UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
Departamento de Engenharia de Telecomunicações

DAVID LEONARDO ACOSTA MOLANO

AVALIAÇÃO DE TOPOLOGIAS DE REDE NA AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS BASEADAS NO PADRÃO IEC61850

NITERÓI

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
Departamento de Engenharia de Telecomunicações

DAVID LEONARDO ACOSTA MOLANO

AVALIAÇÃO DE TOPOLOGIAS DE REDE NA AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS BASEADAS NO PADRÃO IEC61850

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Comunicação de dados multimídia

Orientador:
CARLOS ALBERTO MALCHER BASTOS

Co-orientador:
NATALIA CASTRO FERNANDES

NITERÓI

2014

DAVID LEONARDO ACOSTA MOLANO

AVALIAÇÃO DE TOPOLOGIAS DE REDE NA AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS BASEADAS NO PADRÃO IEC61850

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Comunicação de dados multimídia

Aprovada em Janeiro de 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. CARLOS ALBERTO MALCHER BASTOS - Orientador,
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Prof. NATALIA CASTRO FERNANDES - Co-orientadora,
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Prof. ANILTON SALLES GARCIA,
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITU SANTO

Prof. JOÃO MARCOS MEIRELLES DA SILVA,
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Niterói
2014

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

M717 Molano, David Leonardo Acosta
Avaliação de topologias de rede na automação de subestações elétricas baseadas no padrão IEC61850 / David Leonardo Acosta Molano. – Niterói, RJ : [s.n.], 2014.
80 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, 2014.
Orientador: Carlos Alberto Malcher Bastos, Natalia Castro Fernandes.

1. Rede de comunicação de computadores. 2. Norma IEC 61850. 3. Sistema de automação de subestação. 4. Sistema elétrico. I. Título.

CDD 004.6

À família pelo incentivo e apoio nas minhas escolhas e decisões.

Agradecimentos

Agradeço à minha família e em especial aos meus pais pela minha formação e respaldo incondicional. À Ananda por sua valiosa companhia, ajuda e apoio neste caminho.

Agradeço, também, aos meus orientadores Malcher e Natalia pela experiência, a paciência e o tempo dedicado. À banca de defesa pelas indicações recebidas. Aos professores pelo conhecimento compartilhado. Aos amigos e colegas pelas sugestões e ajuda durante esta etapa.

Resumo

A importância das redes de comunicação de dados nos Sistemas de Automação de Subestações (SASs) tem aumentado com a evolução dos sistemas elétricos. Em parte, devido à possibilidade de diminuir a quantidade de equipamentos e otimizar os recursos na transmissão de informações com o uso das redes *Ethernet*. Além disso, essas redes são capazes de atender aos requisitos e aos desafios relacionados latência no envio da informação entre os diferentes dispositivos e elementos que compõem os sistemas de proteção, controle e monitoramento. A norma IEC 61850 surgiu com o objetivo de padronizar a troca de informações entre os *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) de diferentes fabricantes que compõem o SAS e definiu, entre outros aspectos, questões críticas como os tempos máximos de atraso nas transmissão das diferentes mensagens entre os nós para que um sistema de proteção possa reagir ante uma eventualidade.

Devido a esses desafios identifica-se uma necessidade de ter ferramentas versáteis e, preferivelmente abertas aos aportes da comunidade, que permitam obter resultados em simulação em cenários com redes de telecomunicação para a implementação de novas subestações elétricas ou para a expansão de as já existentes conforme a Norma IEC 61850.

Este trabalho apresenta uma proposta de modelagem para o simulador OMNET++ de dispositivos pertencentes aos SASs, como IEDs, *Merging Unit*s (MUs) e *Switches L3*, e suas principais funcionalidades compatíveis com a Norma IEC61850. Simula, ainda, as principais topologias de rede de dados usadas em subestações, sendo elas estrela, anel e anel-estrela. Com isso, é possível testar o comportamento do sistema de comunicação de um SAS segundo aspectos como o tempo de atraso das mensagens tipo *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e *Sampled Value* (SV) -definidas pela Norma como as mais críticas- segundo cenários de tráfego de dados de fundo dados pela criação ou expansão de uma subestação elétrica.

Palavras-chave: IEC 61850, Simulação, Modelagem, Topologias de rede de dados, Sistemas de Automação de Subestações, OMNET++, Latência.

Abstract

Communication networks for SAS present an increasing importance in the evolution of electrical systems. One reason is the equipment cost-cutting and the increasing reliability in information exchange using Ethernet networks. Besides, these networks address requirements and challenges related to the information transmission delay between different devices and elements within protection, control and monitoring systems. The IEC 61850 standard defines the information exchange between IEDs from different manufacturers. This standard deals with critical matters as the maximum transmission delay for different messages traveling through the network in order to make it possible for a protection system to react to an eventuality.

Due to these challenges it is identified a need to have versatile tools, preferably open to contributions from the community, that produce results in simulation scenarios with telecommunication networks for the implementation of new electrical substations or for expansion of existing compatible with the IEC 61850 standard.

This document presents a modeling approach in OMNET++ simulator of devices belonging to the SAS, such as IEDs, MUs, and L3 Ethernet Switches, and their main functionalities complying with IEC 61850 standard. We performed simulations to evaluate the main substation network topologies, named star, ring, and ring-star. Hence, we test the behavior of the SAS communication system considering aspects such as the delay of GOOSE and SV messages, defined by the standard as the most critical ones, within different background data traffic to simulate the creation and the expansion of substation networks.

Keywords: IEC 61850, simulation, modeling, network topology, Substation Automation System, OMNet++, Latency.

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas e Siglas

CoS *Class of Service*

DANP *Dual Attached Node PRP*

DANH *Dual Attached Node HSR*

DNP3 Protocolo de rede distribuído

GOOSE *Generic Object Oriented Substation Event*

IHM Interface Homem Máquina

IGMP Internet Group Management Protocol

HSR *High-availability Seamless Redundancy*

IEC *International Eletro-technical Commission*

IED *Intelligent Electronic Device*

LACP *Link Aggregation Control Protocol*

LRE *Link Redundancy Entity*

MMS *Manufacturing Messaging Specification*

MRC *Media Redundancy Client*

MRP *Media Redundancy Protocol*

MRM *Media Redundancy Manager*

MTTF *Mean Time To Failure*

MU *Merging Unit*

NTP *Network Time Protocol*

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

OSI Open Systems Interconnection

PLC Controlador Lógico Programável

PRP *Parallel Redundancy Protocol*

PTP *Precision Time Protocol*

RSTP *Rapid Spanning Tree Protocol*

RTU *Remote Terminal Unit*

SAN *Single Attached Node*

SAS Sistema de Automação de Subestação

SIN Sistema Interligado Nacional

SNTP *Simple Network Time Protocol*

STP *Spanning Tree Protocol*

SV *Sampled Value*

TC Transformador de corrente

TP Transformador de potencial

USB Universal Serial Bus

VPN Virtual Private Network

Sumário

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas elétricos são compostos basicamente por subsistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. Essa energia é transformada nas subestações elétricas e é transportada através das linhas de transmissão desde sua geração até os pontos de consumo residenciais ou industriais. Dependendo do porte, as subestações podem ser de distribuição ou de transmissão e têm como objetivo operar corretamente o sistema elétrico realizando, permanentemente, monitoramento e proteção das tensões e correntes. Para realizar essas operações, são utilizados os Sistemas de Automação de Subestações (SASs), os quais mediante a captura dos valores de tensão e corrente das linhas de transmissão, barramentos, transformadores, entre outros, medem e agem automaticamente ante eventualidades. Esses dados são utilizados pelos *Intelligent Electronic Devices* (IEDs), principais dispositivos nos sistemas de proteção e controle do sistema elétrico. Assim, os *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) executam comandos de controle de um disjuntor, enviam informações a outros dispositivos do SAS, entre outros.

Percebe-se, então, que deve existir um canal de comunicação para a troca dos comandos de controle e medições dos *Intelligent Electronic Devices* (IEDs). No entanto, devido à variedade de equipamentos e protocolos de comunicação entre diferentes fornecedores, surgiu a necessidade de padronizar a forma como são transmitidas essas informações entre os dispositivos para garantir sua interoperabilidade, motivo principal pelo qual foi elaborada a Norma IEC 61850.

A Norma IEC 61850 define as *recomendações* a serem atendidas pelos equipamentos para a transmissão de informações, o que se reflete em atender uma serie de requisitos no projeto de novos SAS ou expansão dos existentes compatíveis com este padrão. O projeto do sistema de comunicação de um SAS depende principalmente das funções de proteção e controle a serem implementadas na subestação, pois, com sua caracterização,

determina-se o número de equipamentos conectados à rede de comunicação e seu tráfego gerado. Além disso, outros aspectos como políticas da concessionária ou características do entorno afetam esse projeto.

Geralmente, as concessionárias do sistema elétrico no Brasil, quando precisam construir uma subestação ou expandir uma existente, abrem um processo de licitação no qual várias empresas fornecedoras apresentam suas propostas com sua respectiva topologia de rede de comunicação. No caso da criação de uma nova subestação, é importante conhecer o nível de expansão e escalabilidade estimadas porque, dependendo disso, um limite de dispositivos poderá ser conectado posteriormente à rede sem precisar de investimentos maiores no sistema de comunicação. Apesar dos fornecedores estimarem a capacidade do segmento de rede por eles implementado, é a concessionária quem deve ter o controle sobre a rede de comunicação da sua subestação elétrica.

Os processos de expansão ou criação de subestações dependem da demanda de energia elétrica industrial e residencial, a qual vai aumentando a cada ano no Brasil. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a carga de demanda do Sistema Interligado Nacional (SIN) em janeiro de 2012 foi de 71701,02MWh/h e de 74118,64MWh/h no mesmo mês em 2013 [4]. Incrementos dessa carga de demanda aparecem a cada ano e isso requer que novas subestações de geração, transmissão e distribuição sejam construídas e que aquelas existentes sejam expandidas e atualizadas.

Para o caso da expansão de uma subestação, existem dispositivos legados no SAS que devem continuar funcionando em harmonia com as novas implementações dentro da subestação. Esta harmonia está relacionada com o impacto que os novos dispositivos possam causar com sua incorporação, ou seja, as funções de proteção, controle e monitoramento existentes devem continuar atendendo aos requisitos para os quais foram projetados e, o novo segmento a ser instalado -com novas funções de proteção, controle e monitoramento- deve continuar respeitando os requisitos após o acoplamento. Traduzindo o anterior ao sistema de comunicação de um SAS, significa que o tráfego de informação transmitido no sistema existente somado ao tráfego do novo segmento não deve impactar negativamente os tempos nem requisitos necessários das funções de proteção, controle e monitoramento especificados para uma subestação que atenda a Norma IEC 61850. Hoje, não existe um método *padrão* ou uma especificação para interconectar os IEDs e *Merging Unit*s (MUs) de um novo segmento de uma subestação. No entanto, poderia existir uma forma de testar diferentes cenários segundo certas configurações que permitam visualizar qual seria a melhor forma de realizar o acoplamento desse novo segmento a um SAS.

As simulações possuem a versatilidade e flexibilidade para avaliar situações com uma boa relação custo-benefício e hoje existem ferramentas maduras para testar redes de comunicação de dados. Adicionalmente, já que a IEC 61850 estabelece o uso das redes *ethernet* e suas tecnologias já divulgadas, conhecidas e estáveis, possibilita-se a realização de análises de capacidade de diferentes topologias de rede mediante a medição de latências em cenários frequentes de SAS. Desse modo, o uso de simuladores permite determinar se uma configuração na interconexão de dispositivos, com um perfil de tráfego de dados estabelecido, atende aos requisitos da Norma IEC 61850. Essas configurações estão relacionadas à importância da subestação e à capacidade de expansão esperada.

Nesse panorama, a criação de modelos de simulação que permitam analisar e avaliar, em condições similares às reais, os níveis de escalabilidade, desempenho, capacidade e expansibilidade expostos se torna importante. A simulação da rede de comunicação da subestação oferece, às áreas de pesquisa, desenvolvimento e implementação, a possibilidade de avaliar os limites e estimar o impacto na rede gerado pela inclusão, por exemplo, de mais IEDs que gerarão mensagens de alta prioridade aceleradamente ante uma falha elétrica, ou, para sistemas mais recentes, de *Merging Unit*s (MUs), que podem inundar os segmentos da rede com os valores amostrados de transformadores de tensão e corrente. Para isto, é necessário reproduzir adequadamente o comportamento de protocolos e dispositivos pertencentes aos SASs para criar cenários similares aos reais.

1.1 Objetivos e principais contribuições

O objetivo geral do presente trabalho é propor uma modelagem de simulação que permita analisar a capacidade de redes de comunicação de dados dos SAS compatíveis com a norma IEC 61850. Dessa forma, os objetivos específicos são:

- Propor e desenvolver uma modelagem dos dispositivos IED, MU, *switches* e *Dual Attached Node PRP* (DANP) compatíveis com a Norma IEC 61850 que permita simular dinamicamente cenários de rede de comunicação de SAS.
- Propor e desenvolver uma modelagem dos ambientes de rede de comunicação que permita simular as topologias de rede comumente usadas em SAS.
- Propor e desenvolver uma modelagem para o protocolo *Parallel Redundancy Protocol* (PRP).
- Avaliar a flexibilidade e modularidade da ferramenta OMNET++ para o projeto e experimentação da modelagem de um sistema de automação básico de uma subes-

tação elétrica e implementar a modelagem proposta nesse simulador.

- Comparar a modelagem desenvolvida com outras propostas da literatura.
- Descrever os requisitos e os critérios de avaliação das topologias de rede de comunicação na automação de subestações elétricas com abordagem nos barramentos de estação e de processo, considerando funções de proteção, controle e monitoramento.
- Avaliar o impacto na rede de dados causado pelos IEDs e as MUs sobre a latência na transmissão das mensagens GOOSE e *Sampled Values* em cenários comumente usados em subestações, baseados nas topologias em anel, estrela e anel-estrela (híbrida).
- Avaliar o impacto do uso dos DANPs e do protocolo PRP sobre a perda de pacotes, comparando o resultado o *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP).

Uma importante contribuição do presente trabalho é a disponibilização à comunidade das bibliotecas criadas para serem utilizadas em novas aplicações e desenvolvimentos. Além disso, apresenta-se uma tendência de documentar estudos e simulações de estudos de caso para a mudança completa de uma subestação legada a uma nova subestação compatível com a norma IEC 61850. Um possível inconveniente nesses casos é que uma concessionária não vai substituir uma subestação inteira de uma vez só, mas deve fazer mudanças graduais dos subsistemas devido a falhas ou a novas expansões e implementações, e essas atualizações podem levar vários meses ou anos dependendo da complexidade. A modelagem proposta permite recriar os cenários futuros e de transição, dinamicamente, para casos como esses, além de permitir novas implementações de protocolos, revisão de enfileiramentos em dispositivos como IED, MU e *switches*, entre outros.

1.2 Organização do trabalho

O presente documento está organizado em oito capítulos. No Capítulo 2, são descritos os principais problemas relacionados à proposta. São destacadas as principais contribuições em termos de modelagem do sistema de comunicação de subestações e em termos de resultados de análise.

No Capítulo 3, é abordado brevemente o sistema elétrico e seus componentes. Definem-se as principais características dos Sistemas de Automação de Subestações (SASs), suas funcionalidades, dispositivos relacionados e interfaces.

O Capítulo 4 descreve os principais aspectos da Norma IEC 61850, sua tendência

como parte fundamental dos novos Sistemas de Automação de Subestações (SASs), suas questões para a análise das topologias de rede e os requisitos do sistemas de comunicação de dados de uma subestação.

No Capítulo 5 expõem-se as topologias de rede comumente usadas nas redes industriais, nesse caso de uma subestação elétrica. Apresentam-se os indicadores de avaliação de confiabilidade, largura de banda, redundância, latência, escalabilidade, expansibilidade e manutenção usados no projeto de arquiteturas de rede e mencionados também na Norma IEC 61850.

No Capítulo 6 são desenvolvidos os modelos em OMNET++ dos principais dispositivos utilizados nos SAS compatíveis com a Norma. Esses equipamentos são IED de Proteção e Controle, IED disjuntor, *Merging Unit* e *Ethernet Switch*. Após a apresentação do projeto, valida-se o modelo recriando o cenário de uma subestação de distribuição de 220kV [5].

O Capítulo 7 contém os resultados das simulações realizadas para as principais topologias de rede usadas comumente em cenários e configurações diferentes. Foram dimensionadas redes para o nível de Estação e nível de Processo.

Por fim são apresentadas a conclusões e trabalhos futuros no Capítulo 8.

Capítulo 2

Trabalhos relacionados

Para atender os objetivos propostos, realizou-se uma revisão bibliográfica das diferentes modelagens e implementações realizadas para simular o comportamento de um sistema de comunicação de um Sistema de Automação de Subestação (SAS). No meio acadêmico, existem diferentes ferramentas que permitem simular redes de comunicação para avaliar aspectos como desempenho, largura de banda, latências, escalabilidade, expansibilidade, enfileiramento, entre outros. Algumas dessas ferramentas comumente usadas são NS-2 [6], NS-3 [7], OMNET++ [8](*open source*), OPNET [9](pago), além de outros desenvolvimentos específicos em linguagem de programação como Java [10] ou C+/++. As ferramentas mencionadas contam com um grande número de dispositivos e protocolos já implementados e prontos para sua utilização. No entanto, no âmbito das redes de comunicação em ambientes industriais, como o caso dos sistemas elétricos e seus sistemas de automação, existem desenvolvimentos parciais que incorporam algumas características do padrão IEC 61850 para realizar avaliação de desempenho para subestações, considerando estudos de casos específicos.

Thomas *et al.* [11] utilizam OPNET para modelar e projetar a rede de comunicação de uma subestação de 220kV baseada em redes *Ethernet* avaliando o desempenho mediante a medição da latência das mensagens *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e *Sampled Value* (SV) com enlaces de 10/100/1000Mbps e taxas de amostragem das *Merging Unit*s (MUs) de 960/1920/4800 amostras/s. Seus resultados demonstram o desempenho da topologia anel para a interconexão no nível de estação e estrela no nível de processo.

Sidhu *et al.*, em [5] e [12], apresentam uma modelagem em OPNET de um *Intelligent Electronic Device* (IED) e uma MU e simulam redes em estrela e anel. Usando os modelos desenvolvidos, analisam o desempenho das redes com enlaces de 10/100 Mbps, utilizando *Tags* de prioridade e VLANs (recomendados por IEC 61850). Seus resultados ilustram

que a modelagem e a configuração projetada por eles para o caso de uma subestação de 220kV atende os requisitos da Norma IEC 61850 para mensagens entre vãos para enlaces de 100Mbps. A desvantagem encontrada foi a não disponibilidade do material criado para realizar tais análises e que nas simulações usaram parâmetros com comportamento periódico para situações que seguem situações aleatórias, como o caso de geradores de tráfego de fundo.

Yang *et al.* [13] apresentam o design e simulação, usando a plataforma NS-2, da rede de comunicação para os barramentos de estação e de processo de uma subestação elétrica baseada em IEC 61850 que possui IEDs de diferentes fabricantes. Criam geradores GOOSE e SV baseados em geradores de tráfego genéricos e implementam VLANs para topologias anel e estrela. Seus resultados permitem observar que o comportamento das redes virtuais criadas para diferentes segmentos de rede segundo o vão atende os requisitos de tempo dados pela Norma IEC 61850. No entanto, não foram tidos em conta aspectos como separação *multicast* ou priorização de quadros *ethernet* que o presente projeto utilizou de modo a aumentar as opções de parametrização e a adicionar condições mais reais às simulações.

Juarez *et al.* [14] vão além da simulação para avaliar o desempenho na rede de comunicação de uma subestação e incluem nas simulações um *switch* real. Além de modelar um IED, uma MU e modificar o funcionamento original do *switch* na plataforma OMNET++, utilizam a porta *ethernet* do computador para recriar a transmissão real de mensagens até o *switch* e avaliar o desempenho de uma subestação de 220kV com conexões em anel e estrela. Os resultados deste trabalho permitiram perceber a capacidade de OMNET++ em cenários reais e sua potencialidade na simulação/emulação de dispositivos de rede ou, nesse caso, de um segmento de rede de um SAS. Isto foi realizado devido à possibilidade de modificar o código de algumas das bibliotecas e do núcleo do OMNET++ para que os tempos de resposta fossem de acordo com os reais.

Além dos trabalhos já mencionados, é importante para esta proposta entender quais os requisitos que cada dispositivo ou elemento do SAS deve atender e qual é seu comportamento, ou seja, quais variáveis devem ser medidas e calculadas e quais protocoles devem ser recriados. Para isto, é revisada a literatura referente ao projeto de topologias de redes, modelagem dos dispositivos, avaliação de desempenho, entre outros.

Várias análises têm sido realizadas, na literatura, referentes ao projeto de topologias e as tecnologias que participam. Tan e Luan em [15] revisam teoricamente várias arquiteturas de redes LAN *Ethernet* para SASs com fluxos de dados de funções de proteção,

controle e monitoramento e os seus requisitos de desempenho. Fazem, além, uma análise do projeto conceitual das topologias de rede nos barramentos de estação e processo, e das tecnologias de redundância como *Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP)*, *Parallel Redundancy Protocol (PRP)* e *High-availability Seamless Redundancy (HSR)* mostrando os principais aspectos para ter em conta ao implementar este tipo de protocolos.

Brand *et al.* [16] descrevem *um* processo para o projeto de um SAS obedecendo, além da norma, requisitos da concessionária elétrica em aspectos como funcionalidade, desempenho e restrições. Lee *et al.* [17] descrevem e avaliam analiticamente o desempenho das redes baseadas em *switches Ethernet* como alternativa de comunicação industrial, para aplicações em tempo real, a tecnologias previas como *fieldbus*. Skeie *et al.*, em [18], ilustram por que as redes *Ethernet* possuem as características suficientes de desempenho para suportar os requisitos de tempo real dos SASs. Usando OPNET eles simulam alguns cenários de redes *ethernet* em subestações baseadas em *switches* e com tráfego UDP. Gungor *et al.* [19] fornecem um panorama geral mostrando as oportunidades e desafios de topologias de comunicação híbridas para os Sistemas de Automação de Subestações (SASs), o alto desempenho na transmissão com custo-beneficio, qualidade de serviço, segurança e considerando a utilização de redes privadas virtuais Virtual Private Networks (VPNs) entre subestações de modo a melhorar o desempenho na troca das informações entre subestações e centros de controle evitando, também, inundar as redes de dados correspondentes aos barramento de processo e estação.

