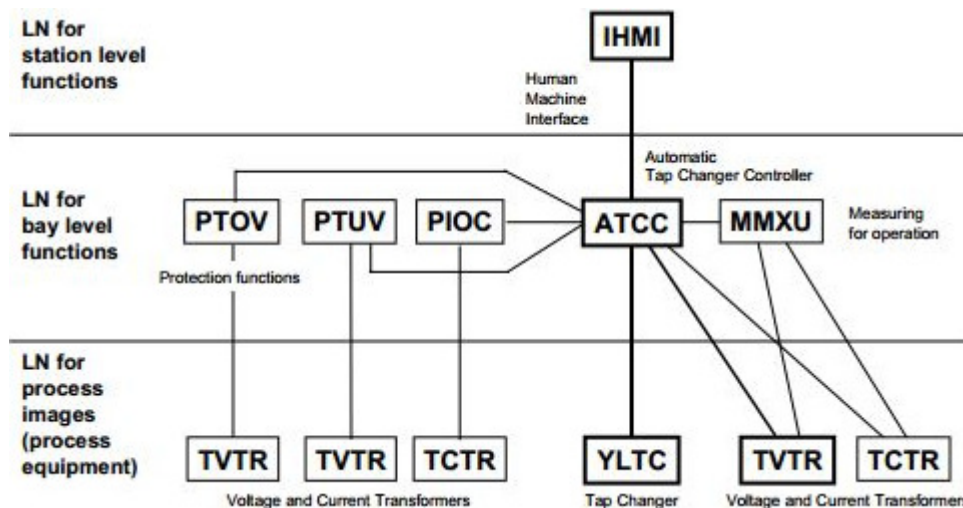


Figura 2 - Nós Lógicos para Diferentes Níveis
Fonte: IEC 61850-5 (2003).

2.1.3 Transmissão de Sampled Value (SV)

Sampled value são amostras instantâneas de valores analógicos com estampa de tempo, enviados pela rede ethernet a dispositivos de proteção e controle que contenham nós lógicos de proteção como PTOC e nós lógicos de medição como MMXU. A transmissão de SV requer atenção especial com as limitações de tempo, o modelo prevê um caminho da comunicação bem controlado e organizado. A informação trocada deve ser baseada no mecanismo de publicação e assinatura, que consiste em o que publica deve escrever os valores em um buffer local no lado de envio, e o que assina deve ler os valores em um buffer do lado do que recebe. A estampa de tempo deve ser adicionada aos valores, para que o assinante possa conferir a pontualidade dos valores. O sistema de comunicação fica responsável em suprir o buffer local dos assinantes, enquanto que o controle dos *sampled value* (SVC) é usado para controlar o procedimento de comunicação.

A entrega de dados pode ser ⁴*unicast* ou ⁵*multicast*, na Figura 3 é apresentada uma visão geral sobre o modelo de serviços para a transmissão de SV (IEC 61850, 2004).

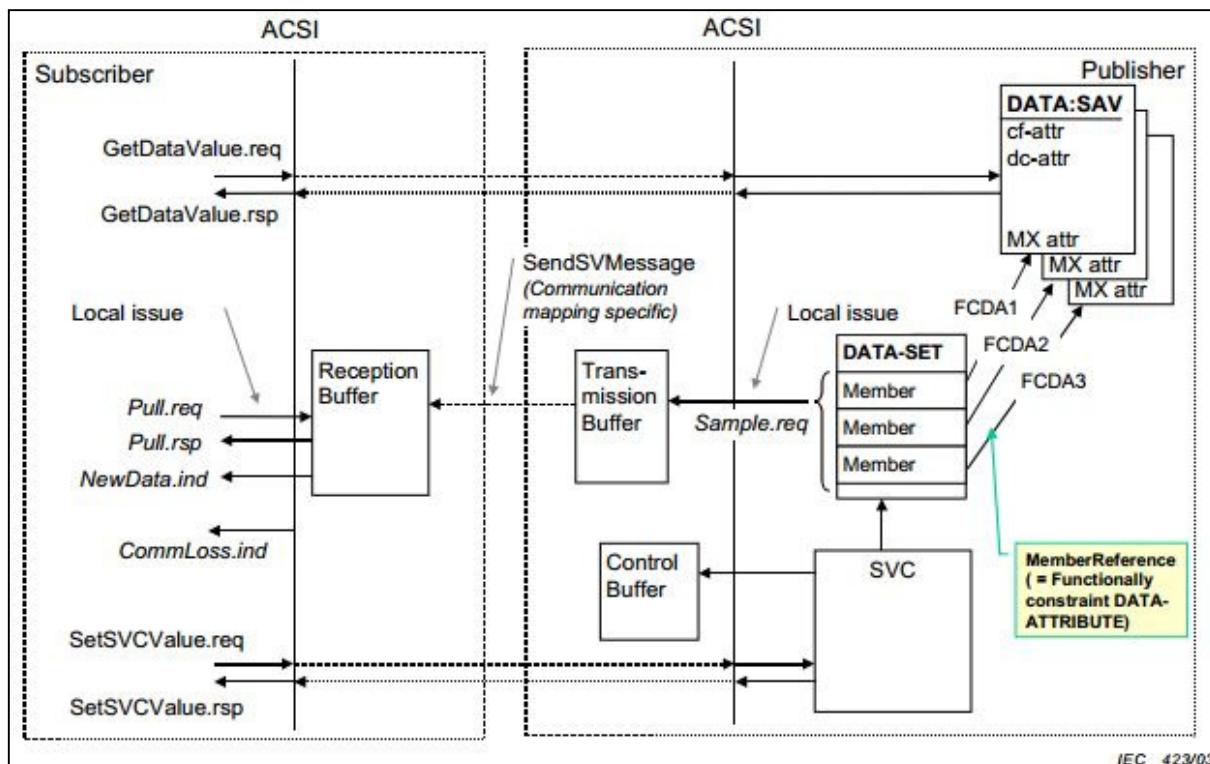


Figura 3 - Serviços na transmissão de SV
Fonte: IEC 61850-7-2

A Figura 4 apresenta o perfil das camadas OSI para o SV, para o sistema de transmissão destaca-se o sistema 100Base-FX de acordo com a ISO/IEC 8802-3 por causa de requisitos eletromagnéticos do ambiente. O SV suporta VLAN, a IEEE 802.1Q também está implementada permitindo a implementação de prioridade nas mensagens, sendo que de 4 a 7 as PDU têm maior prioridade, enquanto de 1 a 3 as PDU têm menos prioridade (IEC 61850-9-2, 2004).

⁴Endereçamento para um pacote feito a um único destino, a entrega no *unicast* é simples, ponto-a-ponto.

⁵É a entrega de informação para múltiplos destinatários simultaneamente usando a estratégia mais eficiente onde as mensagens só passam por um link uma única vez.

| OSI model layer | Specification | | | m/o |
|--|---|---|------------------------|-----|
| | Name | Service specification | Protocol specification | |
| Transport | | | | |
| Network | | | | |
| DataLink | Priority tagging/VLAN | IEEE 802.1Q | | m |
| | Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) | ISO/IEC 8802-3:2001 | | m |
| Physical | Fibre optic transmission system 100Base-FX | ISO/IEC 8802-3:2001 | | c1 |
| | Basic optical fibre connector NOTE This is the specification for the ST connector. | IEC 60874-10-1, IEC 60874-10-2 and IEC 60874-10-3 | | c1 |
| c1 – Recommended, but future technology could be used. | | | | |

Figura 4 - Camadas do Modelo OSI
Fonte: IEC 81850-9-2 (2004).

Os endereços *multicast* usado dentro da norma terá uma estrutura na qual os três primeiros octetos são designados pela IEEE como 01-0C-CD. O quarto octeto 04 para SV e ao menos dois octetos usados para identificar os endereços de cada assinante, esses octetos podem variar de 00-00 até 01-FF. A Figura 5 mostra as definições que são utilizadas para estabelecer a comunicação das SV dentro da linguagem de programação. O valor MAC (Media Access Address) é único para cada IED que for um assinante da SV e deve ter seus 4 primeiros octetos fixados em 01-0C-CD-04 para que os roteadores identifiquem a prioridade dessas mensagens. As VLAN são utilizadas para evitar que a informação seja encaminhada a alguns IED que não necessite desses valores analógicos instantâneos (IEC 61850-9-2, 2004).

| P-type designation | Description | m/o | Restrictions/comments |
|---|----------------------------|-----|--|
| MAC-Address | Media Access Address value | m | Shall be 6 groups of 2 visible characters separated by hyphens(-). Characters shall be limited to 0-9 and A-F. |
| APPID | Application Identifier | o | Shall be 4 characters. Characters shall be limited to 0 to 9 and A to F. |
| VLAN-PRIORITY | VLAN User Priority | c1 | Shall be a single character. Characters shall be limited to 0 to 7. |
| VLAN-ID | VLAN ID | o | Shall be 3 characters. Characters shall be limited to 0 to 9 and A to F. |
| c1 – Shall only be present if VLAN is also present. | | | |

Figura 5 - Definições para SV
Fonte: IEC 61850-9-2 (2004).