Kanabar *et al.* [20] apresentam uma avaliação do desempenho de um barramento de processo em uma subestação típica de 345kV/230kV focando-se no atraso das SVs usando OPNET. Utilizando as MU como dispositivos chave nos barramentos de processo IEC 61850-9-2, modelam uma topologia anel no core da estação e estrela para cada vão ou zona com *switches* de 10 portas. As MUs são configuradas com taxas de amostragem de 1920 Hz e 4800 Hz e utilizam técnicas de estimação das perdas e atrasos das SVs. Os resultados permitem visualizar os tempos de latência dos valores amostrados, assim como as perdas consecutivas para 2, 5 e 10 quadros.

Por sua vez, aspectos de confiabilidade e disponibilidade na rede de comunicação são avaliados por Kanabar *et al.* [21], apresentando resultados para as arquiteturas de redes usando diagramas de confiabilidade de blocos (*RBD - Reliability Block Diagram*). Os RBDs são construídos para comunicação interna aos vãos e entre eles, considerando uma subestação típica de transmissão. A parte 5 da Norma IEC61850 [1] estuda o desempenho de uma rede *ethernet* com enlaces de 10Mbps e 100Mbps, mas sem considerar o formato

das mensagens nem o tráfego de fundo devido a que visa orientar aos fornecedores em como fazer os testes informando as condições básicas. É importante incluir em maior detalhe o conteúdo de cada pacote, mensagem e quadro a serem utilizados nos estudos de desempenho já que o que se busca é recriar condições reais no fluxo de informações.

Apesar desses trabalhos terem sido realizados em diferentes plataformas de simulação, alguns deles não ilustram aspectos das simulações. De fato, nota-se que seguem uma tendência de reproduzir modelos implementados para obter resultados em subestações específicas. Dessa forma, os diferentes autores criam seus próprios desenvolvimentos para estudos de caso locais e suas contribuições não se encontram disponíveis para o uso geral. Como consequência, a sua integração com a comunidade acadêmica e industrial é menor.

Percebe-se que existem desenvolvimentos em IEC 61850 nas plataformas de simulação mais utilizadas. É interessante adotar essas soluções para modelar diferentes cenários que permitam avaliar o comportamento da rede, em suas diferentes topologias, estendendo suas capacidades para cenários mais completos e dinâmicos. Os casos vistos na literatura realizam avaliações de casos específicos e configurações estáticas durante a simulação, propondo e demonstrando o comportamento simulado de topologias de rede, mas não permitindo adicionar (ou retirar) dinamicamente elementos de uma topologia ou ainda, variar, por exemplo, o número de IEDs, MUs nos barramentos de processo ou de vãos conectadas ao barramento de estação. Um modelo que permita flexibilizar e facilitar a avaliação de diferentes casos sem ter que recriar uma topologia para cada caso manualmente, não foi encontrado na literatura. Surge, então, a motivação de dinamizar o ambiente de simulações visando implementar diferentes cenários de expansão de uma subestação, testando topologias de rede, perfis de tráfego, conexão ou desconexão de elementos, programação de falhas no sistema de comunicação, para obter um panorama melhor do impacto que ocasionaria acoplar novos segmentos de rede a um SAS, como propõe o trabalho descrito nessa dissertação.

Capítulo 3

Sistemas de Automação de Subestações

Um sistema elétrico interligado é uma rede que transforma e transporta energia e possui basicamente subsistemas de geração, transmissão e distribuição. O transporte da energia é realizado mediante o aumento e a diminuição da tensão usando as subestações elétricas. Essas subestações elétricas estão classificadas principalmente em subestações de transmissão e de distribuição, dependendo dos níveis de tensão nos quais trabalham. A Figura 3.1 ilustra uma visão geral do sistema elétrico, onde se identificam os subsistemas de geração, as redes de transmissão, as de distribuição, as cargas residenciais e industriais, e um centro de controle remoto. A geração pode ser hidrelétrica, termelétrica, eólica, entre outras. Essa energia é transmitida em grandes níveis de tensão mediante as linhas de transmissão, as quais começam e terminam em subestações ao longo do sistema até chegar aos pontos de consumo residencial ou comercial. Assim, as subestações são elementos fundamentais, pois é nelas que são realizadas as funções de controle e monitoramento que permitem manter a confiabilidade, a segurança e o correto funcionamento do sistema.

Como todo sistema de grande porte, existem processos e funções que precisam ser automatizados e seus componentes devem ser monitorados, protegidos e controlados para garantir um serviço continuo. Para tal objetivo, no caso do setor elétrico, são usados os Sistemas de Automação de Subestações (SASs) que, em essência, são um conjunto de dispositivos interligados que monitoram, protegem e operam a rede elétrica. Esse conjunto de dispositivos se divide em subconjuntos associados a partes da subestação, por exemplo, barramento, transformadores, linhas de transmissão, etc., e são chamados *vãos*. Suas funções de operação são autônomas para ações de reação rápida ou automática, especialmente para a eliminação de falhas ou restauração da energia. Um SAS abrange vários vãos, cuja quantidade, depende aproximadamente do número de disjuntores existentes na

[1]Fonte: http://eco.microsiervos.com/

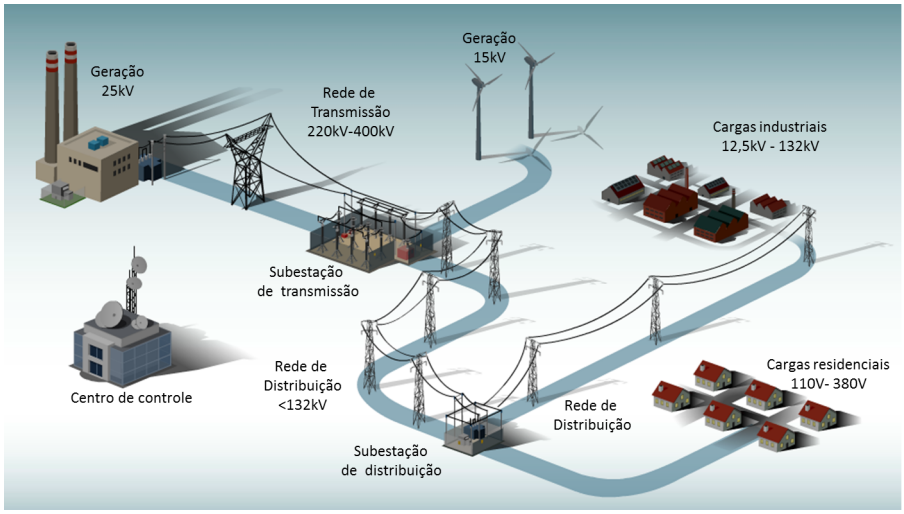


Figura 3.1: Visão geral do sistema elétrico [1].

subestação [22].

3.1 Arquitetura de um SAS

Em termos globais, um SAS se divide nos níveis de Estação, Vão e Processo, os quais se interligam por meio dos Barramentos de Estação e Processo. A Figura 3.2 ilustra essa relação.

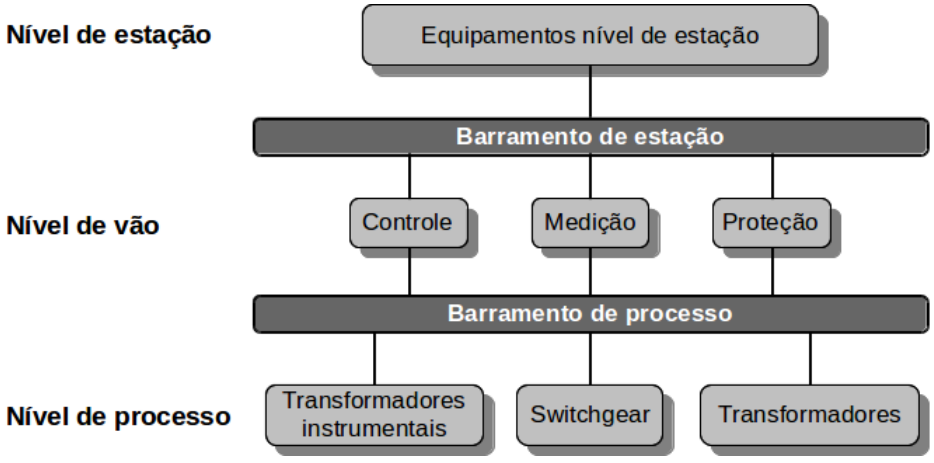


Figura 3.2: Arquitetura geral de um SAS.

- Nível de estação: É o nível superior, onde se encontram o servidor com o banco de dados, estações de Interface Homem Máquina (IHM), *gateways* de comunicação com o centro de controle, interfaces para acesso remoto, etc. Esse nível se comunica com o nível de vão por meio do barramento de estação.

- Barramento de estação: Representa a ponte de comunicação entre o nível de estação e o nível de vão nos sistemas de automação para tarefas de supervisão, controle e monitoramento. Atualmente existem tecnologias implementadas e protocolos como MODBUS, Protocolo de rede distribuído (DNP3)[1] , IEC 60870-5-101, entre outros. Esses protocolos e normas foram desenvolvidos para a troca de informações entre sistemas de aquisição de dados e controle supervisionado (SCADA), *Remote Terminal Unit* (RTU) e *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) em ambientes industriais, principalmente nos sistemas elétricos. É neste cenário de múltiplos protocolos que se encaixa a Norma IEC 61850, pois propõe uma arquitetura de comunicação única entre todos os dispositivos usando as redes *Ethernet*.
- Nível de Vão: É o nível do meio, onde estão distribuídos os equipamentos de controle e proteção. Esses dispositivos geralmente são conectados fisicamente ao nível de vão e a informação transmitida basicamente consiste em dados binários ou analógicos de entradas ou saídas, como os valores dos transformadores de corrente e tensão, e mensagens *trip* desde os relés de proteção. Comunica-se com o nível de processo por meio do barramento de processo.
- Barramento de processo: Representa a ponte de comunicação entre o nível de vão e o nível de processo. Em sistemas de automação legados, existe cabeamento direto aos dispositivos de controle e proteção. Em sistemas recentes, são usadas as redes *Ethernet* para a transmissão de informações entre os níveis permitindo, dependendo do caso, interligar em uma rede só os dois barramentos (estação e processo).
- Nível de processo: É o nível inferior, onde se localizam os equipamentos de *switchgear*[2] , incluindo sensores e atuadores necessários para monitorar e operar o próprio *switchgear*. Contém dispositivos como *circuit breakers*, transformadores de corrente e de tensão, etc. [23]

O papel principal dos SASs é prover segurança e confiabilidade, local e remota, no controle e monitoramento de subestações elétricas de transmissão e distribuição. Comumente, os SAS são compostos por relés, RTUs e Controladores Lógicos Programáveis (PLCs) com conexões redundantes, com interfaces homem máquina locais e remotas e uma rede de comunicação para a troca de informações.

[1] O IEEE adotou DNP3 como IEEE Std 1815 - IEEE Standard for Electric Power Systems Communications-Distributed Network Protocol (DNP3), cuja última versão foi publicada em 2012.

[2] O *Switchgear é a combinação de chaves elétricas, fusíveis ou disjuntores utilizados para controlar, proteger e isolar os equipamentos*

Atualmente, os sistemas de automação incorporam redes *Ethernet* no seus sistemas de comunicação, diminuindo, assim, o cabeamento. Além disso, substituem os relés analógicos por relés eletrônicos, que usam diferentes protocolos para a troca de informações. Um SAS consiste, tipicamente, em um barramento de estação para interconectar os dispositivos das diferentes vãos (relés, controladores, etc.) com os equipamentos da estação. Esses equipamentos trocam informações usando diferentes tipos de mensagens e protocolos, aproveitando, atualmente, as capacidades e propriedades das redes *Ethernet* [24].

3.2 Equipamentos de rede em SAS

Nessa seção, são definidos os principais dispositivos pertencentes aos SAS e que usam redes *Ethernet*. Realiza-se essa abordagem, pois, nos capítulos seguintes, é visto o impacto desses dispositivos na rede de comunicação.

3.2.1 *Intelligent Electronic Device* (IED)

O *Intelligent Electronic Device* (IED), exemplificado na Figura 3.3, é o principal dispositivo físico microcontrolado em um SAS. Um IED hospeda dispositivos lógicos e é capaz de receber e enviar informações de/para outro dispositivo. Comumente, é equipado com um ou dois microprocessadores, memória, possivelmente um disco rígido e várias interfaces de comunicação como portas *Universal Serial Bus (USB)*, seriais, *Ethernet* e um sistema operacional.

Os IEDs podem ser classificados por suas funções. Existem os IEDs disjuntores (*Breaker IEDs*), controladores, controladores de reconexão, reguladores de tensão, etc. Percebe-se, então, que um IED pode desempenhar mais de uma função [25].

Figura 3.3: Exemplo de um *Intelligent Electronic Device* (IED).

3.2.2 *Merging Unit* (MU)

Este tipo de dispositivos, que também entram na definição de IED, são relativamente recentes e surgiram da tendência de otimizar o nível de processo e integrá-lo à rede de comunicação da subestação. Anteriormente (atualmente ainda existe), valores como corrente e tensão eram tomados diretamente dos dispositivos de alta tensão e levados aos relés de proteção e controle. Hoje, apesar dos IEDs darem suporte a essas medições mediante suas entradas analógicas, são usadas as chamadas *Merging Unit*s (MUs), que são equipamentos que capturam dados analógicos e os digitalizam em valores amostrados. Posteriormente, as *Merging Unit*s (MUs) os disponibilizam na rede como pacotes de dados *unicast* ou *multicast*. Dessa maneira, medições de vários elementos de alta tensão são capturadas e digitalizadas por essas unidades e enviadas a vários elementos de controle simultaneamente, aumentando a eficiência do sistema e diminuindo o cabeamento. A Figura 3.4 mostra o diagrama funcional de uma MU. O formato dessas mensagens, para permitir a interoperabilidade, está especificado pela Norma IEC61850 [1], abordada no Capítulo 4 .

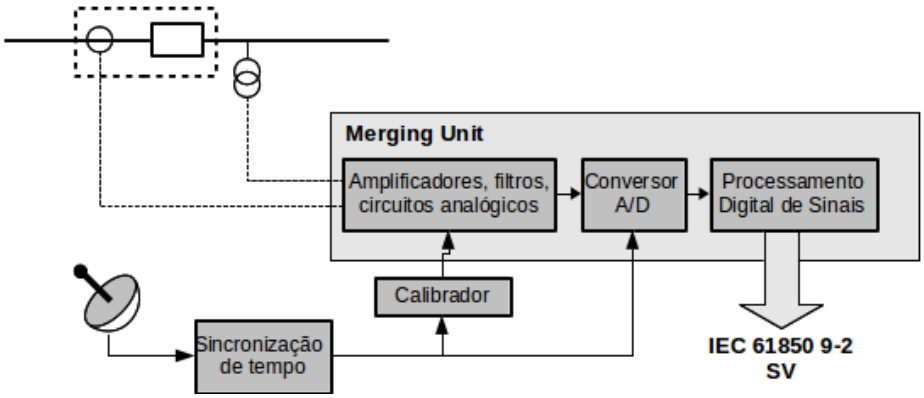


Figura 3.4: Diagrama funcional de uma *Merging Unit* (MU).

3.2.3 *Switch Ethernet*

O *switch Ethernet* é um dispositivo com um determinado número de portas, no qual se conectam dispositivos para formar um segmento de rede. É encarregado do encaminhamento de quadros entre os equipamentos conectados e seu funcionamento se relaciona com a camada de enlace do modelo OSI (*Layer 2*). Apesar disso, existem *switches* gerenciáveis que suportam funcionalidades da camada de rede (*Layer 3*). Com a incorporação das redes *Ethernet* aos SASs, as funcionalidades de *switches* tradicionais foram incorporadas em ambientes industriais. Com normas como a IEC 61000 (*Immunity for Power Station and*

Substation enviroments) e a IEEE 1613, foram desenvolvidos equipamentos com imunidade a interferências electromagnéticas. Além disso, requisitos de modularidade, suporte a redundância, funções de gerenciamento, suporte a padrões como IEEE 802.1Q, 802.1X e 802.1p, permitem melhorar o desempenho e o funcionamento da rede de dados nesses ambientes industriais.

3.3 Sistemas de proteção

No setor elétrico, um esquema de proteção é um conjunto de equipamentos configurados para cumprir uma determinada função de proteção definida pela norma IEC 60255. Esses equipamentos são relés, fusíveis, Transformador de corrente (TC), Transformador de potencial (TP), disjuntores, baterias, etc. Os esquemas de proteção são aqueles que permitem ao sistema remover do serviço, de maneira total ou parcial, outro dispositivo ou circuito que não esteja funcionando em condições normais sem interferir na operação total. Possibilitam também a supervisão da prestação do serviço e busca proteger a integridade da rede elétrica mediante alertas, sinalizações, comandos e atuações devidamente coordenadas.

Os tipos de sistemas de proteção são:

- De geradores
- De transformadores
- De barramentos
- De linhas de transmissão
- De equipamentos

As proteções, por sua vez, podem se classificar quanto a sua função: Relés de corrente, de tensão, direcionais de corrente ou potência, diferenciais, de frequência, de distância, entre outros.

Em uma subestação, segundo as funções de proteção e controle, são distribuídos os equipamentos necessários. É de interesse deste trabalho conhecer o número de dispositivos que serão utilizados para projetar o tráfego e avaliar as possíveis topologias que cumpram com os tempos dados pela norma. Com o fim de ilustrar como são conectados ao sistema elétrico os dispositivos pertencentes a um sistema de proteção, a Figura 3.5 mostra um diagrama unifilar de uma linha de 69kV e as conexões dos IEDs e MUs aos elementos do sistema elétrico e à rede de comunicação. Percebe-se que, para esse caso, são utilizados

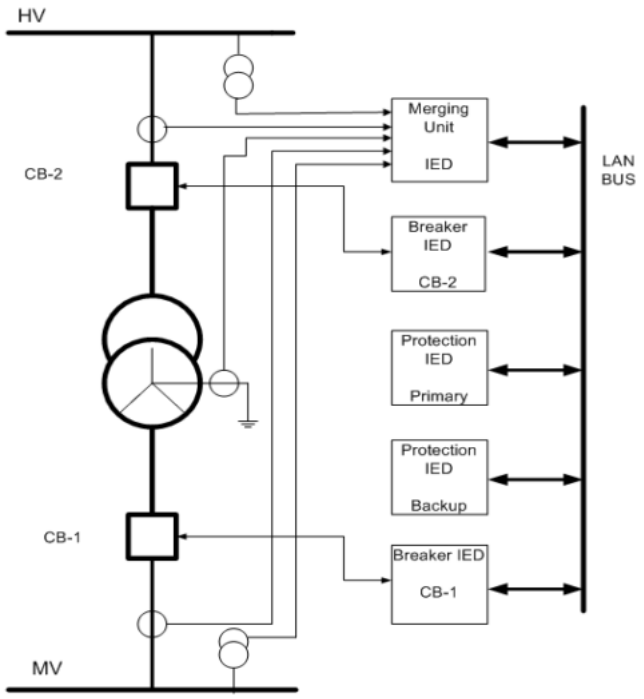


Figura 3.5: Diagrama unifilar de uma linha de 69kV

dois IEDs de proteção (primário e secundário), dois IEDs disjuntores e uma *Merging Unit*.

Neste Capítulo, foram expostos os conceitos e aspectos básicos dos Sistemas de Automação de Subestações (SASs), sua arquitetura e os principais dispositivos e protocolos que participam na rede de comunicação. Também foram mencionadas as diferentes categorias das funções de proteção, controle e monitoramento que são implementadas para o funcionamento de uma subestação. Dependendo das funções de proteção a serem implementadas em uma subestação elétrica, e usando a padronização da norma IEC 61850 para sua automação, é calculado o número de equipamentos de proteção para o processo de design da rede de comunicação. O Capítulo 4 aborda a Norma, padrão adotado nos novos SASs, que define os requisitos de comunicação para garantir a interoperabilidade entre os diferentes componentes dos sistemas.

Capítulo 4

Norma IEC61850

4.1 Descrição geral

IEC 61850 [1] é um padrão internacional elaborado com a contribuição dos principais fabricantes de dispositivos e a academia, que traz *recomendações* aos sistemas de comunicação nos Sistemas de Automação de Subestações (SASs). Visa garantir a interoperabilidade entre os *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) de diferentes fornecedores e substituir antigos protocolos que dificultavam a troca de informações dos sistemas com vários fabricantes.

A versão inicial da norma foi publicada em 2003 e suas 10 partes, nomeadas na Tabela 4.1, têm sido modificadas para incluir novas definições ou tendências adotadas devido a desenvolvimento e evolução de tecnologias que durante sua primeira parte não tinham sido completadas. Hoje existe uma segunda revisão na maioria dos seus textos, assim como subpartes que expandem as especificações das partes iniciais.

A parte inicial faz uma introdução e ambienta às principais características da Norma, aborda de maneira geral as definições básicas, conceitos e modelos descritos nas correspondentes sessões. A parte 3 define a comunicação entre os IEDs na subestação e os requisitos do sistema relacionados. As especificações dessa parte pertencem aos requisitos gerais do sistema de comunicação, com ênfase nos requisitos de qualidade. Trata, também, das diretrizes nas condições do entorno e os serviços auxiliares fazendo referência a outros padrões [1].

As especificações da parte 4 se referem ao gerenciamento de projetos e sistemas com respeito a temas como a engenharia de processos e ferramentas de suporte, o ciclo de vida do sistema e seus IEDs, e a garantia de qualidade começando na etapa de desenvolvimento e finalizando com a descontinuação e desmantelamento do SASs e seus componentes.

Tabela 4.1: Estrutura da Norma IEC61850

Parte #	**Nome**
1	Introdução e visão geral
2	Glossário
3	Requisitos gerais
4	Sistema e gerenciamento de projetos
5	Requisitos de comunicação para as funções e modelos de dispositivos
6	Linguagem de descrição de configuração para comunicação em subestações de energia elétrica referente a IEDs
7	Estrutura básica de comunicação para a subestação e equipamentos
7.1	- Princípios e modelos
7.2	- Interface abstrata do serviço de comunicação
7.3	- Classes de dado comuns
7.4	- Classes de nós lógicos compatíveis e classes de dado
8	Mapeamento de serviços de comunicação específicos
8.1	- Mapeamento a MMS e a ISO/IEC 8802-3
9	Mapeamento de serviços de comunicação específicos
9.1	- *Sampled values* sobre uma conexão serial unidirecional multiponto a ponto
9.2	- *Sampled values* sobre ISO/IEC8802-3
10	Testes de conformidade

A parte 5 define os requisitos de comunicação para os modelos de funções e dispositivos para subestações. Descreve os objetos e os serviços oferecidos por esses objetos. São definidos conceitos importantes como Nó Lógico (LN), Dispositivo Físico (PD), Dispositivo Lógico (LD), Conexão Física (PC), Conexão Lógica (LC) e Função (F), essenciais para o entendimento da norma e sua interação entre os IEDs.

Na parte 6 se descreve o formato do arquivo de configuração dos IEDs, que contém a especificação das funções de proteção, controle e monitoramento, os parâmetros de comunicação, assim como a relação entre eles. O propósito principal dessa parte é especificar uma linguagem padronizada para que a configuração de cada IED seja compartilhada e entendida pelos diferentes elementos do SAS como as ferramentas de engenharia, centros de controle e subsistemas dos diferentes fornecedores.

A principal construção da norma são os modelos abstratos de dados e de serviços, para isso na parte 7, criam-se objetos/itens para serem independentes dos protocolos de comunicação. Esse conceito de abstração permite mapear esses itens em outros protocolos que atendam os requisitos de comunicação, com isso garantindo a continuidade da norma ante novas tecnologias [26]. A parte 7-2 define a abstração dos serviços usados pela norma, a parte 7-4 define a abstração dos objetos de dado (conhecidos como nós lógicos). A parte 7-3 descreve as classes de dados comuns, usadas para a construção de modelos de dados maiores.

A parte 8 mapeia esses modelos de dados e de serviços em protocolos atuais. Esse mapeamento é realizado mediante a definição dos perfis de (A)plicação e de (T)ransporte

baseando-se no modelo Open Systems Interconnection (OSI). A norma adota, também, as especificações da *Manufacturing Messaging Specification* (MMS) para alguns tipos de mensagens. A parte 9 mapeia os valores amostrados sobre quadros *ethernet* e especifica o seu formato.

Por fim, a parte 10 documenta a metodologia para a realização de testes de conformidade em dispositivos baseados na norma segundo os conceitos e especificações dadas nas outras partes.

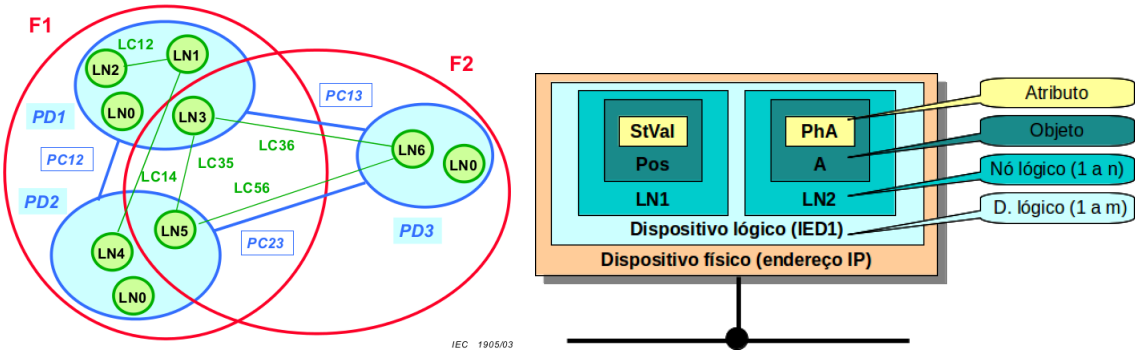
Em síntese, IEC 61850 define os serviços e modelos de dados, usando o paradigma de Orientação a Objetos, que são usados para trocar informações entre IEDs e entre as Interface Homem Máquinas (IHMs) locais e centros de controle. São descritos um grande número de serviços que usam as redes *ethernet* com MMS e a pilha de protocolos TCP/IP. Com isso, visa garantir a interoperabilidade dos dispositivos pertencentes a um SAS, assim como facilitar sua configuração. As suas principais características são mencionadas a seguir [23].

Interoperabilidade: Entre os dispositivos e entre as funções a serem desempenhadas em uma subestação, a interoperabilidade é o principal objetivo da norma IEC61850, pois devido ao uso de protocolos distintos dos fornecedores para a troca de informações nos SAS era preciso o uso de conversores que ”traduzissem”um protocolo para outro com o objetivo de executar as funções de proteção, controle e monitoramento. Isto gerava um trabalho adicional de engenharia no design dos sistemas, testes, etc. Hoje, com a utilização de *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) e a padronização com IEC 61850 é possível ter soluções de diferentes fornecedores executando essas funções de proteção ou controle sem ser atado a uma marca de equipamento. Portanto, produtos de diferentes fabricantes podem se integrar facilmente à infraestrutura de uma subestação melhorando as funcionalidades e a expansibilidade sem afetar negativamente o comportamento do sistema.

Comunicação horizontal: A comunicação horizontal pode ser definida como uma comunicação rápida *Peer-to-Peer* entre dois dispositivos. É considerada de grande importância em funções críticas que devem ser altamente confiáveis. Baseia-se na transmissão assíncrona *Multicast*, por exemplo, do estado das saídas digitais de um IED para outros dispositivos subscritos a essas informações [23].

Distribuição de funções usando orientação a objetos: A norma IEC 61850 usando o paradigma orientado a objetos define os conceitos, modelos de dados e algumas regras para os dispositivos físicos e lógicos. Os dispositivos lógicos estão definidos por nós

lógicos. Esses nós lógicos definem as funções e interfaces funcionais. Uma função pode estar construída por múltiplos nós lógicos e esses, por sua vez, podem estar localizados em diferentes dispositivos físicos. O conceito de nó lógico tem papel central na norma, tendo em vista que é o objeto básico que troca informação. Na Figura 4.1(a) se mostra a interconexão entre nós lógicos (LN) e a relação entre os dispositivos físicos (PD), conexões físicas (PC), conexões lógicas (LC) e como uma Função (F) agrupa eles.



(a) Conceito de nó lógico (b) Dispositivo físico

Figura 4.1: Conceito de nó lógico e hierarquia descritos pela norma IEC 61850

Nos sistemas de automação compatíveis com IEC61850, as funções de proteção ou controle podem ser distribuídas em diferentes dispositivos físicos. Da Figura 4.1(a) se percebe, por exemplo, que a função F2 envolve nós lógicos (LN) de três dispositivos físicos (PD1, PD2 e PD3). Com essa flexibilidade, uma função de proteção pode estar distribuída em vários equipamentos físicos mas para o sistema logicamente é um.

Sincronização de tempo: Devido aos estritos requisitos de desempenho nos eventos de uma subestação a sincronização de tempo tem um papel importante. A norma declara que o mecanismo de sincronização de tempo com uma precisão na margem do milissegundo nas redes LAN, pode ser usando *Network Time Protocol* (NTP) e *Simple Network Time Protocol* (SNTP), mas para fornecer precisão nos dados de amostragem *Sampled Value* (SV) e aqueles provenientes das *Merging Unit* (MU) se recomenda usar *Precision Time Protocol* (PTP), já que seu mecanismo de relógios distribuídos através da rede *Ethernet* consegue uma precisão de menos de 1 milissegundo [23]. Em IEEE 1588 [27] se definem os protocolos para a sincronização de tempo para sistemas baseados em redes *Ethernet*. Um dos desafios no desenvolvimento dos SAS é a combinação, em um mesmo sistema, de protocolos de alta sincronização de tempo como PTP com sistemas sempre disponíveis para aumentar, assim, o desempenho geral. Protocolos como *Parallel Redundancy Protocol* (PRP) e *High-availability Seamless Redundancy* (HSR) oferecem alta disponibilidade [28]. No entanto, um ambiente com redundância geralmente tem im-

pacto no custo e na complexidade de um sistema de automação de uma subestação e é definido dependendo de que tão critico é o sistema, os requisitos do cliente e a estrutura disponível.[29].

Nesse contexto e para atender esses aspectos, a norma IEC 61850 define, Figura 4.2, a hierarquia de um SAS com os níveis e interfaces lógicas com os quais trabalha e entre os quais são trocadas as informações.

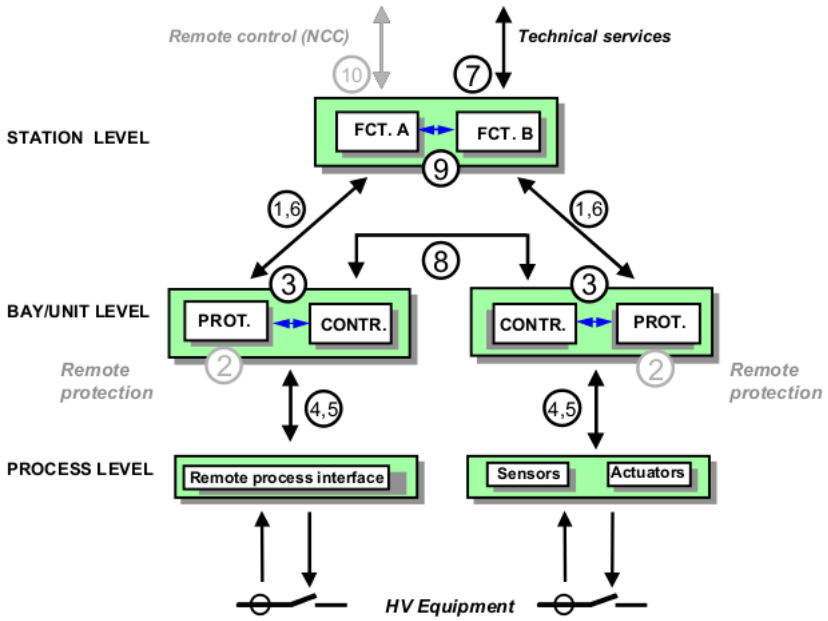


Figura 4.2: Níveis e interfaces lógicas em SAS

4.2 Requisitos de qualidade

IEC 61850 na sua parte 3 expõe os requisitos de qualidade que aplicam aos sistemas de comunicação usados para monitoramento, configuração e controle dos processos dentro de uma subestação. A descrição desses requisitos é mencionada a seguir:

4.2.1 Confiabilidade

Uma subestação deve continuar operacional mesmo se qualquer componente de comunicação do SAS falha, segundo o principio de *graceful degradation*. Não deve existir nenhum ponto de falha que torne a subestação não operável. Para isto, deve se adequar monitoramentos e controles locais de modo que uma irregularidade não passe desapercebida e não ocasione perdas ou origine uma falha em cascata dentro do sistema. Se existissem elementos de comunicação que cumpram funções de redundância, deve se evitar a possi-

bilidade de deixar os dois componentes inabilitados, por exemplo usar fontes diferentes de energia.

Um design contra falhas deve ser fornecido e não deve existir um modo no qual uma falha pontual ocasione que o SAS tome uma ação não desejada como o envio de um comando de abertura ou fechamento de um disjuntor. Adicionalmente, uma falha no SAS não deve inabilitar nenhuma medição local ou função de controle na subestação, para isso o sistema de automação deve seguir as seguintes características [1]:

- Funções de proteção devem operar autonomamente.
- O SAS deve ser usado para executar funções de controle lógico como *failover* automático em uma falha de transformador, a qual não é considerada crítica de tempo. Esse tempo deve ser dado em milissegundos pelo fornecedor.
- A interface homem máquina do SAS deve ser capaz de operar independentemente da interface de telecontrole ao centro de controle.

Os requisitos de confiabilidade são descritos na norma IEC 60870-4 [1] e são adotados por este padrão. Descrevem-se as classes de confiabilidade (R1, R2 e R3), as quais devem ser combinados entre as partes (fornecedor e cliente) no momento de realizar o design. Os fabricantes devem estabelecer claramente o *Mean Time To Failure* (MTTF) e informar a referência do método usado para seu cálculo.

4.2.2 Disponibilidade

A disponibilidade de um SAS significa a relação de tempo de operação, ou *uptime*, ao tempo total. *Uptime* é o tempo no qual o sistema está apto para funcionar e desempenhar as funções vitais para o qual foi implementado. Isto inclui também o caso em que se existisse um sistema secundário de proteção e ocorresse uma falha no sistema principal, esse tempo não deve contar-se como *downtime* pois o sistema como um todo continua funcionando. As classes de disponibilidade (A1, A2 e A3) devem ser definidas entre o fornecedor e o cliente seguindo as especificações da parte 4 da Norma IEC 60870.

Dentre as características da disponibilidade de um SAS devem ser fornecidos mecanismos automáticos de respaldo da informação e do sistema, sem que estes possam causar perdas de informação ou produzir uma operação anormal do sistema.Enlaces de comunicação críticos sugere-se serem redundantes. Além disso o aumento na taxa de erro não

[1] Telecontrol equipment and systems. Part 4: Performance requirements

deve causar a interrupção repentina do sistema, deve seguir o conceito de *graceful degradation* pelo qual há que facilitar estratégias de recuperação ante erros para restabelecer a operação confiável do SAS durante sua anormalidade.

A definição da disponibilidade não entra no escopo da Norma IEC 61850, mas especifica sim o uso do padrão IEC 60870 [30].

4.2.3 Manutenibilidade e Segurança

A norma IEC 61850 adota o numeral 3.3 da parte 4 da norma IEC 60470 como requisitos. Nesse padrão sãos descritas as classes de manutenibilidade M1, M2, M3 e M4 as quais no momento de projetar o SAS devem ser combinadas entre as partes (manufactureiro e cliente).

O requisito de segurança é adotado da parte 4 da norma IEC 60870-4, numeral 3.4.

4.2.4 Integridade dos dados

O sistema de comunicação do SAS deve entregar os dados de maneira confiável mesmo em presença de erros na transmissão ou processamento da informação devido a atrasos ou falhas nos equipamentos de comunicação. Deve proporcionar:

- Detecção de erros na transmissão em ambientes ruidosos.
- Recuperação em caso de congestionamento no enlace.
- Suporte opcional para redundância em link, meio de transmissão e equipamentos.

As classes de integridade e consistência dos dados (I1, I2 e I3) estão definidos no numeral 3.5 da IEC 60870-4 e devem ser determinadas pela aplicação que usa a informação recebida.

4.2.5 Requisitos gerais da rede

Por fim, o último dos requisitos de qualidade definidos pela parte 3 da IEC 61850, é especificado como requisito geográfico que a rede de comunicação da subestação deve ser capaz de cobrir distancias de até 2km. Alem disso, segundo o número de dispositivos no SAS a rede deve ser capaz de atender todas as configurações típicas de vão em subestações de alta tensão, mencionadas nas partes 1 e 5.

4.3 Condições do entorno

Outras adoções importantes da IEC 61850 são os detalhamentos das tolerâncias climáticas, mecânicas e elétricas que influem no meio de comunicação e das interfaces que são usadas para monitorar e controlar os processos dentro da subestação. Como um equipamento de comunicação é parte integral de um SAS os requisitos de ambientes robustos também se aplicam a esse equipamento. Essas condições são tais como temperatura, umidade, pressão barométrica, avaliação mecânica e sísmica, de polução e corrosão, imunidade e emissão de interferências eletromagnéticas. As definições dessas questões são descritas nas normas IEC 60870-2, IEC 60694 e IEC 61000-4, EN 55022A e EN 55022B.

Os equipamentos devem, então, cumprir esses requisitos para ser compatíveis com a IEC 61850. Devido ao enfoque do presente trabalho esses detalhes não são aprofundados mas se deixam indicados pois são fatores físicos importantes.

4.4 Requisitos de comunicação para as funções e modelos de dispositivos

Os requisitos de comunicação das funções implementadas nos SAS e dos modelos de IEDs são apresentados na parte 5 da Norma IEC 61850. Quando projetado um sistema de automação de uma subestação é preciso definir as funções e mapeá-las dentro dos três níveis da subestação (estação, vão e processo) seguindo as hierarquia lógica das interfaces de comunicação (Figura 4.2). A utilização dessas interfaces lógicas entre os diferentes níveis da subestação define a troca de informações entre os diferentes nós lógicos e a atribuição de determinadas funções a determinados dispositivos físicos. Assim, um IED pode ter vários dispositivos lógicos com varias funções de proteção, ou de controle, ou das duas, etc. as quais se enviam informação usando diferentes tipos de mensagens. O mapeamento dessas funções ao longo dos dispositivos, e o número deles, depende de aspectos como o entorno, desempenho, custo, do estado de arte de uma tecnologia, etc.

4.5 Tipos de mensagens

O padrão define sete tipos de mensagem de acordo a sua importância e impacto no sistema. Essas mensagens, resumidas na Tabela 4.3, devem atender determinados requisitos de tempo na sua transferência e, para isto, utilizam diferentes combinações da pilha de

protocolos segundo o modelos OSI. A norma define o conceito de tempo de transferência como o tempo completo de transmissão de uma mensagem incluindo o tempo necessário de envio e recepção dos IEDs em questão. Esse tempo conta a partir do momento em que a origem coloca o dado na fila de transmissão (t_a) até o momento que o destino extrai os dados da fila de recepção (t_c). A figura 4.3 ilustra o tempo de transferência $t = t_a + t_b + t_c$

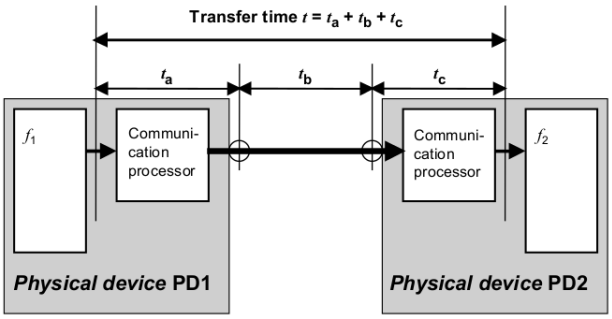


Figura 4.3: Definição do tempo de transferência [1]

Alguns dos tipos de mensagem, para suportar os diferentes requisitos das subestações, são subdivididos segundo Classes de Desempenho. Existem dois grupos independentes destas classes:

- Para controle e proteção(P).
- Para medição e aplicações de qualidade de energia (M).

Dentro de uma subestação específica, todos os enlaces de comunicação não necessariamente devem suportar a mesma classe de desempenho, isto é, os enlaces no nível de estação pode ser diferentes aos do nível de processo e, da sua vez, os vãos podem ter diferentes classes que dependerão do número e da taxa de amostragem dos dispositivos. As classes de desempenho são definidas de acordo as funcionalidades a serem implementadas e são independentes do tamanho da subestação [1]. A Tabela 4.2 mostra as classes e seus cenários comuns de aplicação.

P1	Vão de distribuição ou onde os requisitos são baixos
P2	Vão de transmissão e quando não é especificado nenhuma outra classe pelo cliente
P3	Vão de transmissão de alto desempenho na sincronização e disjuntor diferencial
M1	Medição de até o 5^{o} harmônico.
M2	Medição de até o 13^{o} harmônico.
M3	Medição de qualidade de até o 40^{o} harmônico.

Tabela 4.2: Classes de desempenho para os tipos de mensagens IEC 61850

Em geral os requisitos de desempenho dependem do tipo de mensagem. Os tipos de mensagem mais críticos são o 1 e o 4. O tipo 1 (1A e 1B) é definido pela norma como

as mensagens rápidas. As mensagens tipo 1A são as mais importantes, exigem maior desempenho comparado com as outras mensagens rápidas. Para a classe de desempenho P1, o tempo de transmissão deve ser na ordem de meio ciclo, por isso é definido um valor de 10 milissegundos. Para o caso de P2 e P3 o tempo deve ser menor que um quarto de ciclo, é por isso que, baseando-se em um sistema de 60Hz, o valor de 3 milissegundos é definido [31]. As outras mensagens rápidas são definidas como tipo 1B. No caso de P1 o tempo total de transmissão deve ser menor o igual a 100 milissegundos, enquanto para P2/3 deve ser na ordem de um ciclo, define-se então 20 milissegundos. No caso das mensagens tipo 4, o funcionamento consiste no envio constante de dados sincronizados desde cada IED. Essas mensagens são típicas para aplicações no nível de processo e seus tempos de transmissão são, para a classe P1, 10ms, e para P2/3, 3ms. Os outros tipos de mensagem definidos pela norma e seus requisitos de tempo são resumidos na tabela 4.3.

Tipo	**Nome**	**Exemplo**	**Tempo de transmissão**
1a	Mensagens rápidas Trip	GOOSE (Trips)	10ms(P1) e 3ms(P2/3)
1b	Outras mensagens rápidas	GOOSE (Comandos, mensagens simples)	100ms(P1) e 20ms(P2/3)
2	Mensagens velocidade média	MMS (Grandezas, Medições)	100ms
3	Mensagens velocidade baixa	MMS (Parâmetros)	500ms
4	Mensagens de dados brutos (*raw*)	SV (Saídas de transdutores e equipamentos de instrumentação de transformadores)	10ms(P1) e 3ms(P2/3)
5	Funções de transferência de arquivos	MMS (Arquivos grandes)	1000ms
6a	Mensagens de sincronização de tempo a	Tempo de sincronização barramento de estação	+/-1ms
6b	Mensagens de sincronização de tempo a	Tempo de sincronização barramento de processo	+/-4us e +/-5us
7	Comandos com controle de acesso	MMS (Comandos da IHM)	500ms

Tabela 4.3: Tipos de mensagem na Norma IEC 61850 [1]

Adicionalmente, para ocaso das MUs na Tabela 4.4 são resumidos os valores de latência máximos permitidos dependendo da classe de desempenho e taxa de amostragem.