A mensagem *sampled value* trabalha na segunda camada OSI, pois assim consegue os requisitos de tempo e possui alta velocidade, trabalha com *Priority Tag* e VLAN. O APDU é estruturado por um ou mais ASDU's, sendo que cada ASDU contém seu *dataset* com os dados digitalizados e a informação de qualidade destes dados. A amostra digitalizada é um valor inteiro de 32 bits, sendo as quatro primeiras informações são correntes (fases A, B, C e neutro) e as quatro últimas são referentes à tensão (fases A, B, C e neutro). A qualidade é composto por quatro bytes e pode ser: *good, invalid ou questionable* (PEREIRA; LOURENÇO, 2015).

2.2 Sincronização do tempo

Ela pode ser entendida através dos três tópicos a seguir:

2.2.1 Protocolos de sincronizações amplamente difundidos

2.2.1.1 IRIG

A mais utilizada ainda é o padrão conhecido como IRIG-B que utiliza cabos metálicos e uma porta específica no equipamento, com conector BNC ou borne. Esse padrão estabelece um sinal TTL em uma taxa de 100 pulsos por segundo, no qual transmite do GPS ao IED, os dias do ano, horas, minutos e segundos em uma frequência de 1 kHz o que permite ao IED uma precisão do tempo de 1ms. Essa precisão é suficiente para registrar informações dos elementos que compõem o sistema elétrico com uma precisão suficiente (IRIG, 2004).

IRIG-B pode ser distribuída sobre cobre ou fibras óticas, contudo raramente pode fornecer a precisão que o SV exige (INGRAM; CAMPBELL, 2011).

2.2.1.2 Network Time Protocol (NTP)

Esse protocolo é utilizado para sincronismo de redes de computadores, amplamente difundido, mas não tem características essenciais para um protocolo de sincronismo necessário em uma subestação como precisão de microssegundos e gerenciamento para redundância de rede (RFC 5905, 2010).

2.2.1.3 Pulso por segundo (PPS)

Um sinal pulso por segundo (PPS) consiste em uma série de pulsos, sendo que o pulso inicia no instante em que o tempo em que passa pelo zero, a cada

segundo no instante zero ele pulsa, com o intuito de manter a referência dos relógios que estão se baseando nesse pulso. Esse protocolo não envia a informação do tempo, mas garante o instante zero. Esse padrão é definido pela norma IEC 60044-8.

2.2.2 Requisitos segundo a norma IEC 61850

A precisão de sincronização depende dos requisitos da função, podemos ter nós lógicos como XCBR que monitora o estado dos disjuntores e requisita somente eventos com estampa de tempo nesse caso a precisão deve ser em torno de 1 milissegundo. Podemos ter também nós lógicos como TCTR que fornece dados brutos da corrente de um transformador, sendo que essas informações serão utilizadas para que outros nós lógicos, como os de proteção, tomem decisões, elas devem possuir uma precisão elevada de 1 microssegundo (IEC 61850-5).

Barramento de processo baseado na norma IEC 61850-9-2 deve ser amostrado com eventos que contenham a precisão especificada na IEC 61850-5. A Tabela 2 lista as classes que a norma IEC 61850-5 aponta ser relevante para a LAN do barramento de processo. A classe de P2 e P3 são utilizadas para *bays* de linhas de transmissão, enquanto que a P1 é relevante para *bays* em subestações com linhas de distribuição. A norma IEC 61850-9-2 especifica que um pulso por segundo (PPS) com precisão de aproximadamente microssegundo para as *merging units*, contudo se as propagações das mensagens são superiores a 2 microssegundos, esse tempo deve ser compensado na *merging unit*.

2.2.3 Precision Time Protocol (PTP)

O desempenho de redes Ethernet em tempo real depende de uma eficiente rede de sincronização de tempo, por essa razão a IEEE 1588 define um novo padrão de sincronização por rede, conhecido como *Precision Time Protocol* (PTP), sendo utilizado para sincronizar relógios de sistemas de medição e controle, ele depende de uma fonte de tempo como o GPS, este padrão permite precisões melhores que 1 nanossegundo, o protocolo tem características para aplicações no qual a redundância e a segurança são requisitos. A fonte primária de tempo em um sistema que utilize o PTP é um relógio chamado de *grandmaster*, ele

geralmente inclui um receptor GPS, fornecendo um tempo comum para a rede, existem também os relógios *slave* que recebem o tempo do *grandmaster* e convertem para outros protocolos de sincronismo como PPS e IRIG-B o terceiro elemento no sistema do PTP é o relógio *transparent* fornece o cálculo e a correção do tempo, são switches gerenciáveis que por estar no caminho entre o *grandmaster* e os *slave* pode contribuir para o cálculo do atraso de tempo causado pelo deslocamento da informação. (IEEE 1588, 2008).

O protocolo é desenvolvido para trabalhar em ambientes *multicast*, o transporte das mensagens pode ser realizado diretamente por diferentes protocolos, como UDP (IPv4 e IPv6) e *ethernet* (IEEE 802.3), sendo que *ethernet* é ideal para implementar o PTP, pois ele é tolerante a perdas de frames das mensagens, mensagens duplicadas ou frames que chegam fora de ordem. O PTP assume que as mensagens que são geradas são periodicamente enviadas por uma porta e entregues a todas as portas dentro de um percurso da comunicação. O protocolo não é capaz de detectar a assimetria da rede, entretanto, se conhecido ele pode ser corrigido dentro do protocolo, sistemas devem ser configurados na rede para evitar a assimetria da rede. O relógio mestre do PTP é sincronizado pelo *International Atomic Time* (TAI) através da constelação de GPS, pois o GPS é uma excelente ferramenta de transferência de tempo (INGRAM; CAMPBELL, 2011).

Todas as redes têm limitações na distância, número de nós, switches e tráfego, o PTP foi projetado para minimizar esses efeitos de atraso, para conseguir o melhor desempenho do PTP, a topologia da rede deveria ter como uma restrição mínima da separação dos dispositivos que irão sincronizar com os dispositivos que serão sincronizados, os switches devem suportar a implementação do PTP a fim de que não introduza *timing jitter* e caminhos assimétricos na rede (IEEE 1588, 2008).

O sistema do PTP é organizado dentro de uma hierarquia Mestre e Escravo, com o relógio padrão no topo da hierarquia. PTP tem se mostrado ser viável método de fornecer tempo de sincronismo para *sampled value*, sendo que propagações de atrasos são compensados, esse protocolo apresenta benefícios sobre IRIG-B e sistemas de 1 PPS em transmissão dentro de subestações (INGRAM; CAMPBELL, 2011).

2.2.3.1 Mensagens PTP

A norma define duas classes de mensagens PTP, uma de evento e outra geral. As mensagens de evento são mensagens nas quais a estampa de tempo com alta precisão é gerado tanto na transmissão quanto na recepção. A mensagem geral não requer estampa de tempo, mas pode conter uma estampa de tempo com baixa precisão.

As mensagens *Announce* é utilizada para estabelecer a hierarquia de sincronização. As mensagens *Sync*, *Delay_Req*, *Follow_uo*, *Delay_Resp* são utilizadas na geração da comunicação de sincronismo para relógios comuns (*ordinary*) e de relógios de fronteira (*boundary*) utilizando o mecanismo delay request-response. As mensagens *Pdelay_Req*, *Pdelay_Resp* e *Pdelay_Resp_Follow_Up* são utilizados para medir o atraso entre duas portas que implementam o mecanismo *peer delay* (MENON; HABIB, 2015).

2.2.3.2 Mecanismo *Peer Delay*

No mecanismo *peer delay*, a avaliação do atraso de propagação é executada entre portas que compartilham o mesmo link sem depender da direção da mensagem *Sync*. Este mecanismo é realizado mesmo sem portas bloqueadas por outros protocolos, para o caso de troca de caminho da mensagem *Sync*. O processo demonstra como a porta 1 calcula o *link delay*.