A transferência dessas mensagens utiliza protocolos definidos nos perfis de transporte (T), que inclui as camadas física, enlace, de rede e de transporte do modelo OSI, e os perfis de aplicação (A), que inclui as camadas de sessão, apresentação e aplicação do modelo OSI. Várias combinações de Perfis-T e Perfis-A podem ser usadas para atender o intercambio de informações e serviços. A Figura 4.4 resume as principais combinações

Tabela 4.4: Tempos de transmissão máximo permitido para valores amostrados

Tipo de dado	Classe de desempenho	Tempo de transmissão (ms)	Amostragem (samples/s)
Tensão Corrente	P1	10	480
Tensão Corrente	P2	3	960
Tensão Corrente	P3	3	1920

de pilhas usadas na Norma. Com base nos objetivos deste trabalho foram modelados os dispositivos IED e MU, que usam as mensagens tipo 1 e 4, mapeadas diretamente à camada de enlace.

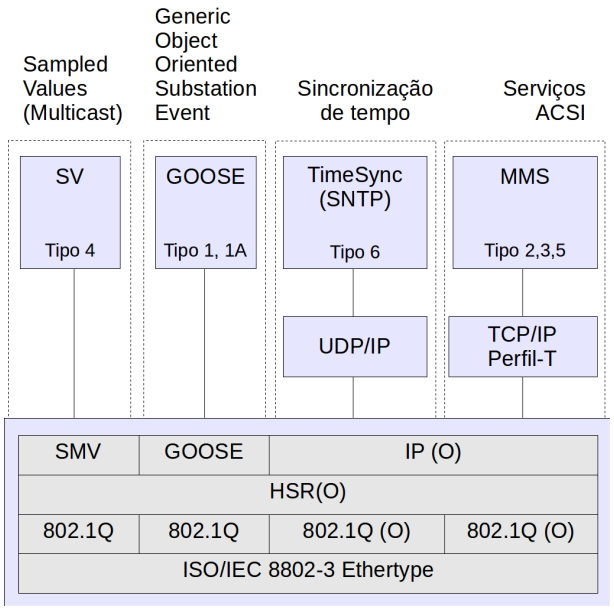


Figura 4.4: Pilhas de protocolos em IEC 61850

Neste Capítulo foi apresentada uma breve descrição da Norma IEC 61850, os tipos de mensagem usadas, os requisitos de tempo e as pilhas de protocolos necessárias. Mencionaram-se os requisitos de qualidade e do entorno adotados pelo padrão, dos quais alguns deles serão abordados posteriormente. Com esses conceitos definidos, no seguinte Capítulo serão abordadas as topologias de rede comumente usadas nos barramentos de estação e de processo.

Capítulo 5

Rede de comunicação de dados em SAS

Nas redes de dados são bem conhecidas as arquiteturas cascata, estrela e anel. Nos Sistema de Automação de Subestação (SAS), e em geral nas aplicações industriais, as topologias comumente implementadas na prática são arquiteturas hibridas dessas três combinações básicas. Para o caso das subestações elétricas o barramento de processo é o segmento rede que tem maior tráfego de informações se existissem *Merging Unit*s (MUs). Atualmente, a incorporação dessas unidades de amostragem está em processo e, em subestações legadas, sua instalação é gradual. No presente Capítulo são abordadas as questões para o design de um sistema de comunicação de dados e, posteriormente, as arquiteturas usadas nos barramentos de estação e de processo fazendo ênfase nessa inclusão de MUs como dispositivos geradores de tráfego constante na rede.

5.1 Design de arquitetura de rede

O design de um SAS como mencionado anteriormente, depende principalmente das funções de proteção, controle e monitoramento para o qual está sendo projetado, assim como das restrições do entorno, políticas da concessionária, requisitos de desempenho, entre outras. No entanto, os aspetos pontuais no design de qualquer rede de comunicação de dados são a confiabilidade, disponibilidade, os requisitos de redundância, tempos de latência permitido, escalabilidade e manutenibilidade, principalmente. Nas seguintes seções serão descritas as características mais importantes destes critérios.

5.1.1 Confiabilidade e disponibilidade

Na prática os sistemas de automação podem ser representados por redes de dispositivos interligados em série, em paralelo, em malha ou em uma combinação deles, e ilustrados mediante um diagrama de blocos de confiabilidade. O valor de confiabilidade pode ser calculado dependendo da combinação de interligação dos elementos que compõem a rede. Essas representações estão presentes na rede de dispositivos interligados em um SAS e os cálculos podem ser aplicados a esses sistemas tendo em conta suas definições, como a existência de enlaces redundantes (conexões em paralelo) ou não [21, 16]. Nos sistemas de automação, a alta disponibilidade é um ponto crucial e a redundância no meio oferece essa funcionalidade, sabendo que o impacto no sistema completo ocasionado pela falha de um componente deve ser minimizado.

- **Sistemas em série** do ponto de vista de confiabilidade significa que para o sistema funcionar completamente todos os dispositivos conectados devem funcionar corretamente. Representa um sistema não redundante.
- **Sistemas em paralelo** em confiabilidade significa que para o sistema funcionar completamente deve funcionar no mínimo um dos dispositivos. Representa um sistema redundante.

Além do anterior, existe também um o critério de disponibilidade da rede onde se representa individualmente a disponibilidade de cada equipamento, esse cálculo pode ser feito a partir dos diagramas de blocos de confiabilidade [33].

- Mean Time Between Failures (MTBF)
- Mean Time To Failure (MTTF)

Na parte 3 da norma IEC 61850 se descrevem diferentes medições de disponibilidade para a comparação de designs. Eles são

- Confiabilidade medida como MTBF
- Disponibilidade de dispositivo calculada como porcentagem da disponibilidade.
- Disponibilidade do sistema calculada como porcentagem da disponibilidade.
- Manutenibilidade do dispositivo calculada como MTTR (Mean time to repair)
- Manutenibilidade do sistema calculada como MTTR. [34]

Por sua vez Andersson et al. investigam a confiabilidade das arquiteturas baseadas na norma IEC 61850 usando el modelo de *Markov* para representar os estados do sistema, as taxas e as probabilidades de mudar entre eles[35]. Assumindo alguns valores como o *Mean Time To Failure* (MTTF) dos *Intelligent Electronic Devices* (IEDs), *switches*, calculam a confiabilidade de algumas topologias de rede dos sistemas de comunicação para barramentos de estação e de processo.

5.1.2 Redundância

A redundância, em relação ao meio de transmissão, é usada principalmente para evitar falhas pontuais nas redes de comunicação industriais que possam gerar uma falha no sistema completo. As estruturas redundantes de rede são utilizadas para dois propósitos diferentes [3]:

- **Balanceamento de carga:** O tráfego sobre um caminho de rede em um intervalo especifico é maior que a largura de banda que um cabo só pode transmitir. Adicionando uma conexão redundante aumenta a largura de banda efetiva da conexão inicial. O protocolo *Link Aggregation Control Protocol* (LACP) especificado pela IEEE é usado comumente para esse propósito.
- **Tolerância a falhas:** Conexões adicionais entre equipamentos permitem comutar a um enlace secundário quando o uma eventualidade provoca uma falha no principal.

Apesar de que o primeiro propósito pode estar incluído no segundo, para as redes de comunicação industriais a redundância do meio de transmissão faz ênfase na tolerância a falhas porque permite maior disponibilidade do sistema e é, como exposto em [3], mais importante e necessário que o balanceamento de carga. Dessa maneira, em ambientes industriais têm-se requisitos como:

- **Determinismo no tempo de comutação (*Switchover-time determinism*):** Representa, em caso de uma falha, o tempo de resposta que o protocolo precisa para trocar do caminho principal para o alternativo, assim como o tempo para posteriormente restaurar o caminho principal. Devem ser previsíveis.
- **Requisitos de instalação:** Se forem usados protocolos que para cumprir com os tempos necessários possuem restrições, essas devem ser devidamente especificadas, por exemplo, o número máximo de dispositivos conectados que um equipamento suporta.

- **Transparência:** O protocolo usado deve estar baseado em métodos padronizados para garantir transparência, compatibilidade e segurança ao investimento da implementação.

O primeiro requisito é essencial em redes de comunicação para sistemas de automação pois é a maneira de saber se a redundância a implementar satisfará os tempos necessários de resposta no pior dos casos. Se o mecanismo de redundância alterna o suficientemente rápido para habilitar o caminho secundário de transmissão sem impactar negativamente o funcionamento da aplicação em questão, então esse protocolo tem um comportamento transparente e os requisitos de tempo são atendidos [3].

Nas redes *ethernet* podem se apresentar os chamados *loops*, que são situações nas que os pacotes de dados que circulam pela rede indefinidamente sem encontrar o caminho certo para chegar a seu destino gerando uma sobrecarrega da rede. Isto apresenta-se quando existem vários caminhos entre a origem e o destino, e não existe um protocolo que decida qual é o caminho principal e quais são os alternativos. Na redundância no meio de transmissão é necessário o monitoramento desses caminhos alternativos para encarregar-se da rede e evitar esses *loops*. Os protocolos de monitoramento de redundância (e recuperação) são encarregados de criar um único caminho lógico **ativo** entre os nós da rede mesmo tendo vários caminhos possíveis, e cuidando destes para que, quando for preciso ante uma falha, possa alternar entre eles. A primeira solução para esse monitoramento foi o *Spanning Tree Protocol* (STP) que detecta as interrupções nos enlaces e comuta logicamente para habilitar o caminho alternativo no menor tempo possível depois de que a falha é detectada. No entanto, percebe-se que a comunicação é interrompida por um tempo pequeno, mas é interrompida, e que dependendo da complexidade da rede, o tempo de restauração da comunicação é difícil de prever. Esses tempos são na margem de segundos, o qual nos sistemas industriais traz impactos negativos e o fato de não ser determinístico deixa algumas incertezas no planejamento. Em termos gerais, a rede de comunicação de uma subestação deve recuperar-se ante uma falha dentro dos primeiros 100 ms para minimizar qualquer interrupção do sistema de automação [36].

5.1.2.1 Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP)

Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) é um protocolo de monitoramento de redundância definido na norma IEEE 802.1w, e incorporado na IEEE 802.1D-2004 [37], que melhora o funcionamento do STP. Suporta um número maior de *switches*, uma variedade de topologias de rede e melhorou o tempo de recuperação ao redor de 1 segundo. No entanto,

ainda não garante uma hierarquia determinística ante uma falha, devido a que o tempo de reação vai depender da localização da falha na rede e das a suposições realizadas no design da topologia.

RSTP configura uma árvore de conexões ativas de uma maneira simples, completa e simétrica entre os *switches ethernet* desativando logicamente os enlaces não utilizados. Usa os chamados *Bridge Protocol Data Units - BPDUs* para a comunicação entre *switches* compatíveis. Nomeia um *switch* raiz (*root bridge*) e cria a árvore buscando os caminhos ótimos a partir dele. Se existir uma mudança na topologia de rede, essa é reportada à rede por meio de BPDUs e o caminho alternativo é calculado e, assim, restaurada a comunicação. No entanto, apesar de melhorar o tempo de comutação para o caminho secundário, ao igual que STP, existe um tempo de interrupção da comunicação que depende da topologia [3].

O RSTP pode ter tempos de comutação e comportamento previsíveis se a topologia para sua implementação for uma rede em anel, devido a que esta é uma topologia restrita. No entanto em redes malha, por ser descentralizado, apresenta alta imprevisão na construção da árvore de comunicação e principalmente a seleção de um novo *root bridge* dada uma reconfiguração [38].

5.1.2.2 Media Redundancy Protocol (MRP)

Media Redundancy Protocol (MRP), descrito pela parte 2 da norma IEC 62439[1], é um protocolo de alta-disponibilidade para redes *ethernet* sendo especificada só para topologias em anel de até 50 dispositivos. Garante um comportamento determinístico no tempo de comutação ante uma falha, o qual pode ser, nos piores casos, 500 ms, 200 ms, 30 ms ou 10 ms, segundo os parâmetros selecionados [3].

O tempo de comutação tipico em MRP varia entre a metade e uma quarta parte desses tempos. Por exemplo, em uma rede em anel usando MRP com um tráfego de carga normal e configurado o tempo de transição em 200 ms, quando acontecer um falha no enlace primário a habilitação do secundário tomará entre 50 ms e 60 ms. Para o caso de selecionar 10 ms esse tempo será significativamente baixo.

O funcionamento de MRP é comandado por um dos *switches* que toma o papel de *Media Redundancy Manager* (MRM) e envia quadros de teste de redundância através do anel nos dois sentidos, esperando recebe-los pela porta contraria. Esses quadros são envi-

[1] A norma IEC 62439 aplica às redes de automação de alta disponibilidade baseadas na tecnologia ethernet, especificada no padrão ISO/IEC 8802-3 (IEEE 802.3)

ados através dos *Media Redundancy Clients* (MRCs), que podem ser outros *switches* ou dispositivos compatíveis com o protocolo. O MRM controla e monitora o anel bloqueando uma das suas portas para qualquer tráfego diferente aos quadros de teste de redundância, evitando com isto a existência de *loops*. Se existir uma falha e o quadro de teste não for recebido pelo MRM, este habilitará a porta bloqueada e o anel ficará funcionando no sentido contrario. Os MRCs usam a informação enviada pelo MRM no caso de reconfiguração da topologia (sentido) e notificam se o status das suas portas mudou. Essa flexibilidade em matéria do tempo de comutação e do uso de um gerenciador do status do anel, permite que as redes com suporte a esse protocolo sejam configuráveis com maior determinação.

5.1.2.3 *Parallel Redundancy Protocol* (PRP)

Definido na norma IEC 62439-3 [2] e recomendado na última versão da norma IEC 61850, o *PRP* é um protocolo que é executado em nós finais, chamados *Dual Attached Node PRP* (DANP), e que precisa de duas redes LAN independentes. Os nós DANP usam essas duas redes, que provavelmente apresentam desempenhos diferentes, para transmitir a informação *simultaneamente*, ou seja, duplicando todos os pacotes e enviando cada um por um dos caminho. Cada nó compatível com esse protocolo tem, na sua camada de enlace, uma *Link Redundancy Entity (LRE)* que se encarrega de monitorar o status das redes LAN e dos dados. A *Link Redundancy Entity* (LRE) é quem, na origem, duplica o pacote recebido de camadas superiores e o transmite pelas duas interfaces *ethernet*, assim como, no destino, descarta o pacote duplicado e passa a informações para as camadas seguintes. A Figura 5.2 mostra a interconexão entre diferentes tipos de nós em uma rede que implementa PRP.

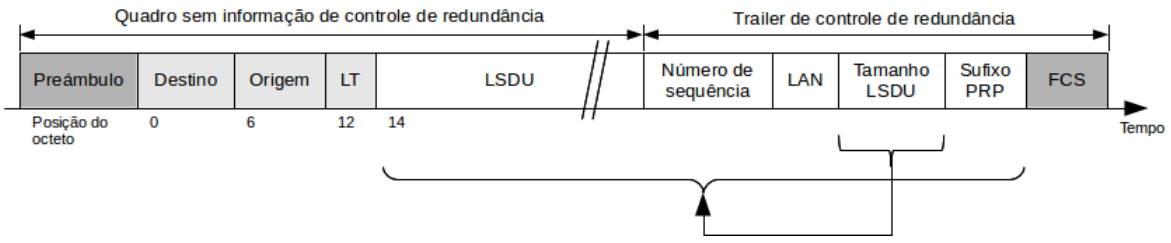


Figura 5.1: Formato do quadro em PRP [2]

Uma vantagem desse mecanismo de redundância é seu suporte a dispositivos que não o implementam. A LRE adiciona as informações de controle de redundância em cada quadro no *payload* por meio do *trailer*) que se ilustra na Figura 5.1. Cada pacote percorrerá,

então, suas respectivas redes LAN e cada nó intermediário que não suporte o protocolo encaminhará o pacote normalmente. Uma vez que o primeiro pacote chegue ao destino, seu *trailer* de controle é lido pela LRE e suas informações são usadas para monitorar o status do caminho. O quadro é, então, repassado para as camadas superiores. Quando o pacote duplicado chega ao destino, a LRE sabe que esse dado já foi recebido e, assim, aproveita a informação do *trailer* para o monitoramento da rede e descarta o quadro. Percebe-se, então, que esse protocolo oferece uma redundância em uma camada inferior da pilha de protocolos, evitando, assim, o processamento desnecessário de quadros em camadas de rede, transporte ou aplicação. Outra vantagem é que esse protocolo não está

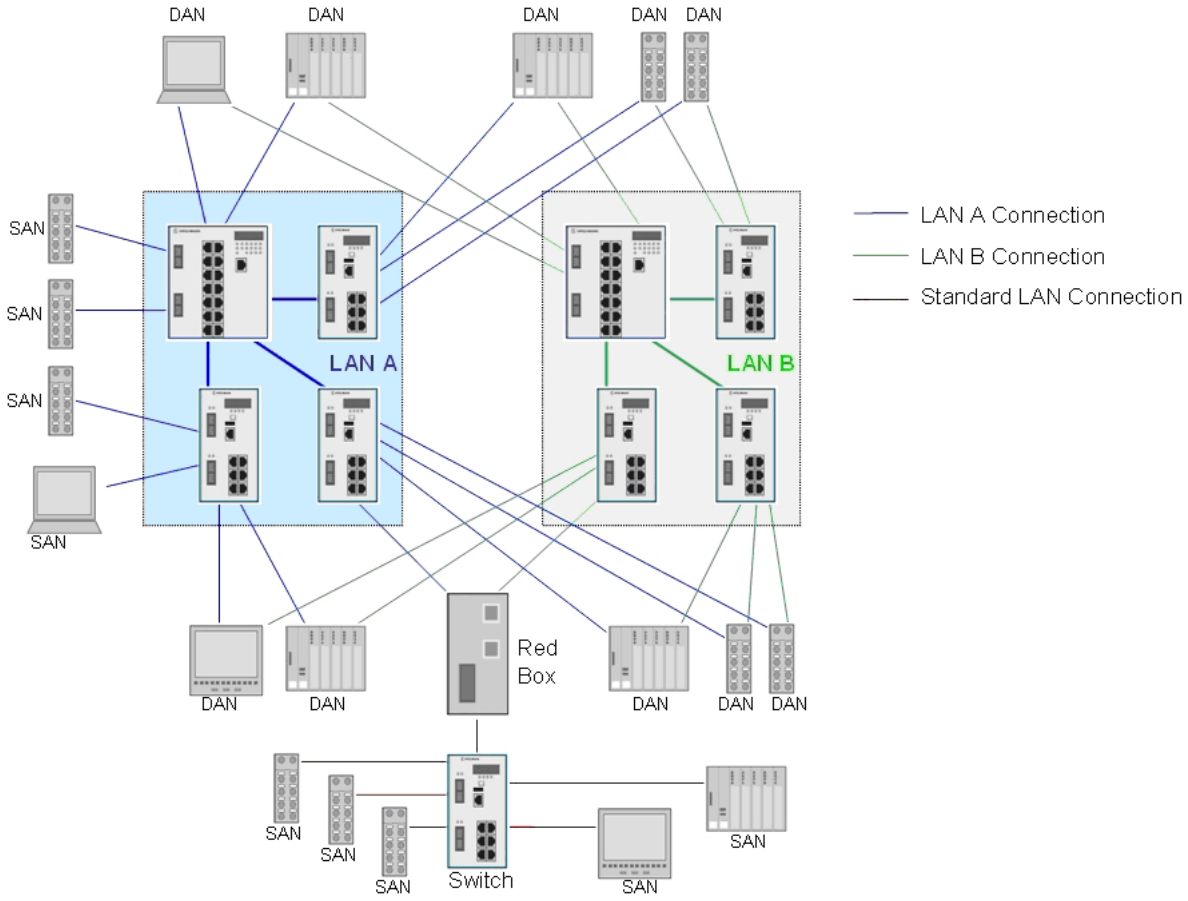


Figura 5.2: Topologia de rede usando PRP[3].

limitado a redes em anel. Um dispositivo de rede normal (*Single Attached Node* (SAN)) pode ser conectado a qualquer uma das redes é não precisa *saber* PRP, só não lerá as informações de controle do protocolo localizadas no *trailer* do quadro. Na maioria de aplicações os equipamentos críticos são os que precisam de duas interfaces e os menos críticos tem uma, mas se for preciso que determinado dispositivo ou segmento de rede seja compatível e pertença às duas redes pode ser conectado nelas mediante uma *Redundancy*

Box (Redbox), permitindo então que um SAN vire DANP.

5.1.2.4 High-availability Seamless Redundancy (HSR)

High-availability Seamless Redundancy (HSR) segue os princípios de PRP de ter tempo zero de recuperação com a diferença de que o primeiro é utilizado unicamente em topologias baseadas em conexões em anel. Isso reduz a infraestrutura de rede necessária. Os nós dentro do anel devem suportar o protocolo, seguindo as funções de encaminhamento e evitando o uso de *switches* dedicados. Os nós que suportam o protocolo são chamados de *Dual Attached Node HSR* (DANH).

O funcionamento de HSR, similar que em PRP, consiste no envio do mesmo pacote pelas duas interfaces de rede o que devido à topologia restrita a anel, os pacotes viajarão nos dois sentidos do anel (Figura 5.3). Para tráfego *unicast*, os nós intermédios recebem o dado por uma porta e o encaminham pela outra, já no nó destino, o pacote é recebido pelo dispositivo e processado. Em transferências *multicast*, cada nó intermediário comparará se pertence ao grupo enviado ou não, e encaminhará a mensagem.