- A porta 1 envia a mensagem *Pdelay_req* com estampa de tempo t_1 ;
- A porta 2 recebe a mensagem *Pdelay_req*, gerando o timestamp t_2 ;
- Na sequência a mensagem *Pdelay_Resp* é enviada com carimbo de tempo t_3 . Para minimizar o offset entre as portas, a mensagem *Pdelay_Resp* é enviada o mais breve possível após a recepção da mensagem *Pdelay_Req*. A porta 2 pode:
 - Através da mensagem *Pdelay_Resp* retornar a diferença entre os timestamps t_2 e t_3 ;
 - Fazer o mesmo, utilizando a mensagem *Pdelay_Resp_Follow_Up* (geral);

- Retornar os timestamps t_2 e t_3 nas mensagens `Pdelay_Resp` e `Pdelay_Resp_Follow_Up` respectivamente.
- A porta 1 registra o carimbo de tempo t_4 quando recebe a mensagem `Pdelay_Resp` (MENON; HABIB, 2015).

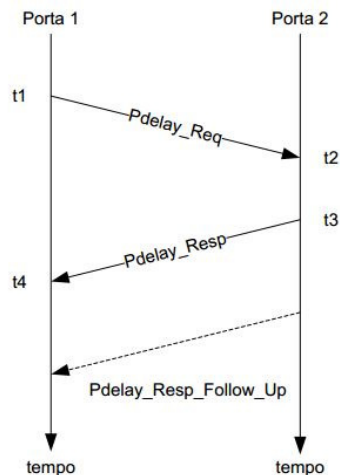


Figura 6 - Avaliação do link delay com mecanismo peer delay
Fonte: MENON; HABIB (2015)

2.2.3.3 Mecanismo Delay Request-Response

O mecanismo *Delay Request-Response* é o procedimento para sincronização e, no caso de alguns relógios, responsável pelo levantamento do atraso de propagação. O padrão básico para a sincronização é o seguinte:

- O mestre manda a mensagem `Sync` para o escravo, com o registro do tempo t_1 de quando foi enviada;
- O escravo recebe a mensagem `Sync`, e registra o tempo t_2 da recepção;
- O mestre transmite para o escravo o carimbo de tempo (*timestamp*) t_1 . Isto pode ser feito embutindo-se na mensagem `Sync` o *timestamp* ou embutir o *timestamp* na mensagem `Follow_Up` seguinte;
- O escravo envia a mensagem `Delay_Req` para o mestre, registrando o tempo t_3 de envio;
- O mestre recebe a mensagem `Delay_Req`, e registra o tempo t_4 de recepção;

- O mestre transmite para o escravo o carimbo de recepção (timestamp) t_4 embutindo-o na mensagem `Delay_Resp`.

Após a conclusão da troca de mensagens, o escravo possui os quatro carimbos de tempo (timestamps). Estes timestamps são utilizados na computação do offset do relógio escravo em relação ao mestre e ao tempo de propagação médio entre os dois relógios (MENON; HABIB, 2015).

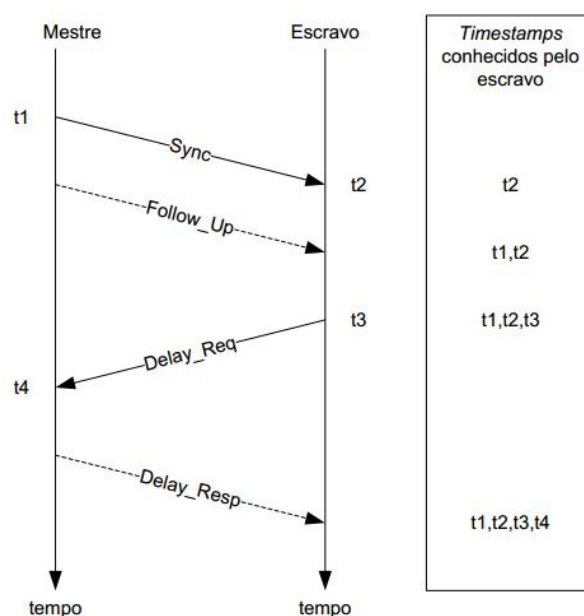


Figura 7 - Mecanismo Delay Request-Response
Fonte: MENON; HABIB (2015)

2.2.3.4 Dispositivos PTP

Existem cinco tipos de dispositivos PTP:

- *Ordinary Clock* (relógio comum);
- *Boundary Clock* (relógio de fronteira);
- *End-to-end transparent clock* (relógio transparente ponta-a-ponta);
- *Peer-to-peer transparent clock* (relógio transparente par-a-par);
- Nó de gerenciamento.

O relógio da fronteira tipicamente tem várias portas. Cada porta é basicamente um *ordinary clock*. Os relógios transparentes possuem mecanismo que compensam atrasos de propagação e o tempo no qual as mensagens

permanecem nos relógios, aumentando o desempenho. O relógio transparente *end-to-end* avalia o tempo de permanência das mensagens de evento no relógio. A informação do tempo pode ser enviada embutida na mensagem de evento ou na mensagem subsequente de *follow_up*. O relógio transparente *end-to-end* pode ser associado a sensores e atuadores, assim como relógios comuns (MENON; HABIB, 2015).

Ao contrário dos relógios *end-to-end*, os relógios *peer-to-peer* (P2P) somente corrigem e encaminham mensagens Sync e Follow_Up. O campo de correção é atualizado tanto para o tempo de permanência no relógio P2P como para o *link delay*. A correção é feita para o caminho efetivo percorrido. Já no caso dos relógios *end-to-end*, o escravo espera que mensagens percorram todo o caminho até que novos valores de correção estejam disponíveis (MENON; HABIB, 2015).

2.3 Gerenciamento e arquitetura da rede

Ele pode ser melhor entendido através dos cinco tópicos a seguir:

2.3.1 Definição de tempo de transferência

O tempo de transferência de uma mensagem conta do momento em que o emissor coloca o dado sobre a pilha de transferência, até o momento em que o receptor retira o dado da pilha de transferência.

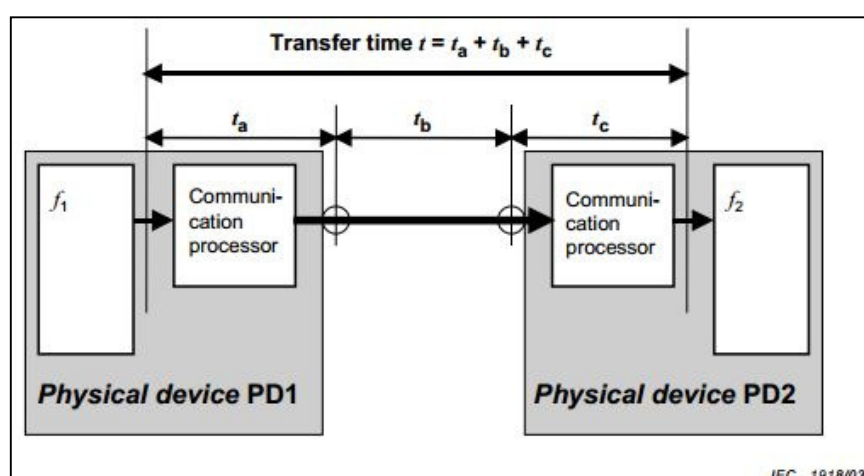


Figura 8 - Definição do tempo de transferência
Fonte: IEC-61850-5 (2003).

No dispositivo físico PD1, uma função f_1 envia uma informação para outra função f_2 , localizado em outro dispositivo PD2. O tempo de transferência consiste no tempo de processamento de cada dispositivo que seria os tempos t_a e t_c da Figura 8, e o tempo usado pelos roteadores, que são parte complementar da rede de comunicação, tempo t_b (IEC 61850-5,2003).

2.3.2 Classe de performance

Dentro de uma subestação há diferentes requisitos para o desempenho das mensagens, possibilitando dividir os tipos de mensagens em classes de performance, definindo de acordo com o que a funcionalidade necessita, sendo assim não necessariamente todos os meios de comunicação irá suportar todas as classes de performance.

Para classe de performance P3, o tempo de transmissão deve estar abaixo de um quarto de ciclo, portanto 3 milissegundos, esse tipo de mensagem carrega geralmente dados binários, com simples comandos por exemplo um disparo de abertura para um disjuntor, ou um bloqueio de alguma função de proteção.

Mensagens que são importantes para o sistema de automação, e não tem um requisito tão elevado quando a um disparo de abertura de disjuntor, sendo que a mensagem deverá conter a estampa de tempo, o tempo de transmissão fica definido 100 milissegundos.

Mensagens com dados brutos, provenientes de sensores magnéticos ou ópticos, que digitalizam medições, como um transformador de corrente ou tensão, serão continuamente enviado para cada IED, alimentando os nós lógicos que utilizam esses dados. A Tabela 2 apresenta a precisão de classe e as amostras por segundo de cada classe de mensagem (IEC 61850-5, 2003).