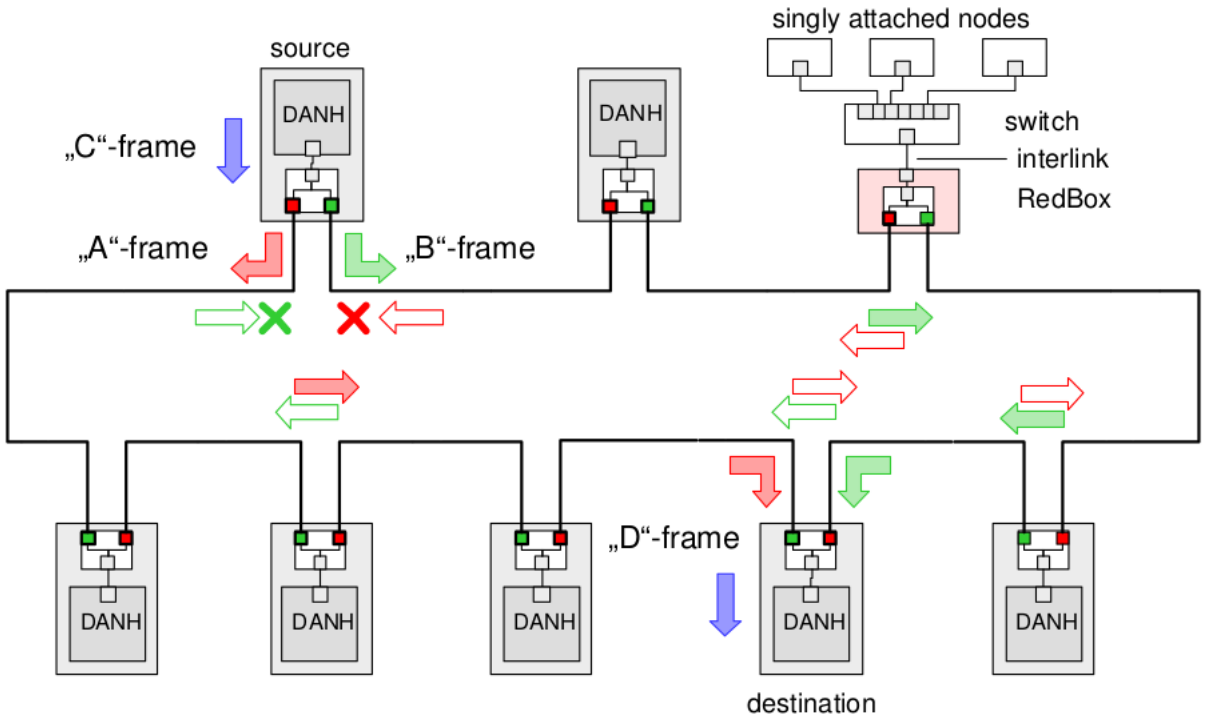


Figura 5.3: Topologia de rede usando HSR[3].

Para conectar dispositivos legados ou não compatíveis com HSR se utilizam as *Quad-Boxes*, permitindo assim a implementação do protocolo em sistemas não suportados [2].

Na Tabela 5.1 se resumem as principais características descritas dos protocolos de monitoramento da redundância e reconfiguração de redes de comunicação industriais. Na prática não existe uma topologia de rede perfeita, nem um protocolo perfeito de redundância que cubra todos os requisitos e aplicações do sistema. A seleção da topologia e de protocolos dependerá, também, de outros requisitos como o entorno de instalação físico e da criticidade nos tempos permitidos de recuperação da rede nos diferentes segmentos de rede.

Protocolo	**Topologia**	**Max. de dispositivos**	**Tempo de recuperação no pior dos casos**	**Tempo de reconfiguração no caso normal**
RSTP	Anel	40	Aprox. 2 segundos para perdas de mais de um BPDU	Depende da implementação e do número de *switches* no anel. Tipicamente entre 100 ms e 200 ms para 40 dispositivos
RSTP	Qualquer	Qualquer	>2 segundos para perdas de mais de um BPDU	Difícil de estimar, requere uma análise detalhada da rede em questão
MRP	Anel	50	500 ms, 200 ms, 30 ms e 10 ms (depende da parametrização)	Aprox. 200 ms, 60 ms, 15 ms e <10 ms (depende da parametrização)
PRP	Dupla, qualquer	Qualquer	0 ms	0 ms
HSR	Anéis (acoplados)	512	0 ms	0 ms

Tabela 5.1: Protocolos de redundância para redes industriais

5.1.3 Latência

Nas redes de comunicação, latência é o tempo que uma mensagem leva para ir do transmissor até o receptor. Sistemas baseados em *switches* têm várias fontes de latência e nos sistemas elétricos internos de uma subestação essa latência para mensagens prioritárias tem um valor significativamente baixo a ser cumprido [39].

- **Latência *Store and forward*(L_{SF})** Armazenar e encaminhar é o principio básico de operação de um *switch Ethernet*. O dispositivo armazena em *buffer* a informação recebida até que o quadro completo seja recebido. Quando isso acontece, o quadro de dados é transmitido para a porta correspondente. Essa latência é proporcional ao tamanho da quadro (FS) e inversamente proporcional ao bit rate (BR) [39]:

$$L_{SF} = \frac{FS}{BR} \tag{5.1}$$

- **Latência de fábrica do *Switch* (L_{SW})** A latência de fábrica do switch está no range de poucos microssegundos para switches industriais. Está dada internamente quando cada dispositivo realiza as funções de armazenamento e reenvio, manutenção da tabela de endereços MAC, VLAN e a *Class of Service* (CoS) e outras.
- **Latência na linha de transmissão (L_{WL})** A latência na linha de transmissão depende da tecnologia usada fisicamente para enviar as informações. A fibra óptica tem uma taxa de transferência de 2/3 do valor da velocidade da luz (3x108 m/s) e quando as distâncias são longas o delay começa a ser considerado, mas no interior das subestações esse é um valor considerado trivial se comparado com as outras latências.
- **Latência de enfileiramento(L_Q)** Calcular essa latência para cada quadro *Ethernet* pode ser um desafio, pois requer um conhecimento detalhado das fontes de tráfego da rede, do tamanho máximo do quadro transmitido por cada dispositivo, das políticas de prioridade dadas pelo CoS, da taxa de envio, entre outras. Em alguns casos essas informações são conhecidas, em outros, algumas suposições devem ser feitas. No entanto, uma latência média pode ser calculada e vai depender do tamanho da quadro e da carga da rede de comunicação.

  Em uma rede com pouco tráfego a latência de enfileiramento pode ser assumida como zero. Em uma rede com tráfego a probabilidade de um quadro estar enfileirado é proporcional a carga da rede. Então, a latência pode ser modelada como uma porcentagem da latência de armazenamento e reenvio (L_{SF}):

$$L_Q = (CargaRede) * L_{SF(max)} \tag{5.2}$$

  Apesar de que a equação 5.2 indica uma aproximação de L_Q, existem outras modelagens de enfileiramento que podem ser aplicados para obter essa latência com maior aproximação. As teorias de enfileiramento podem ser consideradas para achar uma melhor estimação dessa latência. Em [40] e [33] se definem vários modelos de enfileiramento que podem ser aplicados.

Latência total (L_{Total}) Por fim, as latências descritas previamente são aplicadas ao número de *switches* pertencentes ao caminho do quadro da origem ao destino do tráfego da informação. Pode ser definida como:

$$L_{TOTAL} = \sum_{Switches} (L_{SF} + L_{SW} + L_{WL} + L_Q) \tag{5.3}$$

Onde cada latência parcial que contribui para o total é considerada de forma separada para cada switch no caminho de transmissão. Pode-se simplificar consideravelmente o cálculo se é assumido que existe uma única fonte de tráfego prioritário e que fosse pouco provável que múltiplos quadros não requeiram ser enfileiradas em nenhum *switch*.

5.1.4 Escalabilidade e expansibilidade

Essa propriedade dos sistemas se resume na capacidade de suportar um número de elementos a mais, além do que foi projetado. Nas redes de comunicação de SAS se refere ao número de dispositivos conectados ao sistema que podem ser adicionados, por exemplo, ante uma expansão sem comprometer o desempenho nem as características para as quais foi projetado. Esse tipo de questões pode ser feita mediante cálculos e estimativas acompanhado de simulações ou estudos de caso em laboratório. A última opção pode resultar custosa em ambientes industriais ou acadêmicos, motivo pelo qual as simulações podem ajudar.

5.1.5 Manutenibilidade

A manutenibilidade se refere a que tão fácil, preciso, seguro e econômico é realizar as tarefas de manutenção de um sistema, por exemplo, quando ocorrer uma falha no sistema elétrico, qual a facilidade de encontrar sua origem. Em redes de comunicação envolve as configurações de dispositivos, recuperação de falhas na rede de comunicação, segurança em controles de acesso à parametrização, monitoramento do sistema.

5.2 Topologias de rede de comunicação

As possíveis alternativas da rede de comunicações são projetadas segundo os requisitos de proteção, controle e monitoramento de uma subestação elétrica. Apesar de existirem diferentes topologias de rede de comunicações algumas dessas arquiteturas são comumente usadas no design de uma solução [16]. No entanto é importante considerar se existe uma relação generalizada de quais topologias de rede são utilizadas para determinados esquemas de proteção, e identificar as arquiteturas de rede para os dois barramentos que conformam um sistema de automação: O barramento de estação e o barramento de processo.

Esses barramentos podem ou não estar na mesma rede, mas para o aproveitamento

da infraestrutura pode se considerar a opção de que esses dois barramentos conformem uma mesma rede física e que a separação seja levada a cabo logicamente. Em qualquer cenário, as condições dadas pela norma devem ser atendidas.

Existem trabalhos na literatura como o de Vadiati et al. [41] que modelam e calculam a significância da subestação para determinar a arquitetura de comunicação nos barramentos de estação e de processo. Esses autores, usando índices de significância, classificam subestações de transmissão e sub-transmissão e sugerem, segundo a "nota"obtida, a arquitetura de rede para os barramentos de estação e de processo. Trabalhos como Tourier et al. [42], Kanabar et al. [20], Zhu et al. [43], por sua parte, documentam o design de subestações em função da largura de banda, da disponibilidade, confiabilidade, custo, etc., ilustrando certa coincidência na utilização de várias das topologias, o que significa que existe uma noção inicial a ser considerada na projeção de uma rede de dados. Segundo essas arquiteturas encontradas na literatura e nos estudos de caso mencionados anteriormente, são apresentadas nas seguintes seções as topologias de rede para os dois barramentos existentes em uma subestação: barramento de processo e de estação.

5.2.1 Barramento de estação

5.2.1.1 Estrela

A arquitetura estrela mostrada na Figura 5.4 tem um *switch* principal (S1) com os outros *switches* conectados a ele. Essa topologia é de fácil configuração, expansão e manutenção. A latência entre os dispositivos é baixa, pois os saltos entre os IEDs no mesmo segmento não é maior a dois. Uma importante desvantagem é que uma falha no *switch* do *backbone* deixaria a rede inoperante [44].

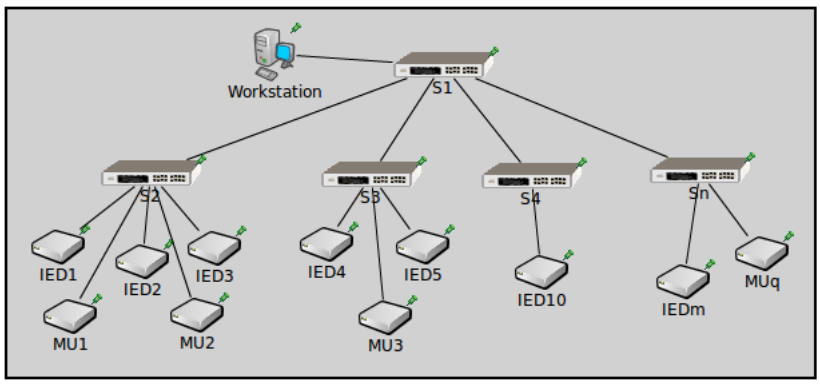


Figura 5.4: Topologia estrela

5.2.1.2 Estrela híbrida

Uma melhora da topologia anterior é a incorporação de mais um switch no "backbone", melhorando a confiabilidade do sistema, oferecendo um melhor nível de redundância, mas requerendo também maior custo de interconexão.

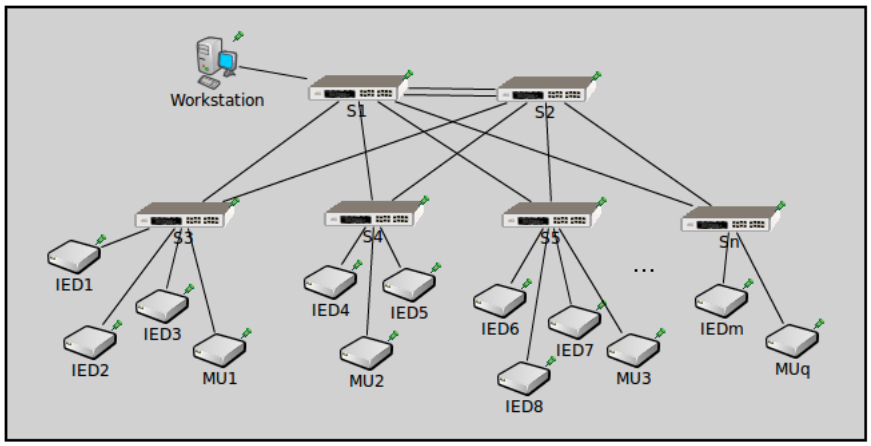


Figura 5.5: Arquitetura estrela híbrida

5.2.1.3 Anel

A topologia em anel é a mais usada nos sistemas de automação de subestações. Fornece um tipo de redundância e recuperação de falhas de enlaces usando protocolos como *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP), protocolos proprietários, ou protocolos emergentes como *Media Redundancy Protocol* (MRP) e *High-availability Seamless Redundancy* (HSR). Atualmente o mercado de *Switches Ethernet* gerenciáveis utilizam RSTP ou protocolos proprietários e já alguns estão incorporando, mediante interfaces adicionais, suporte a PRP e HSR.

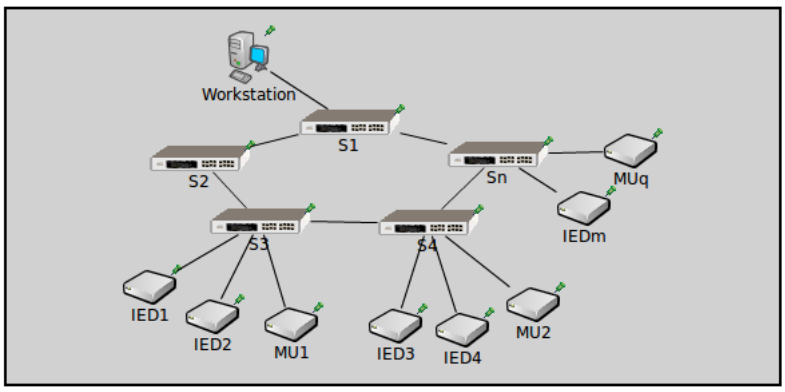


Figura 5.6: Arquitetura Anel

5.2.2 Barramento de processo

Como mencionado anteriormente, o barramento de processo conecta os níveis de vão com o de processo. A utilização de tecnologias compatíveis com a Norma IEC61850 nesse barramento, permite a substituição de sinais binários e analógicos por mensagens *ethernet* incorporando às comunicações digitais as MUs, as interfaces de corrente e tensão dos transformadores e os dispositivos dos vãos como relés de proteção e de controle [45]. No barramento de processo é onde existe, ou pode existir, o maior tráfego de informação e sua topologia é a mais crítica em questões de tempo. Circulam dados como *Sampled Value*s (SVs), status dos disjuntores, comandos de chaves, temperatura dos transformadores, mensagens *Trip* de proteção, comandos de controle, mensagens *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE), blocos de controle, reportes armazenados, etc. [42].

Em sistemas tradicionais o barramento de processo usa um sistema de comunicação independente do barramento de estação, no entanto, com a incorporação das *Merging Unit*s (MUs) e a adoção da Norma IEC 61850, os sistemas de automação podem ter um sistema de comunicação junto com ambos barramentos e separando o tráfego logicamente. Precisa-se conhecer até que ponto essa conexão lógica dentro de uma mesma rede suporta os parâmetros e condições dadas pela Norma.

5.2.2.1 Rede PRP

Como foi visto em seções anteriores, o requisito para a implementação do *Parallel Redundancy Protocol* (PRP) é a utilização de duas redes separadas. As mensagens *multicast* são enviadas pelos dois caminhos simultaneamente e os dispositivos as recebem de forma replicada descartando a segunda. Essa arquitetura garante que não haja perda de informação crítica, mas requer que os dispositivos como IEDs sejam compatíveis com o protocolo. A Figura 5.7 mostra o caso de dois IEDs conectados a duas redes diferentes, uma em anel e outra em estrela.

5.2.2.2 Anel com RSTP/HSR:

Essa arquitetura precisa que os IEDs possuam um *mini-switch* interno que implemente os protocolos HRS/RSTP. Sua principal vantagem é a confiabilidade *point-to-point* na conexão. Quando só RSTP é implementado as mensagens de SV ou GOOSE podem ser atrasadas ante uma falha enquanto a rede é reconfigurada. Se HSR é implementado não há essa perda.

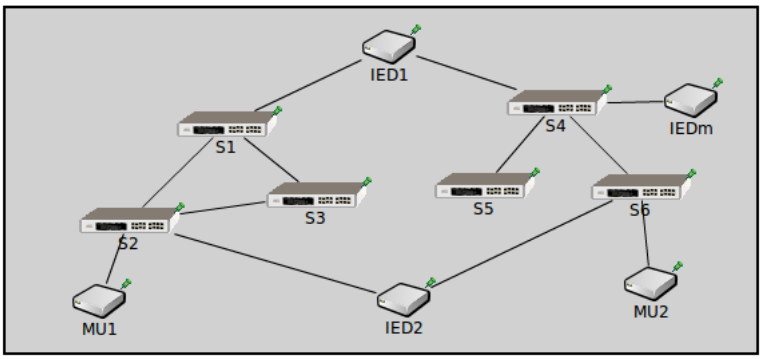


Figura 5.7: Arquitetura de rede PRP

Neste Capítulo foram expostos os principais critérios usados no design de sistemas de comunicação aplicado aos sistemas de automação. Descreveram-se aspectos como confiabilidade, largura de banda, redundância, latência, escalabilidade e manutenibilidade, necessários para satisfazer os requisitos da Norma IEC 61850. Por fim, foram mostradas as topologias de rede comumente usadas nos barramentos de estação e processo. No Capítulo seguinte serão modelados os dispositivos pertencentes as redes de comunicação de um SAS que permitiram a simulação dos cenários apresentados.

Capítulo 6

Modelagem da rede de comunicação de uma subestação baseada na IEC61850

Comumente as simulações têm aportes importantes na verificação e avaliação de diferentes requisitos antes de realizar uma implementação real. Para um sistema de automação de uma subestação elétrica os simuladores são de grande utilidade antes de fazer investimentos em equipamentos, ou como arcabouço de testes, expansões, desenvolvimentos de equipamentos ou protocolos novos. Um simulador provê à industria e à academia a possibilidade de pre-visualizar diferentes panoramas. [46].

Nos capítulos anteriores foram descritos os Sistema de Automação de Subestação (SAS), os principais requisitos do padrão IEC61850 e as topologias de rede comumente usadas nas redes industriais. Neste capítulo é apresentada a modelagem realizada para os principais dispositivos e protocolos compatíveis com a norma, e que permitiram avaliar os atrasos das mensagens mediante simulação nas diferentes arquiteturas de rede em sistemas de automação para subestações elétricas. Esses modelos foram desenvolvidos para a plataforma de simulação OMNET++, software *Open Source*, multiplataforma e que possui nas suas bibliotecas dispositivos e protocolos de rede [8].

OMNET++ é uma ferramenta de simulação de eventos discretos que com a contribuição da comunidade dispõe de modelos de dispositivos de rede de dados como *roteadores, switches, hosts* além dos protocolos e camadas comumente usados em ambientes de rede de dados. Existem vários ramos nos quais essa ferramenta é utilizada e a área dos sistemas de automação de subestações não é alheia. Juares *et al.*, em [14], utilizaram OMNET++ para simular uma rede de comunicação de uma subestação de 220kV, além de interconectar um *switch* real para verificar os tempos e formatos das mensagens. Infelizmente, o trabalho não teve continuidade e essas bibliotecas desenvolvidas não estão mais dispo-

níveis para a comunidade, mas os autores verificaram que OMNET++ atende bem às necessidades para essa área e abre a possibilidade a outros desenvolvimentos com seu uso, desenvolvimentos como a presente modelagem.

6.1 Descrição da modelagem

Seguindo a tendência de modularidade e reusabilidade da modelagem orientada a objetos, também adotada por OMNET++, são modelados os dispositivos *Generic IED*, *Merging Unit*, *Switch* e *Dual Attached Node PRP* (DANP) com suas funcionalidades essenciais para a experimentação em redes de comunicação. Como OMNET++ já possui dispositivos típicos de rede, foram aproveitados e estendidos segundo as necessidades do presente trabalho. Para modelar cada um dos elementos mencionados são utilizados os conceitos de camadas segundo os modelos OSI e TPCP/IP, pois OMNET++ implementa o conceitos dessas pilhas para projetar seus dispositivos de rede. Assim, o *Intelligent Electronic Device* (IED), a *Merging Unit* (MU), o DANP e o *switch* são nós de rede personalizados.

Prévio à modelagem dos dispositivos em questão é importante definir primeiro os objetos a serem transmitidos entre os nós que não estão nas bibliotecas de OMNET++, ou seja, as mensagens que serão enviadas e recebidas entre os dispositivos além das utilizadas pelos protocolos já conhecidos. Estas mensagens são as *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e as *Sampled Value* (SV).

6.1.1 Modelagem das mensagens

Criaram-se dois tipos de mensagens: GOOSE e SV. Estas mensagens são originadas nas camadas de aplicação e enviadas diretamente à camada de enlace dos IEDs e MUs, respetivamente. Para a criação do formato das mensagens, Figura 6.1, é utilizada a ferramenta de OMNET++ disponível adicionando os campos correspondentes ao formato do quadro especificado pela parte 8-1 e 9-2 da Norma IEC 61850 [1].