Tabela 2 - Classes de Precisão para *Sampled Value*
Fonte: IEC 61850 (2003).

| CLASSE DE PROTEÇÃO | PRECISÃO EXIGIDA |
|---------------------------|-------------------------|
| PERFORMANCE 1 | $\pm 25 \mu\text{s}$ |
| PERFORMANCE 2 | $\pm 4 \mu\text{s}$ |
| PERFORMANCE 3 | $\pm 1 \mu\text{s}$ |

2.3.3 Reconfiguração de rede com RSTP

Para formar a LAN entre o nível de processo e o nível de *bay*, temos algumas possibilidades de arquitetura, a Figura 9 nos traz três opções a Figura 9.a é conhecida como arquitetura em anel, a Figura 9.b apresenta a arquitetura em dupla estrela, e a Figura 9.c é a arquitetura conhecida como *Ladder*, por ser formada como degraus de uma escada.

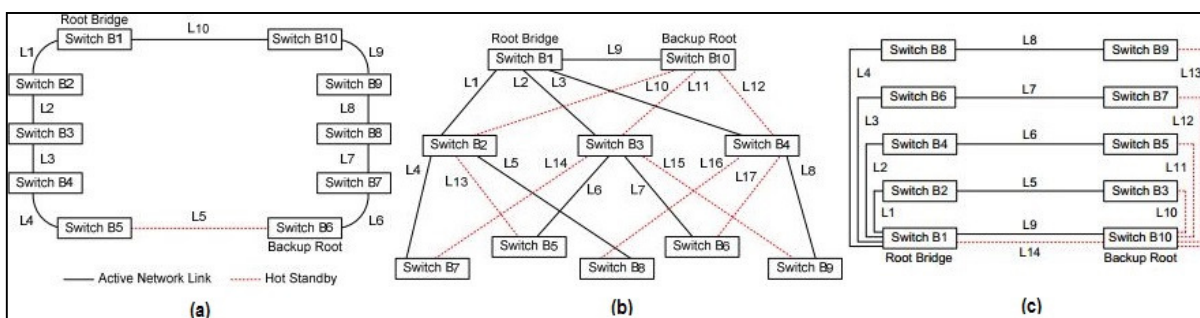


Figura 9 - Arquiteturas de Rede
Fonte: DOLEZILEK; DEARIEN; KALRA (2014).

Quando há uma falha na rede, e há tempo de escuridão onde as mensagens não podem ser recebidas. Para isso existem protocolos que ajudam a minimizar o tempo de escuridão. Quando há uma variação de um evento uma mensagem GOOSE fica 16 milissegundos sendo enviado, repetidas vezes, sendo assim a LAN tem 15 milissegundos para reconfigurar a rede sem que se perca nenhuma informação.

Utilizando um protocolo de reconfiguração de rede chamado de Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), verifica-se que a topologia que apresenta a mais rápida reconfiguração é a arquitetura *Ladder*, é possível verificar os resultados na Tabela 3, porém mesmo nesse caso quando se desliga o Root Bridge não é possível alcançar um tempo inferior a quinze milissegundos, além de essa opção requerer mais conexões do que as outras arquiteturas. Sendo assim é necessário encontrar outras opções tecnológicas que possam suprir essa debilidade (DOLEZILEK; DEARIEN; KALRA, 2014).

Tabela 3 - Resultados de testes de Reconfiguração
Fonte: DOLEZILEK; DEARIEN; KALRA, (2014)

| Topology | Every Channel Meets < 15 ms Maximum Link Loss Recovery Time | Root Bridge Death Typical Reconfiguration Time Is < 15 ms | Non-Root Bridge Death Typical Reconfiguration Time Is < 15 ms | Network Performance Is Unaffected by Additional Switches | Complexity of Choosing Pair of Perimeter Ports That Will Provide Acceptable Signaling Between IEDs |
|-----------|---|---|---|--|--|
| Ladder | Yes | No | Yes | Yes | Port selection does not matter; all pairs are acceptable |
| Dual star | No | No | No | Yes | Cannot know behavior in advance; we must test each choice |
| Ring | No | No | No | No | Cannot know behavior in advance; we must test each choice |

2.3.4 Análise do Software-Defined Networking (SDN)

SDN é uma nova arquitetura que simplifica o gerenciamento de rede, cada circuito de comunicação assume o controle da rede, pela configuração de circuitos lógicos e físicos para cada aplicação. O foco é na administração da rede, na implementação de requisitos ao invés de trabalhar com limitações para a rede. Esse gerenciamento do tráfego de dados permite que o proprietário decida como os pacotes serão encaminhados pela arquitetura indiferentemente do tipo de rede ethernet. Isso permite que o proprietário do sistema tenha controle de cada frame que será transportado no sistema. Os protocolos de reconfiguração de rede, como o RSTP, se baseiam em caminhos que são previamente estabelecidos as exigências ao invés de otimizar dinamicamente. Remove a complexidade da rede, simplesmente configurando os atributos de comunicação da sessão do protocolo, ao invés de requerer o MAC e as VLAN dentro das restrições do RSTP. Isto elimina as exigências adicionais de rede e simplifica as operações. Com a remoção do RSTP, essa largura de banda que era utilizada fica livre. Estabelecendo o monitoramento da aplicação, o envio de pacotes é controlado através do gerenciamento de fluxo do tráfego. Estes fluxos são definidos através dos atributos de engenharia definidos pelo proprietário da rede. É possível configurar um circuito para cada aplicação, separando fisicamente o tráfego de alta prioridade do de baixa prioridade, isso faz com que haja uma diminuição das diferenças de latência. Aumenta a eficiência das portas de alta velocidade, segregando tráfegos críticos como mensagens GOOSE e tráfegos apenas de monitoração como um SCADA, ou de configuração dos equipamentos, isso protege ambos os tráfegos, na

Figura 10 temos um exemplo dessa segregação (GELBERGER; YEMINI; GILADI, 2013).

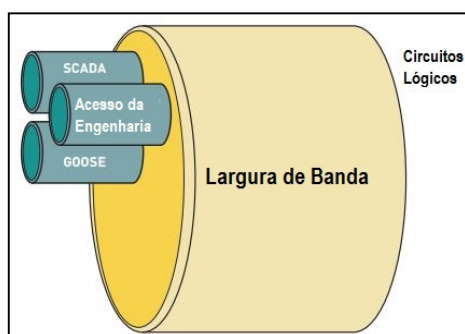


Figura 10 - Circuitos Lógicos
Fonte: GELBERGER, (2013).

Ao invés de selecionar a topologia da rede como anel, *ladder* ou estrela com o SDN é possível aperfeiçoar a rede para os equipamentos e aplicações disponíveis. Projetando o melhor circuito possível para cada seção de comunicação, contemplando circuitos de redundância. O SDN está integrado com a norma IEEE 1588, sendo assim ajuda os pacotes de tempo, chegar mais rápido ajudando a minimizar os efeitos do tempo de transferência (GELBERGER; YEMINI; GILADI, 2013).

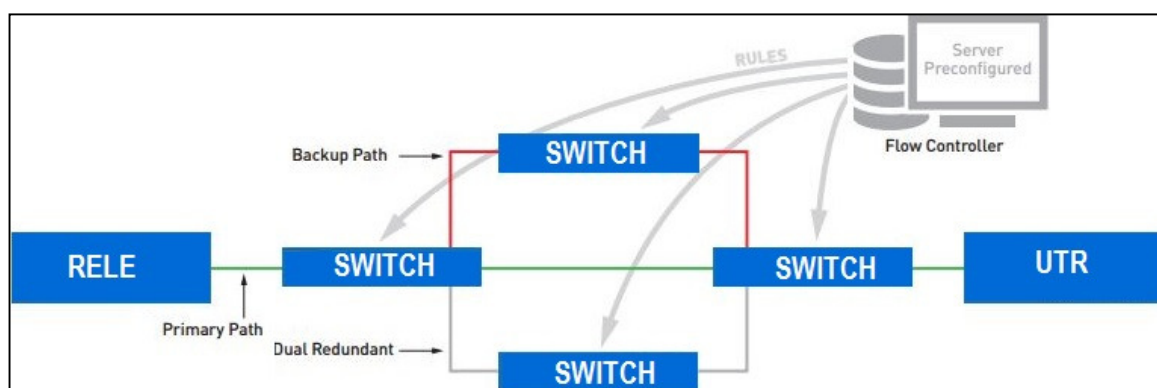


Figura 11 - Reconfiguração da Rede
Fonte: GELBERGER; YEMINI; GILADI (2013).

2.3.5 Protocolo OpenFlow 1.3

No modelo do SDN onde a separação do plano de controle do plano de dados da rede, apesar de não ser uma proposta realmente nova, ganhou força após a criação do protocolo OpenFlow 1.3, com o qual é possível programar o encaminhamento dos pacotes através de um agente externo, além de poder controlar todos os nós da rede a partir de um único ponto. (McKeown, 2008).

Através do protocolo OpenFlow temos um canal que é uma interface que conecta cada switch com o controlador. Através dessa interface, o controlador

configura e gerencia o switch, recebendo eventos do switch e enviando pacotes para o switch. O protocolo OpenFlow permite os três tipos de mensagem, a seguir (NYGREN; PTAFF; LANTZ, 2013):

- **Controller-to-switch:** são mensagens de inicialização usadas para controlar e inspecionar o estado do switch.
- **Asynchronous:** são mensagens para provocar alterações no estado do switch.
- **Symmetric:** são mensagens que podem ser geradas pelo switch ou pelo controlador, e são enviadas sem solicitação.

3 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa utilizada neste trabalho foi comparativa cujo objetivo é a formulação de questões ou de um problema, com tripla finalidade: desenvolver hipóteses, aumentar a familiaridade do pesquisador com um ambiente, fato ou fenômeno, para a realização de uma pesquisa futura mais precisa ou modificar e clarificar conceitos.

No presente trabalho, o autor optou por um problema voltado mudança de tecnologias utilizadas nas subestações elétricas, com o intuito de aumentar a familiaridade com as novas tecnologias.

O trabalho inicia-se através de revisões bibliográficas sobre os diversos assuntos envolvidos, a saber: característica geral da norma IEC 61850, características específicas da parte IEC 61850-9-2. Após esta fase são apresentadas algumas definições de novas tecnologias que estão sendo implementadas nas subestações de energia elétrica, que vai desde a sincronização dos dispositivos eletrônicos pela rede ethernet a reconfiguração de rede, quando exposta a defeitos físicos e lógicos.

Depois disso às atividades do projeto demanda realizar a análise das tecnologias que estão sendo implementadas no barramento de processo. Tendo como base as análises realizadas, foi possível apresentar as conclusões pertinentes, compondo assim o texto final do trabalho.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O objetivo geral desta pesquisa foi o de Analisar as dificuldades para a implantação das normas IEC 61850-9-1 e IEC 61850-9-2. A seguir apresenta-se quatro itens que sustentam o atingimento deste objetivo

4.1 Barramento de processos

A aceitação pelas concessionárias de energia elétrica por transformadores não convencionais, com transdutores ópticos ou capacitivos, tem sido limitado devido à falta de uma interface normalizada e a interoperabilidade entre os fabricantes. Interfaces com sinais analógicos de baixa potência estão sendo substituídos por interfaces digitais que usam redes Ethernet para a comunicação, essas interfaces são padronizadas pela norma IEC 61850-9-2. A adoção de transformadores não convencionais que são mais seguros e oferece menos risco ao meio ambiente são agora comercialmente disponíveis. Esses transformadores não convencionais incluem sensores de tensão com capacitores e transformadores de corrente com sensores ópticos.

Há também um equipamento eletrônico chamado *merging unit* que tem o intuito de ajudar a criar subestações inteiramente digitais; facilitando a conexão de transformadores de tensão e corrente convencionais com as modernas soluções de automação de subestação através da norma IEC 61850-9-2. A transmissão dos *sampled value* através de fibras ópticas elimina-se o risco do manuseio incorreto dos circuitos de tensão e corrente e faz da sala de relés um ambiente mais seguro para trabalhar, eliminando perigos e reduzindo o risco de acidentes com a equipe de trabalho.

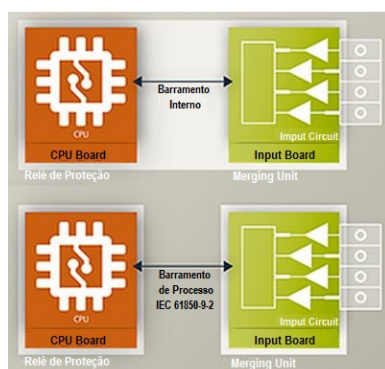


Figura 12 - Barramento de Processo
Fonte: (INGRAM, CAMPBELL, 2011).

A Figura 12 nos mostra a diferença entre o sistema convencional na subestação no qual os sinais analógicos devem ser levados até o relé de proteção para que ele faça a transdução dos sinais analógicos para sinais digitais, e no sistema proposto pela norma onde a *merging unit* faz a transdução no campo dos sinais e enviando esses valores já como sinais digitais através de uma comunicação peer-to-peer que é o *sampled value*.

A transmissão das mensagens *sampled value* é realizado por redes ethernet que utilizam como meio físico as fibras ópticas e não mais por um emaranhado de cabos de cobre. Essa rede simplifica o sistema de automação, e facilita a inovação para novas metodologias com os relés de proteção. O barramento de processo proporciona uma significativa redução de custos, simplificando as conexões entre chaves seccionadoras e a casa de controle. Os benefícios alcançados ultrapassam as economias de custo imediatas e segurança. A *sampled value* é facilmente agregada e distribuída por switches pela rede ethernet, simplificando as conexões necessárias para funções centralizadas de automação de subestações, incluindo relatório de perturbação, proteção da barra, monitoramento de qualidade de energia, e observações de sincrofasores.

Na Figura 13 é apresentada a arquitetura com seus níveis, que foi proposto pela norma IEC 61850, a LAN do barramento de estação foi o primeiro a ser aplicado pelas concessionárias de energia elétrica, e suas tecnologias já estão bem difundida, para comunicação entre os equipamentos do nível de *bay* mensagens GOOSE são amplamente utilizadas, e para comunicação do nível de bay com o nível de estação, é amplamente utilizado o protocolo MMS que é utilizado para monitorar o todos os equipamentos, esses equipamentos são sincronizados por IRIG-B e os canais de comunicação são normalmente de 100Mbps, para que as mensagens GOOSE não seja enviada a todos os equipamentos desnecessariamente produzindo mais tráfego na rede, é utilizado VLAN para delimitar os caminhos físicos que essas mensagens devem prosseguir. A configuração da VLAN é realizada nos *switches* gerenciáveis, especificando em cada switch a porta física e a VLAN que deverá passar por ele.

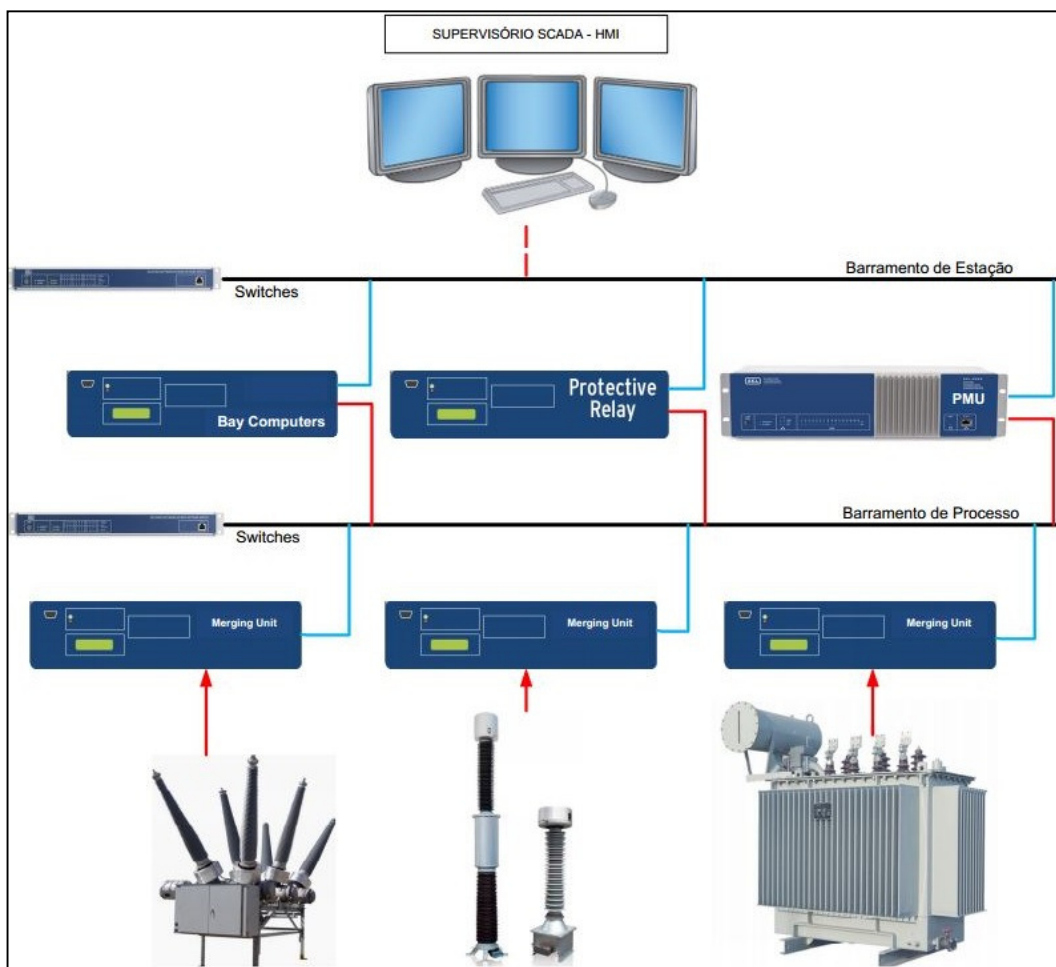


Figura 13 - Barramento de Processo

Essas tecnologias são suficientes para o barramento de estação, porém no momento em que queremos aplicar a IEC 61850-9-2 e construir o barramento de processos, nos deparamos com um grande problema a substituição das leituras analógicas por mensagens sampled value. Hoje as conexões são feitas diretamente do secundário do transformador de corrente e do transformador de potencial até o relé de proteção que fica fisicamente alocado na casa de controle, Figura 14.