Preâmbulo								MAC destino						MAC origem						Cabeçalho 802.1Q				Ethertype		APPID		Tamanho (m+8)		Rsvd 1		Rsvd 2		APDU			Pad		FCS			
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	..	m	.	.	1	2	3	4

Figura 6.1: Formato de quadro GOOSE e SV

6.1.1.1 Mensagem tipo GOOSE

Segundo as especificações da Norma as mensagens tipo GOOSE são mapeadas diretamente à camada de enlace para evitar processamento de camadas superiores, devido ao seu requisito de latência. Usando o formato de um quadro *EtherFrame II* são definidos seus campos segundo a especificação da parte 8-1 da Norma. Cada IED compatível com IEC 61850 é capaz de gerar e processar mensagens deste tipo. Os atributos são mostrados a continuação:

```
packet Goose {
    int appid;
    int length;
    int reserved1;
    int reserved2;
    int tpid;
    int vid;
    int priority; // GOOSE default: 4
    int etherType; //default: 0x88B8
    int cfi; //Shall be 0
    double timeStamp;
    unsigned char APDU[];
}
```

Com isto, os modelos implementados em OMNET++, além de enviar mensagens de protocolos como TCP, IP, *EtherFrame*, entre outros, enviam também mensagens GOOSE com o formato do quadro fiel à Norma.

6.1.1.2 Mensagem tipo SV

De forma similar às mensagem GOOSE, são criadas as mensagens *Sampled Value* (SV) usando o formato de um quadro *EtherFrame II*. Essas mensagens são utilizadas pelas MU simulando seu envio a diferentes taxas de amostragem conforme a Norma IEC 61850. Os atributos das mensagens tipo SV são definidos segundo a parte 9-2 da Norma [1].

```
packet SampledValue {
    int appid;
    int length;
    int reserved1;
```

```
    int reserved2;
    int tpid;
    int vid;
    int priority; // SV default: 4
    int etherType; // default: 0x88BA
    int cfi; //Shall be 0
    double timeStamp;
    unsigned char APDU[];
}
```

Uma vez definidos os tipos das mensagens de maior importância nos sistemas de comunicação dos SASs o passo seguinte é a modelagem dos dispositivos que as usam.

6.1.2 Modelo de um IED

O modelo do *Intelligent Electronic Device* (IED) consiste basicamente na implementação de um nó de rede com as camadas física, de enlace, rede, transporte e aplicação. Utilizando as bibliotecas de nó genérico de OMNET++ é estendido e criado o IED da Figura 6.2 na qual se representam as camadas do dispositivos genérico ao lado esquerdo e o complemento modelado para atender as funcionalidades deste dispositivo ao lado direito. Os blocos brancos da figura representam os módulos novos desenvolvidos, enquanto os blocos cinza são os módulos reutilizados das bibliotecas existentes.

Na camada de aplicação é modelada e implementada a geração e processamento de mensagens tipo GOOSE, MMS e outros. São as funcionalidades básicas do IED. Segundo a Norma IEC 61850, um IED deve ser compatível com o protocolo IEEE802.1Q para a utilização de VLAN, *Tag* de prioridades de quadros *Ethernet* e a implementação do protocolo *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP) como mínimo mecanismo de recuperação de falha nos enlaces de comunicação. Essas funcionalidades são agrupadas no bloco IEEE802.1Q o qual representa uma subcamada da camada de enlace. É localizada nessa posição para manter a compatibilidade com outros tipos de nós existentes nas bibliotecas de INETMANET. Adicionalmente, foi criado um módulo de enfileiramento para futuros trabalhos que permitam a análise e implementação de filas na saída dos IEDs e, por fim, foi elaborado o módulo de captura de quadros *ethernet*, *Pcapper* . A Figura 6.3 reúne os diferentes blocos criados para o IED e cujas definições são resumidas na Tabela 6.1.

Os módulos *mac, queue, encap, network, tcp, IPBurst* são reutilizados das bibliotecas

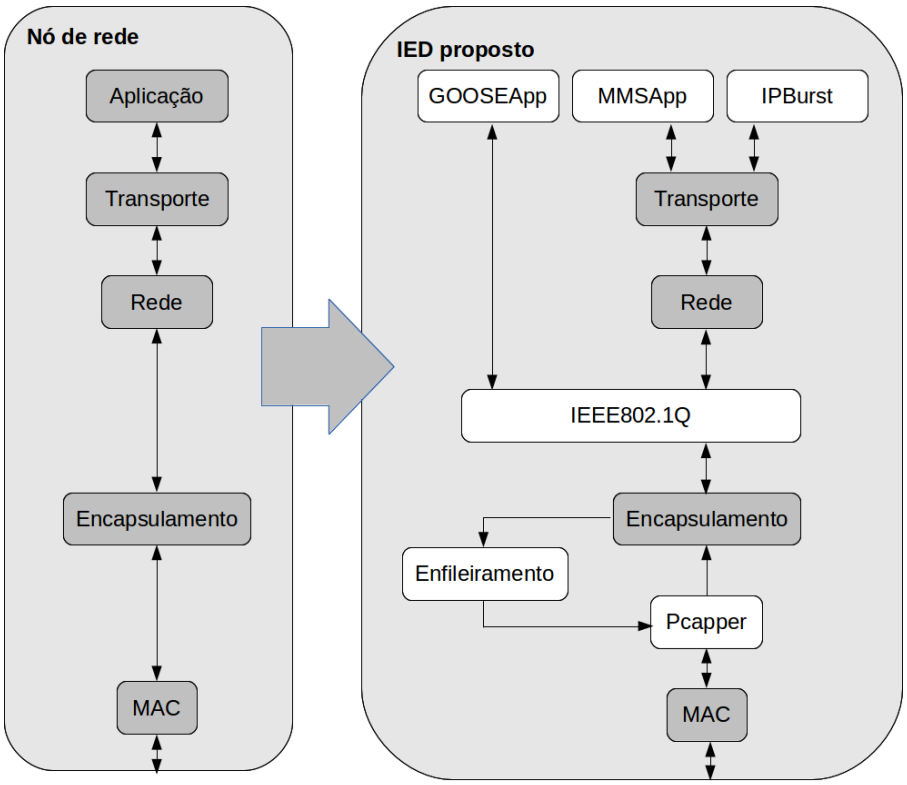


Figura 6.2: Modelagem de camadas do IED

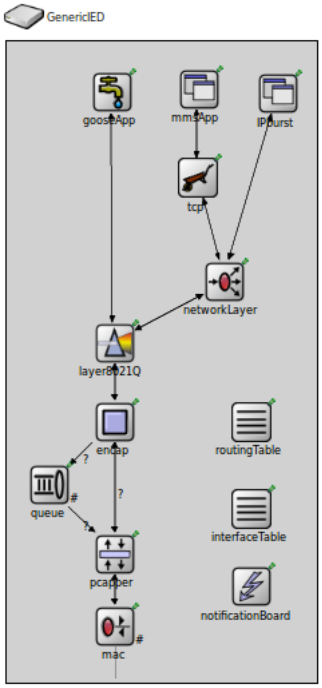
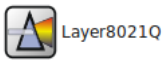


Figura 6.3: Modelo em OMNET++ de um IED

de INET/INETMANET. Enquanto os módulos *pcapper, layer8021Q, gooseApp, mmsApp* são especificados e desenvolvidos para o presente trabalho.

Comumente, nos sistemas de automação e subestações são usados IEDs de controle

Tabela 6.1: Componentes desenvolvidos do IED

	Módulo que contém a aplicação geradora de quadros tipo Etherframe II as informações acorde às mensagens GOOSE. Por serem desse tipo, os quadros gerados tem o campo *ethertype* em 0x88B8. Adicionalmente é possível configurar a prioridade e o VID segundo o padrão IEEE802.1Q. Suas variáveis parametrizáveis são: Endereço destino, tempo de inicialização, tempo de parada, intervalo de envio, tamanho da mensagem, VID e prioridade.
	Representação básica de uma aplicação Cliente/Servidor para a transferência de mensagens *Manufacturing Messaging Specification* (MMS) com o servidor da subestação e outros IEDs.
	Módulo que implementa as funções básicas do padrão IEEE802.1Q. Remove ou coloca o cabeçalho 802.1Q (TPID e TCI) Adicionalmente, segundo o quadro recebido, é enviado pela pilha de protocolos correspondente. As mensagens GOOSE recebidas da rede são enviadas à *gooseApp*, as solicitações ou respostas MMS são enviadas para a camada de rede para alcançar a *mmsApp*. Seu mapeamento depende do *ethertype* contido no quadro.
	Módulo que monitora o tráfego de entrada e saída, e salva as informações em um arquivo *.pcap*, para que elas possa m ser analisadas por um aplicativo, como, por exemplo, *Wireshark*. Este módulo permite a verificação do correto formato dos quadros gerados. Parâmetros: On/Off

e proteção, e IEDs disjuntores. Devido a isto, esse modelo genérico de IED foi usado para especificar os modelos destes tipos como uma extensão, herdando suas funções e parâmetros. A diferença entre esses modelos é que os IEDs disjuntores, a cada vez que recebem uma mensagem GOOSE, enviam uma resposta GOOSE para o dispositivo ou grupo *multicast* que a enviou para verificar seu status.

6.1.3 Modelo de uma *Merging Unit* (MU)

Para a modelagem deste dispositivo é usada novamente a ideia de um gerador de tráfego que envia quadros *ethernet* diretamente à camada de enlace. É criado um nó de rede com as camadas física, enlace e aplicação. A Figura 6.4 representa os blocos ou submódulos do dispositivo. Para este caso, a MU só tem na camada de aplicação a geração e processamento de mensagens tipo *Sampled Value* (SV) e as outras camadas são equivalentes às usadas no IED.

São reutilizados e configurados os módulos *mac, encap, queue, network* pertencentes ao framework INET/INETMANET. O bloco *networkLayer* se usa para a configuração da rede e para futuros desenvolvimentos. O módulo principal desenvolvido para este dispositivo, mostrado na Tabela 6.2, foi *svApp*, e os módulos reutilizados da modelagem do IED foram *layer8021Q* e *pcapper*. A Figura 6.5 mostra o design final da MU em OMNET++.

Por fim é realizado o diagrama de classes da Figura 6.6 e posteriormente o código em

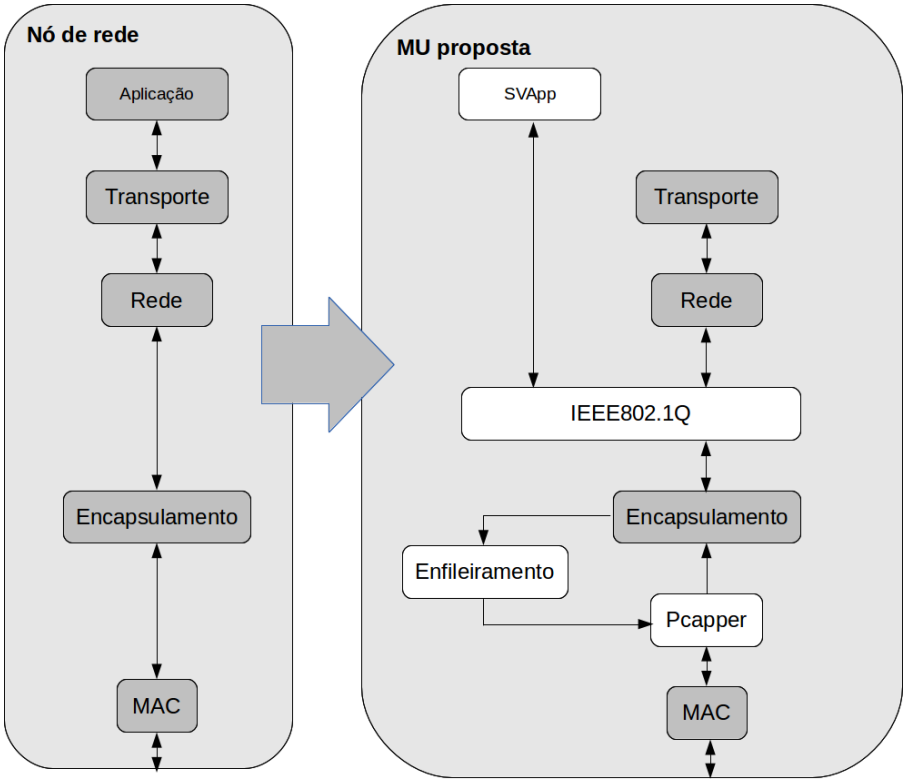


Figura 6.4: Modelagem de camadas da MU

Tabela 6.2: Componentes desenvolvidos da MU

SVApp	Módulo que contém a aplicação geradora de tráfego de quadros tipo *Etherframe II* com seu PDU acorde às mensagens SV. Por serem deste tipo, os quadros gerados tem o campo *ethertype* em 0x88BA. Adicionalmente é possível configurar a prioridade e o VID se for preciso usar o padrão IEEE802.1Q. Seus parâmetros são: Endereço destino, tempo de inicialização, tempo de parada, tamanho da mensagem e intervalo de envio que depende da taxa de amostragem segundo as classes de desempenho estabelecidos na Norma.

C++, que é a linguagem usada por OMNET++ para a especificação dos módulos dos dispositivos IED e MU.

6.1.4 Modelo de um *switch Ethernet*

Os *switches Ethernet* não gerenciáveis não conseguem cuidar dos *loops* criados em topologias como anel ou malha, portanto, para melhorar o comportamento da rede nesses cenários se requerem *switches* gerenciáveis que implementem, no mínimo, o *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP) (IEEE802.1w) para cuidar da recuperação da rede e desses possíveis *loops* gerados nessas arquiteturas. OMNET++ possui um modelo básico de um *switch* composto por bloco *MAC* e uma unidade de encaminhamento chamada *relayUnit* que implementa RSTP, e recebe e envia as mensagens segundo sua tabela de encami-

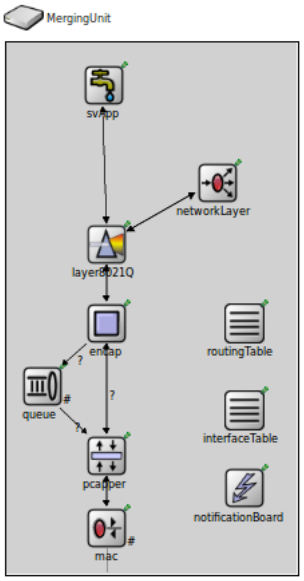


Figura 6.5: Modelo em OMNET++ de uma Merging Unit

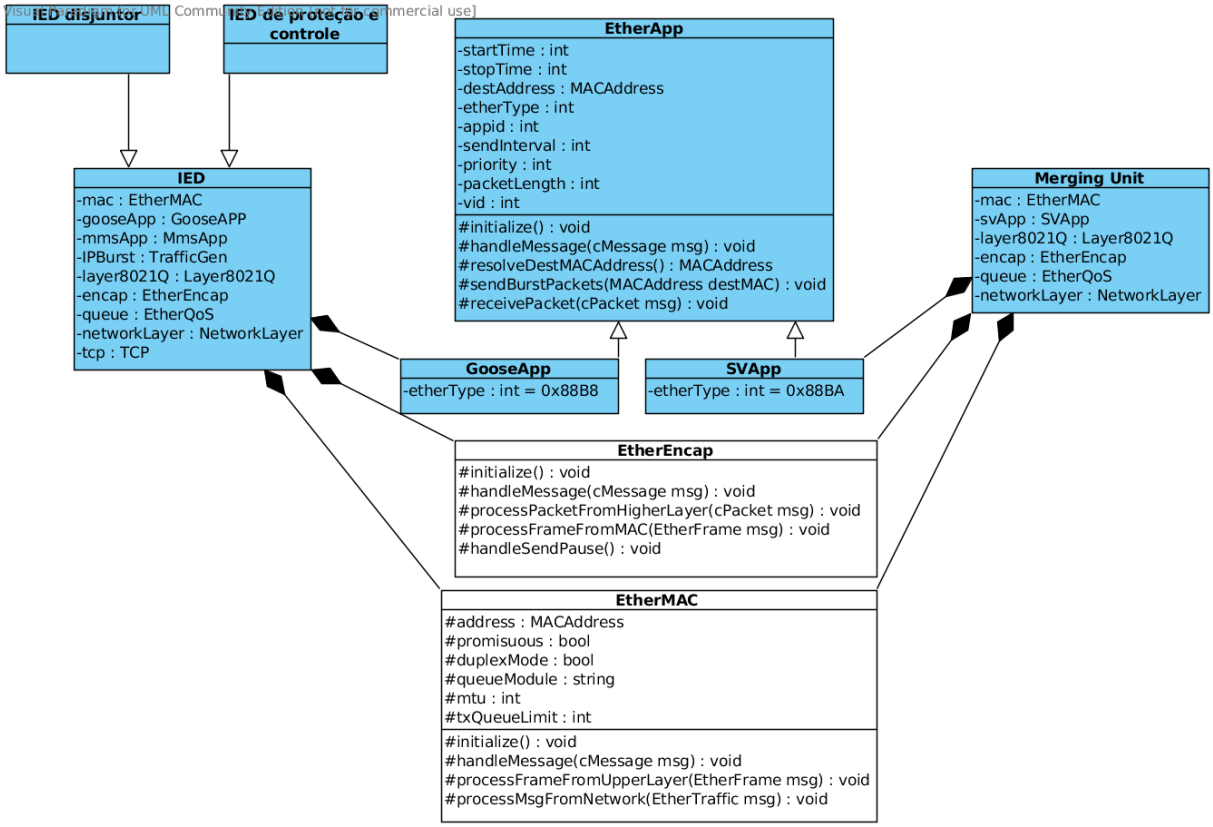
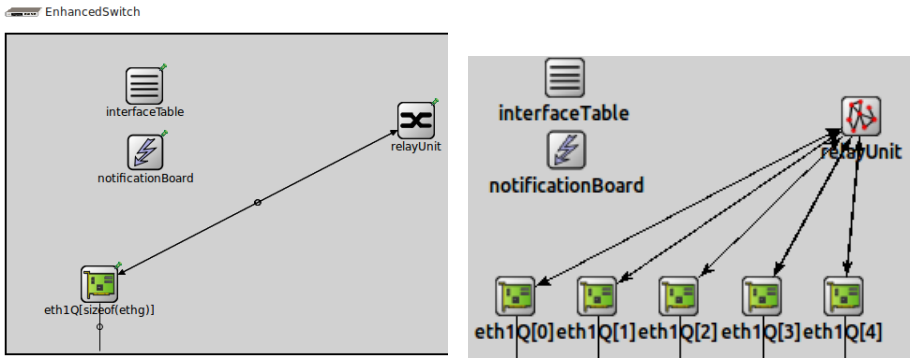


Figura 6.6: Diagrama de classes geral

nhamento. No entanto, funcionalidades da norma IEEE802.1Q-2005 como redes virtuais (VLAN) e *Tags* de prioridade não estão presentes nesse modelo. O presente desenvolvimento estendeu as funcionalidades do modelo simples de *switch* adicionando, de maneira

básica, o entendimento de quadros que obedecem à norma IEEE802.1Q pois sua presença é necessária para simular corretamente as topologias com suporte a IEC 61850. Os blocos utilizados são descritos na Tabela 6.3 e na Figura 6.7(a) se mostra o modelo criado, o qual, flexivelmente, cria interfaces para cada uma das portas necessárias. Isto significa que se ao *switch* precisam ser conectados 5 dispositivos, durante a inicialização da simulação são criadas as respectivas conexões e suas portas. A Figura 6.7(b) ilustra o caso para cinco dispositivos conectados (5 portas *ethernet*).



(a) Switch Ethernet (b) Switch durante simulação

Figura 6.7: Modelo básico de um *switch ethernet* compatível com a Norma IEC61850

MACRelayUnit1Q	Módulo que representa a unidade de encaminhamento do *switch*.
Ethernet1QInterface	Módulo correspondente à interface *ethernet*. Internamente está composto pelos módulos *mac*, que pertence a INET/INETMANET, e *queue* e *ieee*, que foram criados.

Tabela 6.3: Componentes desenvolvidos do *Switch Ethernet*

6.1.4.1 Interface Ethernet

Dentro do *switch* modelado, para adicionar as funcionalidades previamente descritas, foi necessário criar o módulo *Ethernet1QInterface*, composto por uma subcamada, *ieee1QLayer*, que implementa as funcionalidades de filtragem segundo as especificações da norma IEEE 802.1Q, além disso, um bloco de enfileiramento, *queue*, que permite classificar e priorizar os diferentes quadros segundo a configuração. Esses blocos criados são ilustrados na Figura 6.8 e seus parâmetros e descrição são mencionados na Tabela 6.4.

6.1.4.2 Módulo de enfileiramento

O módulo de enfileiramento *queue* é encarregado de receber as mensagens encaminhadas pelo módulo *Ieee1QLayer* para enviá-as à subcamada *mac* segundo sua marca de priori-

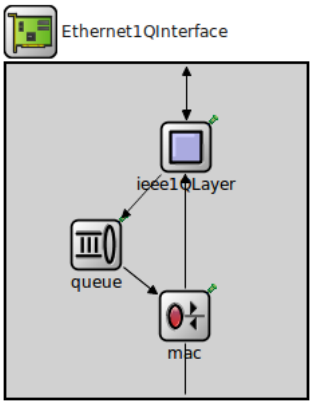


Figura 6.8: Interface ethernet do switch

	Módulo que cumpre as funções básicas de filtragem de entrada e saída segundo o padrão IEEE802.1Q-2005. Entrega e recebe os quadros ao *relayUnit* so *switch* para seu encaminhamento.
	Módulo usado na saída de cada interface *ethernet* em uso. Recebe os quadros a serem enviados mediante a interface e os enfileira segundo sua prioridade. Esse módulo quando ativo usa as sete filas definidas devido às sete prioridades usadas pela norma IEEE802.1Q-2005. Quando desativado, os quadros são colocados em duas filas só, segundo especificação da Norma IEEE802.3.

Tabela 6.4: Componentes desenvolvidos do *Switch Ethernet*

dade e da disponibilidade do meio de transmissão. Utiliza um classificador que identifica a prioridade do quadro e o envia a um dos sete blocos, cada um representando a fila de saída para cada prioridade. Esses blocos de prioridade podem ser configurados com funcionalidades como filas *DropTail, FIFO*, etc., já incluídas em OMNET++. A Figura 6.9 ilustra os componentes.