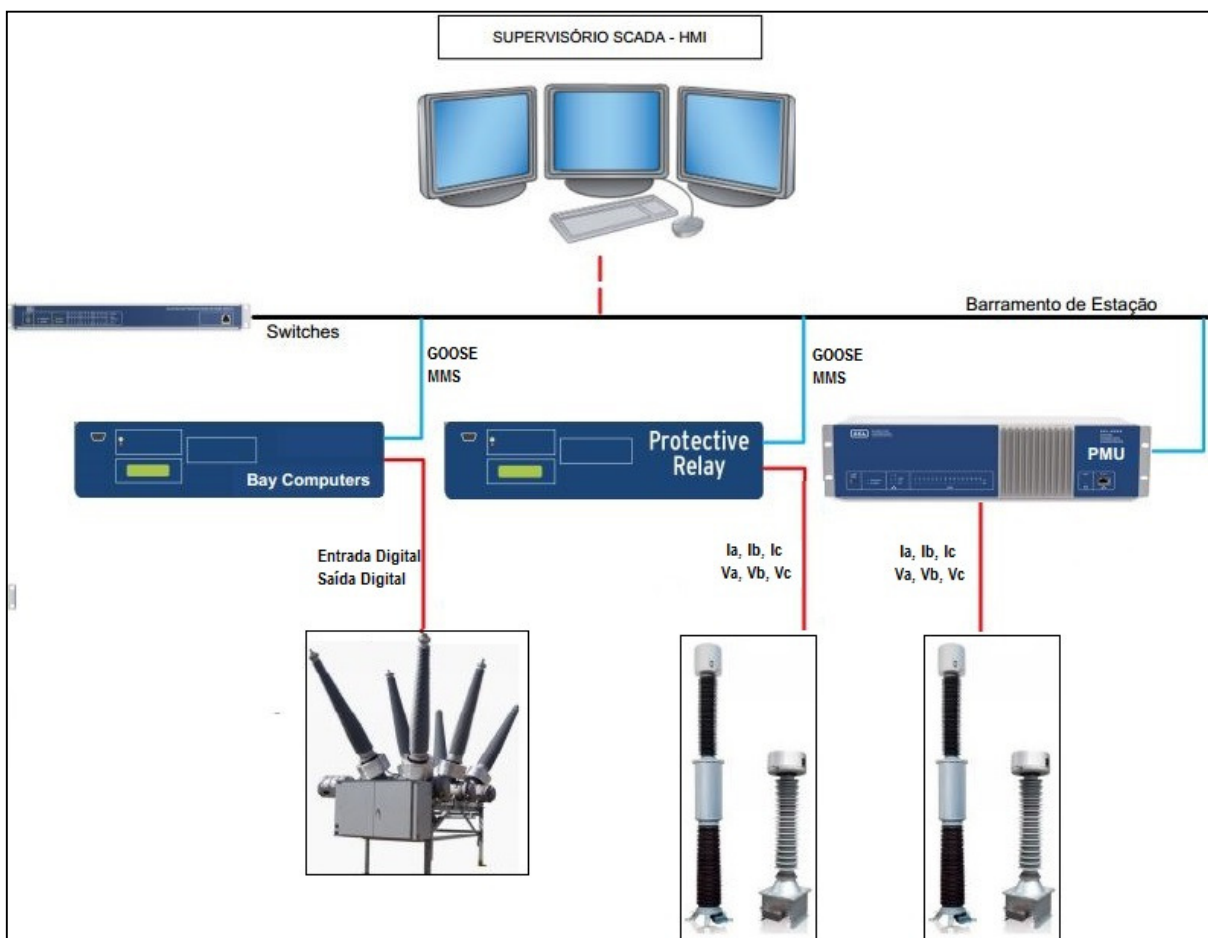


Figura 14 - Sistema Convencional

4.2 Diferenças entre o sistema convencional e o proposto

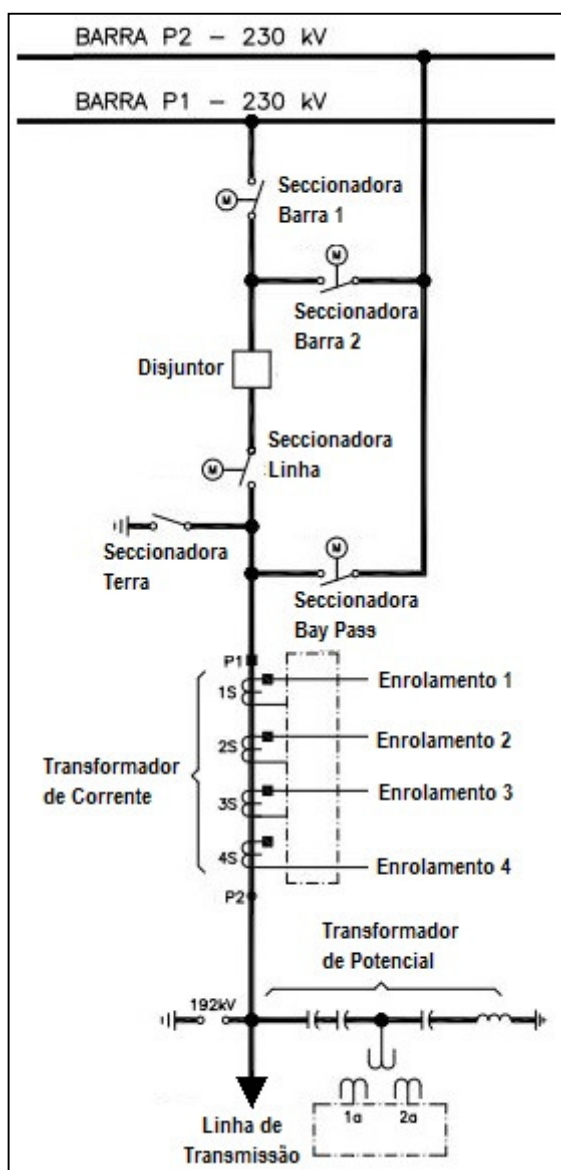


Figura 15 – Bay

Em um projeto de controle de um *bay*, onde temos geralmente cinco seccionadoras e um disjuntor para controlar e sinalizar além de e receber a leitura analógica de três transformadores de corrente, mais três transformadores de potencial, podemos ter uma ideia da quantidade de cabos de cobre que é necessário para apenas 1 *bay*, sendo eu uma subestação temos facilmente mais de quatro *bays*. A Tabela 4 mostra a quantidade de cobre necessário, que são 87 cabos, desconsiderando a bitola deles que seriam diferentes, mas considerando a distância entre a casa de controle e o *bay* que facilmente chega aos cem metros,

dessa forma contamos com a economia de quase um quilometro de cabo que é caro e difícil de manusear.

Tabela 4 - Quantidade de cabos de Cobre para um *bay*.

| Equipamento de Pátio | Entradas Digitais | Saídas Digitais | Entradas Analógicas | Total |
|--------------------------|-------------------|-----------------|---------------------|-----------|
| Disjuntor | 20 | 5 | 12 | 37 |
| Seccionadora de Barra 1 | 5 | 5 | 0 | 10 |
| Seccionadora de Barra 2 | 5 | 5 | 0 | 10 |
| Seccionadora de Linha | 5 | 5 | 0 | 10 |
| Seccionadora de Bay Pass | 5 | 5 | 0 | 10 |
| Seccionadora de Terra | 5 | 5 | 0 | 10 |
| Total | 45 | 30 | 12 | 87 |

Sendo assim com o advento e a implementação da norma IEC 61850-9-2 todos esses cabos não são mais necessários leva-los até a casa de controle mas sim até a *merging unit*, que estará abrigada em um painel próximo aos equipamentos de pátio, e da *merging unit* sairá somente duas fibras ópticas, para que o sistema de comunicação conte com uma redundância até o switch mais próximos, dessa forma todas as medidas e os sinais digitais estarão diretamente na rede ethernet.

Isso nos traz uma vantagem econômica enorme substituindo quilômetros de cobre por centenas de metros de fibras ópticas, além da vantagem no ponto de vista de segurança, pois dentro da casa de controle onde circula muitas pessoas, não haveria mais a necessidade de trabalhar e manusear com tensão e corrente em grandezas que são nocivas à saúde humana. Contudo nos traz um problema, pois ficamos exclusivamente nas mãos dos switches e nos meios de comunicação, caso esse sistema de comunicação falhe as funções de proteção não terão mais as medidas, como tomar decisões para abrir ou fechar circuitos elétricos dos sistemas de potência, ou muito menos controlar os disjuntores e chaves seccionadoras.

A solução para isso é deixar o sistema de comunicação tão robusto que não tenha a possibilidade de falhar, e que haja tantas ferramentas de supervisão e controle da rede, que ofereça redundâncias e reconfigurações da rede de uma maneira rápida que não traga prejuízos ao sistema de potência. Dois pontos são

fundamentais para que o barramento de processo seja robusto, ele necessita de uma reconfiguração da rede eficiente, e necessita que a sincronização de tempo seja preciso.

4.3 Reconfiguração da rede

A prática tem demonstrado como as aplicações realizadas em uma subestação como sincronismo, medição, monitoramento, controle e proteção estão migrando para utilizarem com meio as redes ethernet e os protocolos disponíveis dentro da série de normas IEC 61850 como MMS, SV, PTP e GOOSE, pois por muito tempo cada aplicação possuía seu sistema de comunicação em geral serial, na Tabela 5 é apresentado as interfaces convencionais das aplicações:

Tabela 5 - Interfaces Convencionais

| Aplicação | Interfaces | Protocolo |
|------------------|-------------------|-------------------|
| Sincronização | Cabo Coaxial | IRIG-B / PPS |
| Monitoramento | EIA-232 | IEC 101 / DNP 3.0 |
| Controle | EIA-232 | IEC 101 / DNP 3.0 |
| Proteção | EIA-232 / ED / SD | IEC 103 |
| Medição | EIA-485 | MODBUS |

Essas interfaces são independentes e necessita uma infraestrutura para cada aplicação. Contudo a tendência é combinar toda a comunicação dentro de uma rede ethernet compartilhada, o problema agora é que quando há um dano físico na fibra óptica interrompendo a conexão entre switches e os IEDs perdem-se todas as aplicações e não somente uma. Dessa forma faz-se necessário investir na redundância da rede para que a informação sempre tenha dois caminhos disponíveis para trafegar. Existem vários mecanismos confiáveis para rapidamente reconfigurar diferentes cenários de falhas nas redes de comunicação.

Redundância é frequentemente usada para melhorar a disponibilidade de aplicações críticas de automação e proteção. Para esta proposta redundância é definida como a inclusão de componentes e capacidades extras. Sendo que não são estritamente necessárias para a aplicação, mas fornece a funcionalidade de que se ocorrer uma falha o IED não deixará de receber uma mensagem *sampled*

value. A detecção de uma falha e a reconfiguração é tradicionalmente realizada por mensagens RSTP, quando esse protocolo reconfigura a rede em um tempo inferior a 15 milissegundos, todos ou a maioria dos pacotes GOOSE e *sampled value* são entregues. A maioria dos fabricantes recomenda que sejam construídas duas redes com RSTP, na esperança que se uma falhar a outra irá entregar o pacote. Métodos de separação de rede incluem VLAN, PRP e HSR (DOLEZILEK; GORDON; ANDERSON, 2015).

4.3.1 Vantagens da SDN sobre o RSTP

Na busca por modelos mais eficiente de reconfiguração o SDN vem se mostrando superior ao RSTP. Projetar Topologias e sugerir caminhos se baseando nos requisitos da aplicação em vez de aperfeiçoar dinamicamente o plano de controle do protocolo, tal como o RSTP é menos eficiente que configurar proativamente caminhos de tráfego primários ou caminhos em caso de falha para cada aplicação, é mais rápido do que pode ser alcançado com tecnologias de rede tradicionais.

O maior avanço que o SDN traz é a habilidade de poder configurar o fluxo de cada circuito, ditando exatamente o caminho que a mensagem viajará da fonte até o destino. Outra razão que o SDN detém um grande potencial para o barramento de processo é que o código da aplicação reside em um controlador e não nos equipamentos que formam a rede, tornando os códigos implementados nos equipamentos mais simples e sendo mais simples são mais estáveis.

O controle de mudanças na rede é difícil de gerenciar quando protocolos como RSTP tomam decisões baseados na topologia física e lógica, não nos serviços que estão rodando nos circuitos, pois como temos que definir em qual portas os equipamentos estarão conectados, caso mudemos o equipamento de porta, existe a necessidade de reconfigurar o RSTP, pois ele detecta problema justamente quando um cabo é desconectado, e se um cabo for conectado em outra porta também ocorrerá falha, pois a configuração do RSTP não está programada para encaminhar os pacotes por uma porta que estivesse desconectada ou dedicada a outra aplicação.

O SDN em contraste permite que as decisões sejam baseadas nas aplicações, sendo assim definindo de onde sairá as mensagens e onde chegará, não precisa especificar o caminho, não se baseando na topologia da rede, dessa forma se o usuário conectar o cabo em uma porta que não estivesse conectado a comunicação continuará funcionando, evitando possíveis erros de conexão e favorecendo a pujança do barramento de processo.

Outra vantagem do SDN sobre o RSTP, é que nem todos os códigos de RSTP dos diferentes fabricantes trabalham juntos, isso gera um grande problema, tendo que sempre comprar o *switch* do mesmo fabricante, para garantir um bom desempenho do sistema, sendo que com o SDN e tendo switches de diferentes fabricantes que suportam o protocolo *OpenFlow* 1.3, o operador poderá configurar a rede não precisando saber se os equipamentos que compõem a rede são do mesmo fabricante.

4.4 Avaliação da Precisão de Tempo entre métodos de sincronização para aplicações em subestações

A sincronização de tempo é exigida em subestações para garantir a precisão na estampa de tempo dos eventos. A performance do sistema tem sido garantida com a utilização do NTP, IRIG-B e 1-PPS. Entretanto novas aplicações, incluindo barramento de processos baseado na norma IEC 61850-9-2 necessitam de uma precisão de microssegundos, ou melhor. O PTP baseado na norma IEEE 1588 é o principal protocolo que está sendo utilizado em conjunto com as novas aplicações.

Os benefícios do PTP incluem compensação da distância do caminho, suporta redundância para diferentes fontes, rastreabilidade, flexibilidade da implementação e eficiência de exigir menos conexões uma vez que compartilha a estrutura da rede ethernet, pois pode ser usada para proteção da subestação, monitoramento e controle além da sincronização dos equipamentos. O IRIG-B e o PPS são não compensam a propagação do atraso provocado pelo meio, enquanto que o NTP e o PTP compensam os atrasos da rede. (INGRAM, SCHAUB, CAMPBELL, 2012).

IRIG-B pode ser distribuída sobre cabos de cobre ou ópticos, a dimensão desses cabos pode chegar a medir de 300 a 500 metros ou mais, considerando a

distância entre a casa de controle e as *merging units* que ficam no nível de processo. A velocidade da propagação do sinal é especificada para cabos metálicos com um fator de velocidade (VF) especificado como uma porcentagem da velocidade da luz no vácuo, enquanto que para a velocidade de propagação em cabos ópticos é proporcional ao índice de refração do vidro. Um cabo CAT 5 com par trançado possui uma VF de aproximadamente 66%, enquanto que a fibra multimodo de vidro possui um índice de refração de 1,5. Nos dois casos um cabo de 500 metros provocaria um atraso próximo de 2,5 microssegundos. Sendo que para compensar o atraso de cada trecho teria que conhecer exatamente as características do material, e seu comprimento, essa prática ficaria complicada na implementação, uma vez que o IRIG-B não possui nenhuma ferramenta embarcada de compensação automática do atraso, essa é uma desvantagem com relação ao PTP (AGRAWAL, 2002).

Um dos pontos críticos do sincronismo é o fato de que o relé de proteção irá receber os *sampled value* com as estampas de tempo em cada amostra e montar a sequência dentro do seu processamento para poder tomar a decisão de enviar um comando para abrir um disjuntor de uma linha de transmissão, caso essas amostras venham com o tempo errado, ou deslocado no tempo, é suficiente para o relé de proteção não atuar ou atuar indevidamente, e isso certamente geraria um transtorno que alimentaria o discurso daqueles que não querem mudanças.