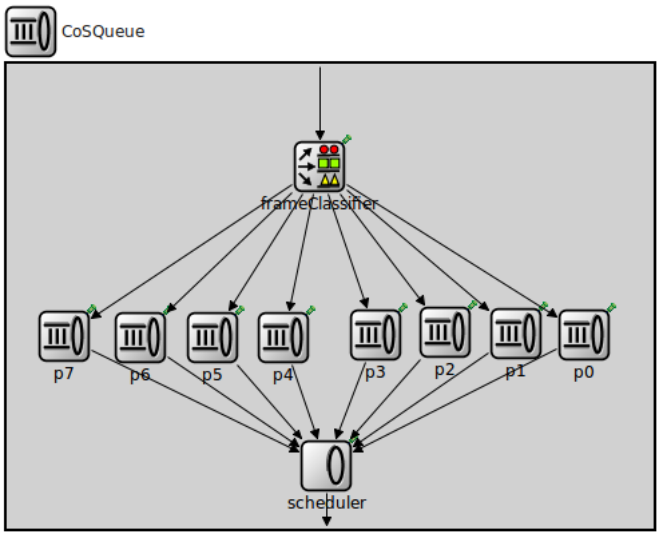
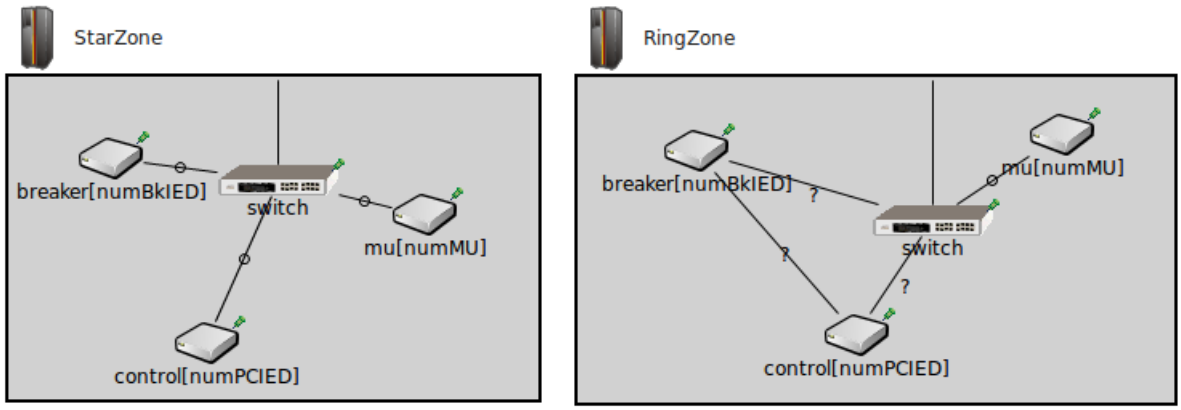


Figura 6.9: Módulo de enfileiramento *Queue* em Omnet++

6.1.5 Zona

Uma vez modelados os nós principais de um SAS, esses podem ser agrupados para facilitar a simulação de diferentes topologias, para isso foi criado um bloco de cada arquitetura comumente usada na automação de subestações. Uma zona equivale ao agrupamento e conexão de vários IEDs e MUs a um *switch* seguindo determinada topologia. No presente trabalho são criados dois tipos de zonas, uma em estrela e outra em anel, mostradas nas Figuras 6.10(a) e 6.10(b), respectivamente. Cada tipo de zona tem um *switch* e se parametriza com o número de IEDs de controle, IEDs disjuntores e MUs que terá conectados. Desta forma durante diferentes simulações podem ser adicionados dispositivos para avaliar os impactos ocasionados. Cada tipo de configuração possui no mínimo um elemento de cada dispositivo para poder ser usado.



(a) Estrela (b) Anel

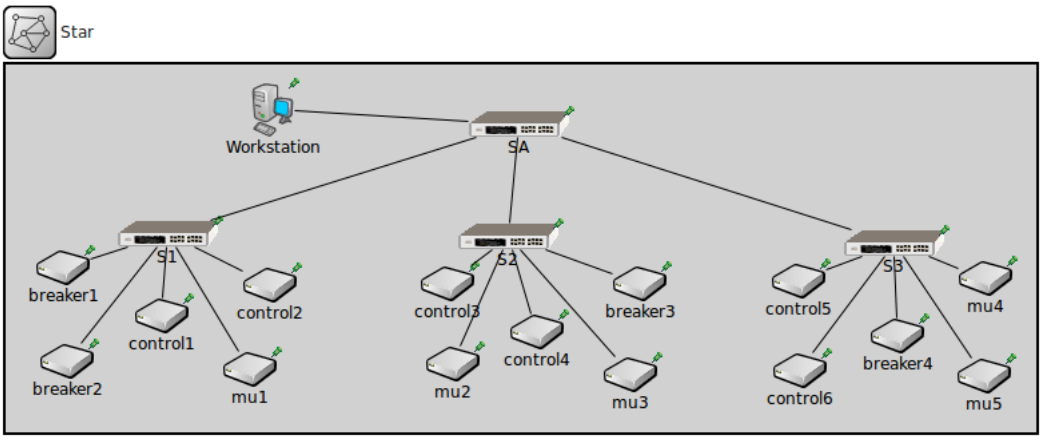
Figura 6.10: Zonas modeladas

6.1.6 Subestação

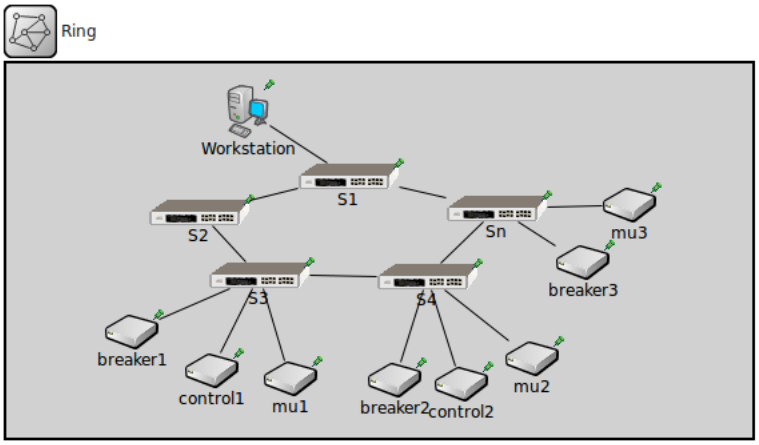
Uma vez criadas as zonas, essas devem ser conectadas à rede da subestação, a qual pode possuir diferentes topologias. São definidos três os tipos de redes comumente usados para interconectar os *switches* de cada zona com o(s) *switch(es)* da subestação: Estrela, Anel e Híbrida(Anel-Estrela).

Os dois primeiros obedecem a topologias bem conhecidas,Figuras 6.11(a) e 6.11(b), já o terceiro, Figura 6.11(c), possui dois *switches* na no barramento de estação (primário e secundário) conectados em anel, e de cada um deles são conectados os *switches* das zonas. Dessa forma, são criadas conexões redundantes entre os dispositivos. Percebe-se que este agrupamento cria diferentes caminhos entre os nós, portanto deve ser usado um

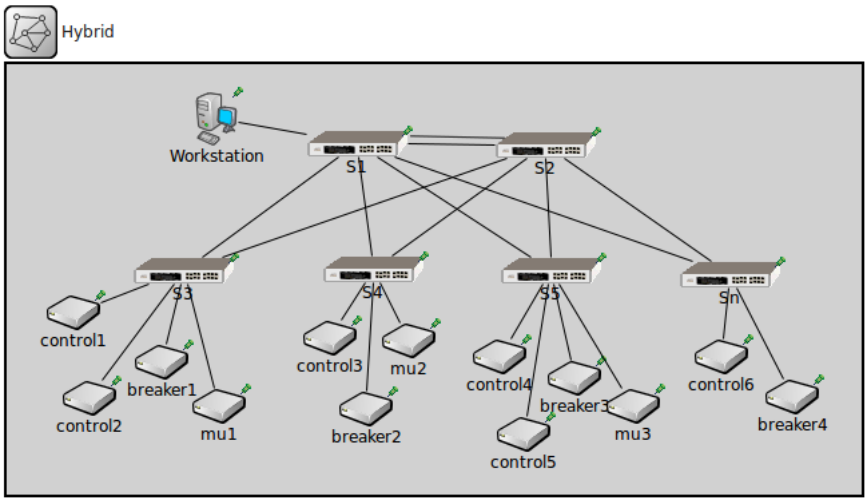
protocolo de monitoramento de redundância e de recuperação como RSTP. Os parâmetros de configuração destes módulos são o número de zonas utilizadas que serão conectadas ao barramento de estação, cada uma com os seus parâmetros descritos anteriormente.



(a) Estrela



(b) Anel



(c) Híbrida

Figura 6.11: Topologias de rede modeladas para SAS

6.1.6.1 Módulo de configuração *Ieee8021QConfigurator*

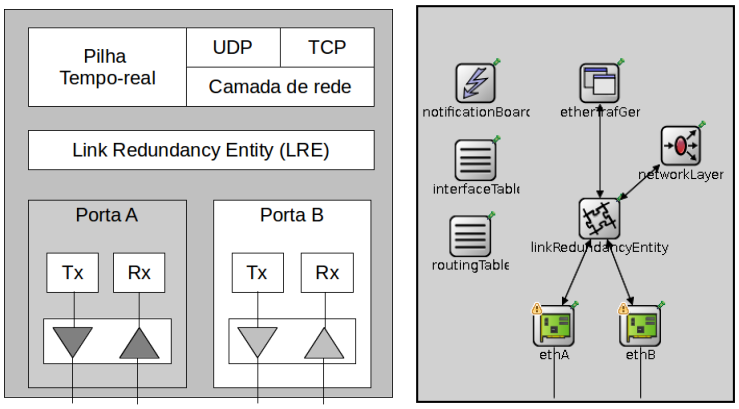
Após ter as topologias montadas, é preciso de um módulo adicional que faça as configurações dos grupos *multicast* e de VLANs antes de iniciar cada simulação, para isto é criado o módulo *Ieee1QConfigurator*. A subcamada *layer802.1Q* de cada nó consulta esse configurador, assim como o *switch* o usa de apoio para suas regras de encaminhamento quando o *Virtual ID* ou endereços *multicast* são usados. O anterior devido a que os nós em questão não implementam funções como *IGMPSnooping*, *Joint* ou *Leave* os quais fariam o trabalho dinamicamente.

6.1.7 *Dual Attached Node PRP* (DANP)

Como mencionado no Capítulo 5, o *Parallel Redundancy Protocol* (PRP) é recomendado na última versão da norma IEC 61850 para cenários que necessitem alta disponibilidade. *PRP* é um protocolo que roda nos *Dual Attached Node PRP* (DANP), e que tem como requisito duas redes LAN independentes. Os nós DANP usam essas duas redes para enviar a informação replicando e marcando cada pacote. Cada nó compatível com este protocolo tem, na sua camada de enlace, uma *Link Redundancy Entity (LRE)* que se encarrega de monitorar o status das redes LAN e dos dados. A *Link Redundancy Entity* (LRE) é quem, na origem, duplica o pacote recebido de camadas superiores e o transmite pelas duas interfaces *ethernet*, assim como, no destino, descarta o pacote duplicado e passa as informações para as camadas seguintes. Desta forma é invisível para as camadas superiores por onde chegou o quadro. É um protocolo de redundância na camada de enlace. A Figura 6.12(a) apresenta a especificação das camadas incluindo nas camadas inferiores duas portas *ethernet*, a subcamada LRE que é quem realiza os cuidados da redundância, e as camadas superiores que implementam a pilha já especificada pela norma IEC 61850.

A Figura 6.12(b) reflete o modelo proposto para o OMNET++ de um DANP segundo as especificações das camadas da Norma IEC62439[2]. Utiliza-se, para o caso, um gerador de tráfego *ethernet* que pode tomar o papel de uma *SVApp* ou uma *GOOSEApp*, descritas anteriormente. O principal bloco deste modelo é a LRE que implementa as funções básicas de funcionamento do protocolo PRP, duplicando as mensagens a serem enviadas e descartando as mensagens duplicadas recebidas.

Uma das particularidades de PRP é que nas camadas superiores, um DANP só utiliza um endereço MAC nas suas duas interfaces, e que é associado a um endereço IP, portanto, para o dispositivo só existirá esse caminho de entrada/saída de informação. É um pro-



(a) Arquitetura dada em IEC 62439-3 (b) Modelo proposto em OMNET++

Figura 6.12: *Dual Attached Node PRP* (DANP).

tocolo que faz com que as interfaces de rede (clonadas) sejam invisíveis, evitando assim processamento desnecessário de quadros em camadas superiores.

6.2 Validação do modelo

Para o processo de validação da modelagem realizada são montados dois cenários: O primeiro deles é a subestação de 220kV utilizada por Sidhu *et al.* [5] na qual é simulada uma falha no sistema elétrico que ocasiona um aumento na transmissão de mensagens GOOSE em um momento determinado. O segundo cenário é uma configuração básica de uma rede de comunicação com suporte ao protocolo PRP, na qual é simulada uma falha no enlace de comunicação obtendo número de pacotes recebidos com sucesso e a perda existente dada a falha no enlace. Para os dois cenários foram utilizados enlaces de 10 e 100 Mbps.

6.2.1 Subestação de 220kV

A subestação selecionada para simular a modelagem realizada é uma subestação de distribuição de tipo D2-1 de 220kV representada pelo diagrama unifilar da Figura 6.13. Possui dois vãos de transformador (T1 e T2), um vão de barramento (S1) e seis vãos de alimentação (F1-F6). A rede *Ethernet* projetada inclui um *switch* para cada vão e um *switch* principal para a subestação. Cada vão de alimentação é modelado dentro de um segmento de rede, com sua própria VLAN, contendo um IED disjuntor, uma MU e dois IEDs de proteção e controle. Cada vão de transformador é modelado em um segmento de rede

com dois IEDs disjuntores, uma MU e dois IEDs de proteção e controle. Por fim, o segmento do vão de barramento possui um IED disjuntor, uma MU e um IED de proteção e controle.

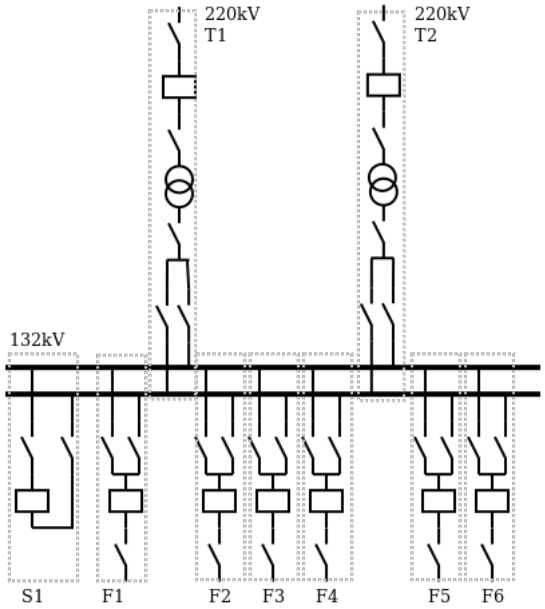


Figura 6.13: Diagrama unifilar de uma subestação de distribuição de 220kV

Segundo a Figura 6.13 são utilizados os módulos desenvolvidos no presente trabalho e recriada a configuração da rede de comunicação de Sidhu *et al.* [5], representada na Figura 6.14. Com relação a perfil de tráfego simulado, os autores assumem o seguinte cenário: As unidades de medição enviam dados SVs a taxas especificas (960, 1920 e 4800 amostras/segundo) aos respetivos IEDs de controle do vão desde o inicio da simulação até o fim. O tamanho das mensagens enviadas pelas MUs dos vãos de transformador é 98 Bytes, para as outras vãos é 56 Bytes. Os IEDs de proteção enviam mensagens GOOSE de 16 Bytes continuamente aos IEDs disjuntores pertencentes a sua VLAN. Todos os IEDs enviam mensagens MMS de 32 Bytes com frequência continua ao servidor a uma taxa de 20 Hz. Adicionalmente, os IEDs de controle enviam, em momentos aleatórios da simulação, dados FTP de 50000 Bytes ao servidor para incluir tráfego aleatório de fundo. Durante a execução é simulada uma falha na rede elétrica que faz com que os IEDs de controle de T1 enviem GOOSE aceleradamente aos IEDs disjuntores do mesmo vão e do vão S1.

Cada bloco F, T e S da Figura 6.14 representa o módulo *Zona* descrito na seção anterior e são configurados segundo as especificações dos autores [5], expostas anteriormente. Para exemplificar os segmentos de rede dos vãos T1 e S1, correspondentes a configuração em estrela (*starZone*) são apresentadas as Figuras 6.15(a) e 6.15(b), respectivamente.

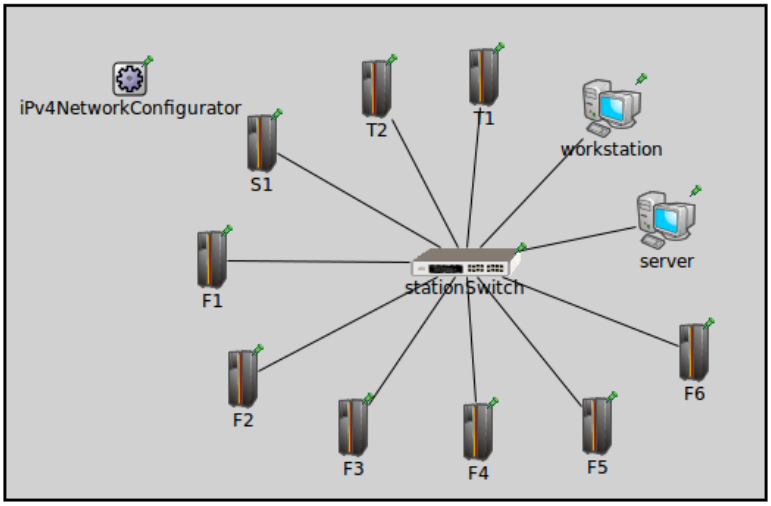
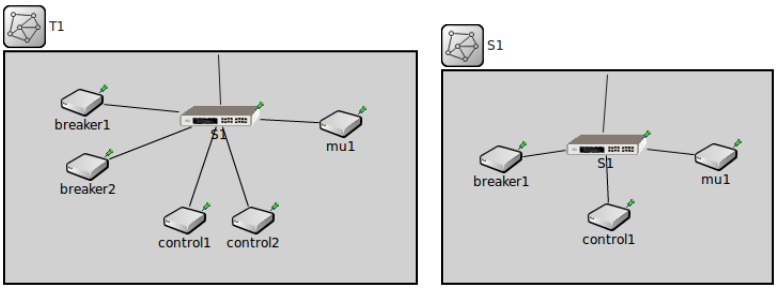


Figura 6.14: Rede estrela usada em uma subestação de 220kV



(a) Segmento de rede T1 (b) Segmento de rede S1

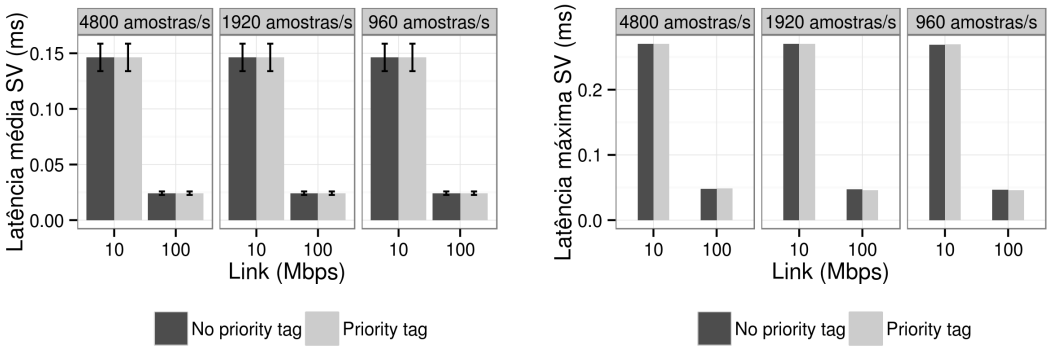
Figura 6.15: Segmentos de rede por vão

Após a execução da simulação são obtidas as latências das mensagens SVs em IEDs de controle e das mensagens GOOSE em IEDs disjuntores. Os resultados são resumidos nas Tabelas 6.5 e 6.6 e ilustrados na Figura 6.16.