Esse erro de tempo poderia ser causado caso a *merging unit* deixasse de receber a sincronização por um determinado tempo e seu oscilador de cristal interno com a variação da temperatura durante o dia, introduziria um erro no horário da *merging unit*. Pois o oscilador sendo de cristal estaria suscetível às variações da temperatura. A solução para isso é utilizar um *oven controlled oscillators* (OCXO), esse componente eletrônico aquece a pedra de quartzo a uma temperatura de 80 °C, com a ajuda de um resistor, dessa maneira independente da variação de temperatura do ambiente o oscilador de cristal estaria sujeito sempre a mesma temperatura e conseqüentemente a um erro menor do tempo fornecido por ele ao relé. Isso garantiria uma longevidade maior na precisão de tempo registrado pela *merging unit*, não causando problemas de funcionalidade da proteção do sistema elétrico (INGRAM, CAMPBELL, 2011).

O PTP tem demonstrado ser um método viável para fornecer sincronização para *sampled value*, de acordo com o barramento de processos proposto pela norma IEC 61850-9-2. Os atrasos da propagação são compensados, sendo que isso fornece benefício sobre sistemas que utilizem IRIG-B e PPS. Através do PTP é possível garantir uma precisão de $\pm 2 \mu\text{s}$.

O barramento de processo é importante avanço para as subestações, pois digitalizará tensões e correntes, interoperando diferentes fabricantes, sendo que PTP facilitará a adoção dessa tecnologia pelas concessionárias, contudo mais trabalho é necessário para entender e então padronizar seu comportamento para então ser largamente utilizado e rotineiramente ser implementado em subestações de energia elétrica.

4.5 Discussões dos resultados

Nos capítulos dois foi conceituada as proposições levantadas nos objetivos específicos, que foram:

- Analisar como o Sistema de Automação da Subestação é proposto pela série de normas IEC 61850;
- Descrever o que é *sampled value* e definir como é realizado sua transmissão;
- Apresentar quais são os métodos de sincronização convencionais;
- Definir os requisitos da norma IEC 61850 para o sincronismo dos IEDs;
- Conceituar o PTP melhor opção de sincronismo para os requisitos da norma IEC 61850;
- Apresentar método amplamente utilizado para reconfiguração de redes;
- Conceituar o SDN como opção de reconfiguração de redes;

No capítulo quatro foi analisado e confrontado os métodos, segundo os objetivos específicos:

- Discutir e analisar os arranjos dos equipamentos no nível de processo e no nível do *bay*;

- Pontuar as diferenças entre o sistema convencional e o proposto pela norma IEC 61850-9-2;
- Discutir as diferenças e vantagens entre o SDN e o RSTP para reconfiguração de rede;
- Discutir as diferenças e vantagens entre o PTP e o IRIG-B para sincronização do tempo.

Desta forma podemos considerar que os objetivos específicos desta pesquisa foram atingidos.

5 CONCLUSÃO

A série de normas internacional IEC 61850 é a mais provável candidata a padronizar todos os níveis dentro de uma subestação. Neste trabalho é foi discutido as características do SV, seu desempenho e impacto na rede ethernet. Primeiramente foi descrito o modo popular de reconfigurar uma rede como o RSTP e analisamos o desempenho do SDN sobre o RSTP, observamos a flexibilidade, funcionalidade e os ganhos que o SDN pode trazer para a rede diminuindo a complexidade, discutindo a arquitetura e as requisições para o SDN, mostrando que através da aplicação do SDN podemos melhorar o desempenho e a reconfiguração da rede.

Avaliado métodos convencionais de sincronização como IRIG-B e PPS, utilizando esses métodos como referência para analisar o PTP. A comparação mostra que o PTP é confiável para sincronizar MU e IED dentro dos requisitos determinados pela norma IEC 61850, contudo como foi destacado o barramento de processo é importante avanço sendo ainda necessário mais trabalho é para entender e padronizar seu comportamento. Fabricantes ainda necessitam submeter seus produtos a testes dentro de subestações para cobrir cenários que ainda não foram submetidos à análise, sendo uma ótima oportunidade de estudos futuros.

O trabalho trouxe diversas contribuições, apresentando quais e como outras tecnologias devem ser aplicadas para poder aplicar o barramento de processos. Demonstrou que o uso da norma IEC 61850-9-2 junto com TC e TP convencionais, MU, sincronização por PTP e redundância por SDN habilitam a uma solução de alta confiabilidade comparado com os usos convencionais uma solução de alta confiabilidade comparada com os usos convencionais. Algumas limitações interferiram neste estudo: a limitação de tempo para pesquisa e a escassez de textos que abordassem o tema de um modo teórico, buscando definir os conceitos. Para o futuro, recomenda-se que este trabalho seja utilizado como um referencial teórico para aqueles pesquisadores que desejam aprofundar-se no tema ou para aqueles que desejam implementar o barramento de processos de acordo com a norma IEC 61850-9-2.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, G. P., **Fiber-Optic Communication Systems**, 3rd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

DOLEZILEK, David; DEARIEN, Jason; KALRA, Amandeep. **Design and Validation Practices for Ethernet Networks to Support Automation and Control Applications**. Schweitzer Engineering Laboratories, 2014.

DOLEZILEK, D.; GORDON, C.; ANDERSON D. **Modern Ethernet Failure Recovery Methods for Teleprotecion and High-Speed Automation**. Schweitzer Engineering Laboratories, USA, 2015.

DUARTE, Alexandre B. **Fundamentos da série de Normas IEC 61850 e sua aplicação nas subestações. 2012**. 58 f. Monografia (Especialização em Teleinformática e Redes de Computadores), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

GELBERGER, Alexander; YEMINI, Niv; GILADI, Ran, **Performance Analysis os Software-Defined Networking (SDN)**. IEEE, 2013.

IEC 61850-1, **Communication Networks and Systems in Substations - Part 1: Introduction e Overview**. 2003.

IEC 61850-5, **Communication Networks and Systems in Substations - Part 5: Communicantion requirements for functions and device models**. 2003.

IEC 61850-7-2, **Basic communication structure for substation and feeder equipment – Abstract communication service interface (ACSI)**. 2004.

IEC 61850-8, **Communication Networks and Systems in Substations**. 2004.

IEC 61850-9-2, **Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3**. 2004.

IEEE 1588, **Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems**. 2008.

INGRAM, D.; CAMPBELL, D. **Use of IEEE 1588–2008 for a Sampled Value Process Bus in Transmission Substations**. School of Engineering Systems Queensland University of Technology. Brisbane, Australia, 2011.

INGRAM, David; CAMPBELL, Duncan, **Use of IEEE 1588-2008 for Sampled Value Process Bus in Transmission Substations**. Brisbane, 2011.

INGRAM, David; SCHAUB, Pascal; CAMPBELL, Duncan. **Evaluation of Precision Time Synchronisation Methods for Substation Applications**. School of Engineering Systems Queensland University of Technology. Brisbane, Australia, 2012.

IRIG STANDARD 200-04, **IRIG Serial time Code Formats**. 2004.

MACKIEWICZ, Ralph E., **Overview of IEC 61850 and Benefits**. IEEE: 0-7803-91934/06.2006.

MCKEOWN, N., ANDERSON, T., BALAKRISHNAM, H., PARULKAR, G., PETERSON, L., REXFORD, J., SHENKER, S., and TURNER, J. (2008). **Openflow: Enabling innovation in campus networks**. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 38(2):69–74.

MENON, M.; HABIB, I. **Funcionamento e utilização do PTP (Precision Time Protocol) na IEC 61850**. Itaipu Binacional, 2015.

MILLS, D., MARTIN, J., Ed., BURBANK, J., **"Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification"**, RFC 5905, DOI 10.17487/RFC5905, June 2010, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc5905>>.

NYGREN, A.; PTAFF, B.; LANTZ, B. **Openflow Switch Specification**. Open Networking Foundation, Abril, 2013.

PEREIRA, P.S.; LOURENÇO, G. E. **Investigação do Funcionamento do Barramento de Processos (IEC 61850-9-2) Uma Abordagem Prática**. Conprove engenharia, 2015.

SUN, Xin; REDFERN, Miles; CROSSLEY, Peter. **IEC 61850-9-2 Process bus Architecture for Substation Protection Schemes**. UK, 2011.

GLOSSÁRIO

| | |
|---------------|--|
| Bay | Conjunto de chaves seccionadoras e disjuntor que interliga a linha de transmissão ou distribuição na subestação. |
| GOOSE | Mensagem digital trocada entre equipamentos, com endereçamentos MAC. |
| Ladder | Arquitetura de switches em formado de escada. |
| Merging Unit | Dispositivo eletrônico que converte sinais analógicos em dados digitais, com o intuito de distribuí-lo pela rede ethernet. |
| Timing Jitter | Atraso na transmissão da mensagem. |