Largura de Banda (Mbps)	Taxa de amostragem (amostras/s)	Latência (NoTag)		Latência (Tag)	
		Média	Máx.	Média	Máx.
10	960	0.146	0.269	0.146	0.269
	1920	0.146	0.27	0.146	0.27
	4800	0.146	0.27	0.146	0.27
100	960	0.024	0.046	0.029	0.0457
	1920	0.024	0.046	0.024	0.045
	4800	0.024	0.047	0.024	0.045

Tabela 6.5: Latência de mensagens SV em IEDs de controle

Com base na Figura 6.16, é possível ver que, para o cenário simulado, as latências das mensagens SV calculadas nos IEDs de controle têm valor menor para uma largura de banda de 100 Mbps. Outra características observada foi o impacto do uso de priorização na rede. Notou-se que as mensagens transmitidas com prioridade (*Tag*, no gráfico)

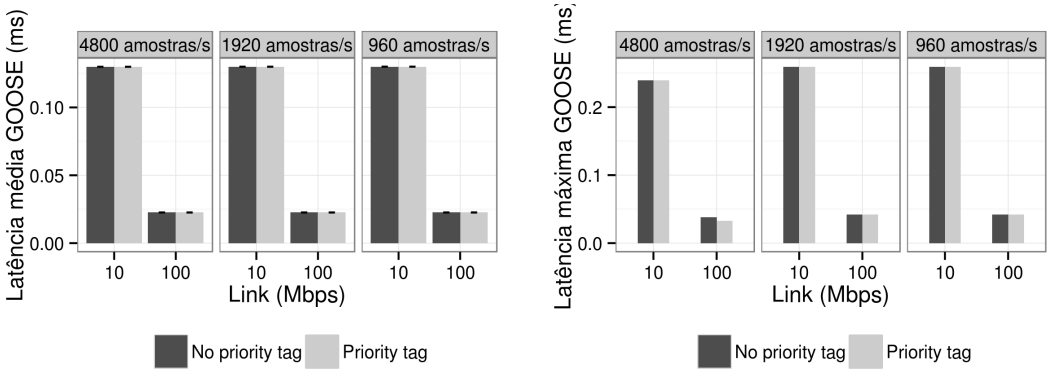


(a) Latência média SVs (b) Latência máxima SVs

Figura 6.16: Latências de SVs em IEDs de controle

Largura de Banda (Mbps)	Taxa de amostragem (amostras/s)	Latência (NoTag)		Latência (Tag)	
		Média	Máx.	Média	Máx.
10	960	0.129	0.259	0.129	0.259
	1920	0.129	0.259	0.129	0.259
	4800	0.129	0.239	0.129	0.239
100	960	0.0226	0.0421	0.0226	0.0421
	1920	0.0225	0.0421	0.0225	0.0421
	4800	0.0225	0.0382	0.0225	0.0325

Tabela 6.6: Latência de mensagens GOOSE em IEDs disjuntores



(a) Latência média GOOSE (b) Latência máxima GOOSE

Figura 6.17: Latências de GOOSEs em IEDs disjuntores

tiveram uma diferença pouca diferença quando comparadas com as que não utilizaram o cabeçalho de prioridade (*NoTag*). Com o anterior se percebe que a configuração parametrizada nas simulações delimitando o *broadcast* em cada VLAN dada a quantidade de dispositivos conectados ao *switch* de cada vão, fez com que o *tag* de prioridade não tivesse maior impacto pois o volume de informação da sub-rede foi dada por 1 ou 2 dis-

positivos. O cenário mostrou que a separação lógica do tráfego mediante VLANs, o uso de prioridades e de grupos *multicast* na camada de enlace, permitiu diminuir o *broadcast* aumentando a possibilidade de conectar mais dispositivos aos *switches* de cada vão. O comportamento obtido nas latências é similar ao descrito por [5] e atendem os requisitos de tempo estabelecidos pela Norma IEC61850.

É importante esclarecer que na simulação realizada por Sidhu[5] para a subestação de 220kV não se descreve se o início dos geradores de mensagens é em um mesmo instante. Na validação do modelo no presente trabalho foram realizadas várias rodadas com tempos de inicio diferentes, ou seja, os geradores de tráfego não iniciam no instante x senão que começam a serem ativados a partir do momento x garantindo desta forma alguns μ segundos ou milissegundos de diferença entre eles, o que permite obter diversos comportamentos ao longo das rodadas.

A Figura 6.18 mostra a linha de tempo do comportamento de UM dos IEDs de controle durante uma rodada da simulação (41 segundos). Pode-se perceber que em determinados instantes a latência (*End-to-End - ETE*) apresenta picos. Isto é causado pelo comportamento da rede, processamento nos *switches* e dispositivos, e enfileiramento causado devido aos geradores de tráfego aleatório dos módulos *IPBurst*. Cada IED tem um comportamento similar ao da figura permitindo ver, também, uma maior concentração de dados en valores muito próximos a zero.

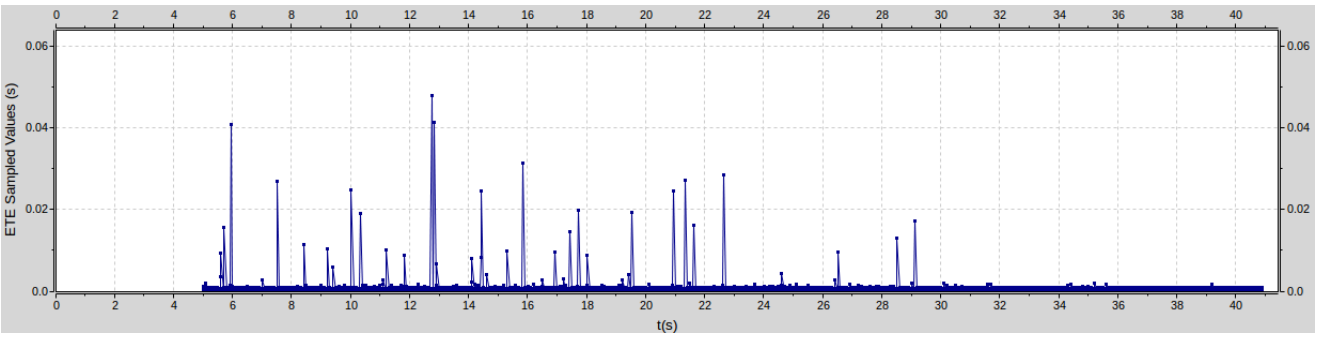


Figura 6.18: Latência de SVs em um IED de controle

Dada a configuração de Sidhu *et al.* [5] foi validado o funcionamento da modelagem realizada para a simulação de uma subestação de 220kV apresentando os resultados obtidos. Existem diferenças entre simuladores, e mais com simuladores de eventos discretos. Percebe-se que os valores randômicos criam *infinitos* cenários mas o comportamento médio e máximo de latências foi similar entre o modelo desenvolvido e o modelo da literatura em questão.

6.2.2 Rede básica com suporte a PRP

Para testar o modelo do PRP é adotada a topologia da Figura 6.19, na qual são utilizadas duas redes LAN *Ethernet* independentes (A e B). A essas redes, estão conectados três nós DANP que enviam mensagens entre eles, a saber, DANP1 envia pacotes para DANP3, DANP2 para DANP1, e DANP3 para DANP2. Todos os pacotes tem 1KB de tamanho e são enviados em intervalos de 1 segundo. As duas redes *Ethernet* usam topologias diferentes, pois a LAN A segue uma configuração estrela, enquanto que a LAN B usa um anel. Os *switches ethernet* usam RSTP para cuidar de cada topologia.

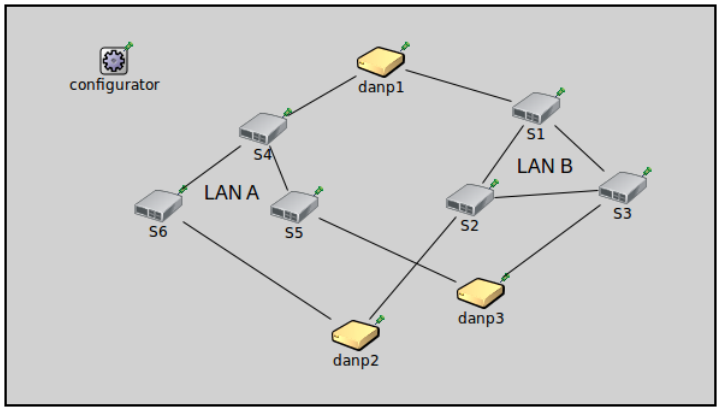


Figura 6.19: Topologia de rede usando PRP

São simulados dois **cenários de falha nas conexões da rede de comunicação**. O primeiro caso é uma falha no enlace entre os *switches* S4 e S6, chamado de Falha 1. O segundo caso simula uma falha na conexão entre S1 e S2 e é chamado de Falha 2. Para a simulação desses cenários, é usado o módulo de falha de canal de comunicação do OMNET++, descrito pela biblioteca *ChannelFailure*, o qual permite especificar o momento na simulação em que o enlace vai ser desativado e ativado novamente, se for desejado. O tempo total de cada simulação é 45 segundos e com conexões de 100 Mbps.

A **Falha 1** na rede de comunicação é simulada entre 20 e 25 segundos de simulação e implica em uma queda na conexão entre os *switches* S4 e S6. Assim, os pacotes transferidos nessa portas são perdidos durante esse tempo. No entanto, o enlace pela LAN B continua ativo, o que significa que, apesar da falha, o nó continua enviando e recebendo informação através desta rede. A Figura 6.20 mostra o enlace com a falha na rede A.

Segundo a parametrização desse cenário, cada nó envia 30 pacotes em cada LAN, ou seja, no receptor devem chegar 60 pacotes de dados, cada um de 1KB. A falha no enlace durante esses segundos na LAN A afeta a transferência entre o DANP1 e DANP2 e entre o DANP2 e DANP3. Apesar dessa perda na conexão, o DANP3 recebe pelo menos 1 dos

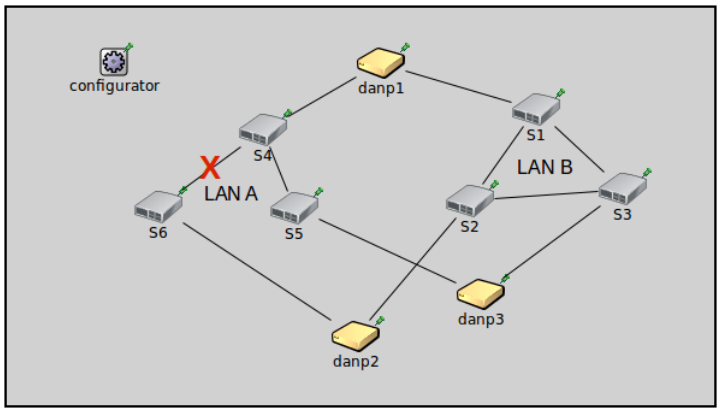


Figura 6.20: Falha em enlace da rede A

pacotes duplicados por meio da LAN B, garantindo que a informação chegue ao destino e que o tempo de correção/recuperação da LAN A não vai impactar negativamente o funcionamento do sistema completo. Os resultados são resumidos na Tabela 6.7.

Descripção	Pacote enviados	Recebidos	Perdidos	Latência média
Transferência DANP1 - DANP2	30 (x2)	53	7	266.24 us
Transferência DANP2 - DANP3	30 (x2)	53	7	358.32 us
Transferência DANP3 - DANP1	30 (x2)	60	0	277.47 us

Tabela 6.7: Resultados com cenário de falha na LAN A

Para o caso da **Falha 2**, a conexão entre os *switches* S1 e S2 (ver Figura 6.21) é interrompida aos 30 segundos de simulação e continua assim até o fim da simulação. Neste caso o protocolo de recuperação e monitoramento de redundância RSTP usa o caminho alternativo (S1-S3) para enviar as informações. Dessa maneira, apesar da falha, a combinação entre PRP e RSTP permite que os nós em questão recebam a informação. No entanto, percebe-se que existe uma perda de pacotes com destinos DANP2 e DANP3 ocasionada pelo tempo que tarda a ativação do caminho alternativo. Os resultados são mostrados na Tabela 6.8.

Descripção	Enviados	Recebidos	Perdidos	Latência média
Transferência DANP1 - DANP2	30 (x2)	52	8	279.88 us
Transferência DANP2 - DANP3	30 (x2)	53	7	344.89 us
Transferência DANP3 - DANP1	30 (x2)	60	0	276.01 us

Tabela 6.8: Resultados com cenário de falha na LAN B

Como não existe nenhum tráfego de fundo nesse caso na rede é possível notar que as latências médias dos pacotes estão dentro dos requisitos da norma IEC 61850 para este tipo de mensagens. A Figura 6.22 recompila os resultados obtidos.

Com base nos resultados obtidos, a combinação de PRP com RSTP apesar de oferecer maior disponibilidade, ainda tem perda de pacotes ante falha na comunicação devido ao

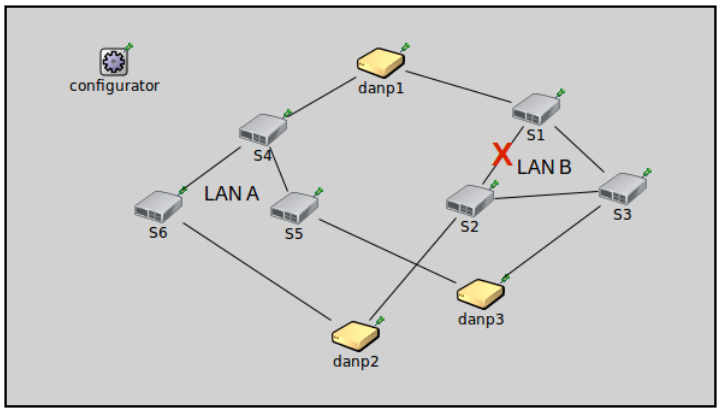
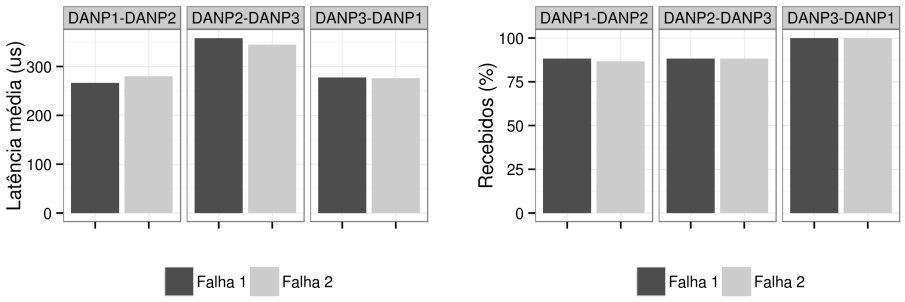


Figura 6.21: Falha em enlace da rede B



(a) Latência (b) Dados recebidos

Figura 6.22: Latência e pacotes recebidos em DANPs

seu tempo de detecção e recuperação. O importante dessa dupla implementação é que mesmo com a perda de alguns pacotes em uma das redes, PRP garante a recepção de pelo menos uma das mensagens enviadas pela origem.

Neste Capítulo foram apresentadas as modelagens e simulações básicas dos módulos desenvolvidos para OMNET++ que permitem simular e avaliar os tempos de latência na transferência de informações existente em um SAS. Dispositivos como IEDs, MUs e *switches* foram criados com a reutilização de módulos existentes na plataforma de simulação, e com a criação de outros novos que representam funcionalidades de camadas e protocolos. Além disso, foi introduzida a modelagem de um *Dual Attached Node PRP* (DANP), dispositivo compatível com o *Parallel Redundancy Protocol* (PRP) que oferece um mecanismo de redundância em camadas inferiores. No seguinte Capítulo são apresentadas as simulações de algumas situações mais dinâmicas de SASs de modo a ver em funcionamento a modelagem desenvolvida.

Capítulo 7

Testes e resultados

De modo geral, na literatura são modelados diferentes cenários limitando o *broadcast* mediante uso de VLANs por vão de ação. No entanto, quando uma subestação vai receber um novo segmento, uma atualização ou uma outra expansão que precise a incorporação de mais dispositivos, costumam ser conectados dispositivos em elementos já existentes e de outras vãos ou zonas para capturar informações ou aproveitar portas livres dos *switches*. A ideia das simulações realizadas no presente trabalho foi ver o comportamento da modelagem proposta para simular o impacto em cenários futuros e atuais os quais já implementam IEC 61850 de modo a detectar possíveis inundações nas redes devido a *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) ou *Merging Unit*s (MUs).

Para a simular topologias de rede anel, estrela e anel-estrela foi usada a modelagem explicada no capítulo anterior. Os módulos *Subestação* e *Zona* foram configurados dinamicamente com vários parâmetros para representar diferentes situações. Como parâmetros base de comparação foi reproduzida a falha na rede elétrica implementada em Sidhu et. al. [5], descrita no Capítulo anterior, para três topologias: Estrela, Anel e Híbrida. A tabela 7.1 resume as simulações realizadas.

O objetivo principal destas simulações foi ver o impacto gerado pelas MUs localizadas em diferentes vãos, na latência das mensagens *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e *Sampled Value* (SV).

7.1 Descrição dos experimentos

Objetivou-se medir os tempos de latência de mensagens GOOSE enviadas pelos IEDs e das SVs enviadas pelas MUs em três topologias comumente usadas em Sistema de Automação

de Subestação (SAS): Anel, Estrela e híbrida Anel-Estrela. Para cada topologia avaliada foram recriados vários casos os quais variam o número de dispositivos conectados aos *switches* e o número de zonas conectadas ao *switch* principal da rede da subestação. O fluxo de informação foi dado entre as VLANs, as quais tinham dispositivos em diferentes vãos. A Tabela 7.1 resume os parâmetros das simulações:

Largura de banda	10, 100 Mbps
Uso de Prioridades	*false, true*
Número de zonas	1-5
IEDs de proteção por zona	2
IEDs disjuntor por zona	2
Número de MU por zona	1-4
Taxa de amostragem MU	960,1920,4800 amostras/s
Duração das simulações	31 segundos
Repetições	30

Tabela 7.1: Parâmetros das simulações para cada topologia

Segundo a Tabela 7.1 estimou-se a quantidade de execuções, em OMNET++ para cada topologia, dada pela multiplicação do número de opções de cada parâmetro, $n_E = n_{LB} * n_P * n_Z * n_{MU} * n_T * n_I = 7200$. O número de repetições significa o número de vezes que é simulada uma configuração, isto é para ter dados suficientes para o cálculo de valores máximos e de médias, para o caso, com um intervalo de confiança de 95%.

Em cada simulação, cada zona é um segmento de rede separado por redes LAN virtuais suportadas nos *switches*. Em **condições normais**, os IEDs de controle enviavam mensagens GOOSE em intervalos de 1 segundo aos IEDs disjuntores, estes últimos cada vez que recebiam uma mensagem GOOSE respondiam com uma outra. As MUs enviavam SVs aos IEDs de proteção da zona, por meio de mensagens *multicast*, em intervalos de tempo dados pelo parâmetro de taxa de amostragem (960, 1920 ou 4800 amostras/s). Além disso, cada IED de proteção transmitia informações MMS ao servidor da subestação a cada 1 segundo. Os *switches* estavam configurados com um tempo de processamento por quadro de 10 microssegundos e, o enlaces de comunicação seguiam as características de conexões de fibra ótica, portanto, atribuiu-se um tempo de transferência de 50 ns. Por fim, os geradores de tráfego de fundo, (*IPBurts*), de cada IED enviavam mensagens de 50 KB ao servidor em instantes aleatórios. Em **condição anormal**, dada pela simulação de uma falha na rede elétrica, o IED de controle 1 da zona 1 aumentou a taxa de envio de mensagens GOOSE aos IEDs disjuntores subscritos em todas as zonas até o sistema se estabilizar novamente, voltando à condição normal.

Após iniciada cada simulação, precisou-se esperar que a configuração de OMNET++ da rede e dos módulos usados estivesse pronta. Para garantir que as conexões e o com-

portamento da rede está estável, a ativação dos geradores de tráfego foi realizada aos 10 segundos e não foi desativada até o fim da simulação. Durante a simulação foram obtidas as estatísticas que permitiram medir os tempos de latência média e máxima nas mensagens GOOSE recebidas nos IEDs disjuntores, e as SVs nos IEDs de controle para avaliar se cada topologia atende os requisitos da Norma. A Figura 7.1 mostra a ativação dos

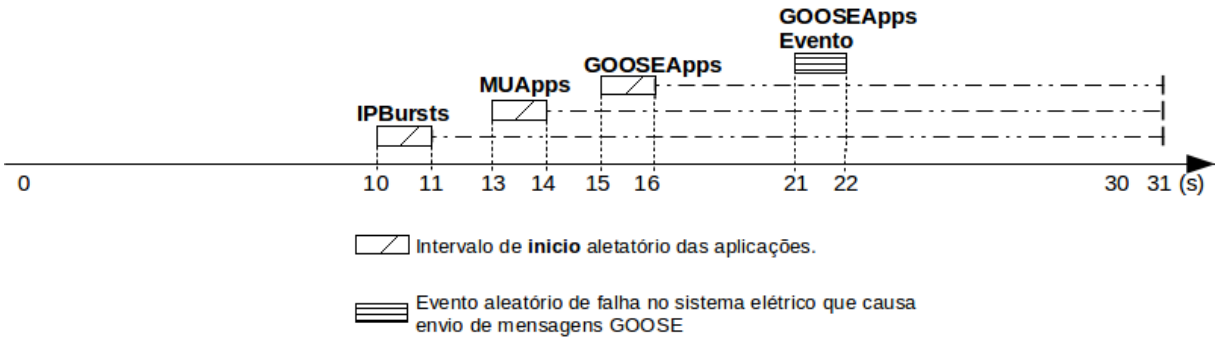


Figura 7.1: Linha de tempo das simulações - Cenários 1, 2 e 3

eventos durante cada rodada. Após OMNET++ inicializar os dispositivos e protocolos padrão para a simulação, entre os 10 e os 11 segundos, as aplicações geradoras de tráfego de fundo foram ativadas cada uma em um momento diferente desse intervalo. Entre os 13 e 14 segundos as MUs iniciaram o envio de mensagens SVs aos seus correspondentes destinos com a taxa de amostragem configurada. Da mesma forma, entre os 15 e 16 segundos as aplicações *GOOSEApp* presentes nos IEDs começaram o envio com taxa constante de mensagens. Essas aplicações (*IPBurst*, *MUApp*, e *GOOSEApp*) depois de serem iniciadas, ficaram ativas até o final da simulação. Por fim, entre os segundos 21 e 22 foi simulada a falha no sistema elétrico (condição anormal) ocasionando o aumento na taxa de envio do IEDs de controle da zona 1 até estabilizar de novo. Os três cenários das topologias em questão obedeceram esse comportamento durante cada rodada da simulação.

7.1.1 Cenário #1 - Estrela

Este cenário simulou o comportamento da rede de comunicação de um SAS conectando em **estrela** o *switch* principal (SW) da subestação com os *switches* das vãos (zonas) (SW1, SW2, ..., SWZ), e estrela para conectar os dispositivos pertencentes a cada vão com seu respectivo *switch*. A Figura 7.2 ilustra este cenário. Cada zona tinha inicialmente 2 IEDs disjuntores, 2 IEDs de control e 1 MU. O tráfego foi dividido em duas VLANs às quais pertenciam dispositivos de diferentes zonas. A VLAN *a* (Cinza na figura) estava conformada por 1 IED de controle de cada zona e 1 disjuntor, assim como 1 MU. De

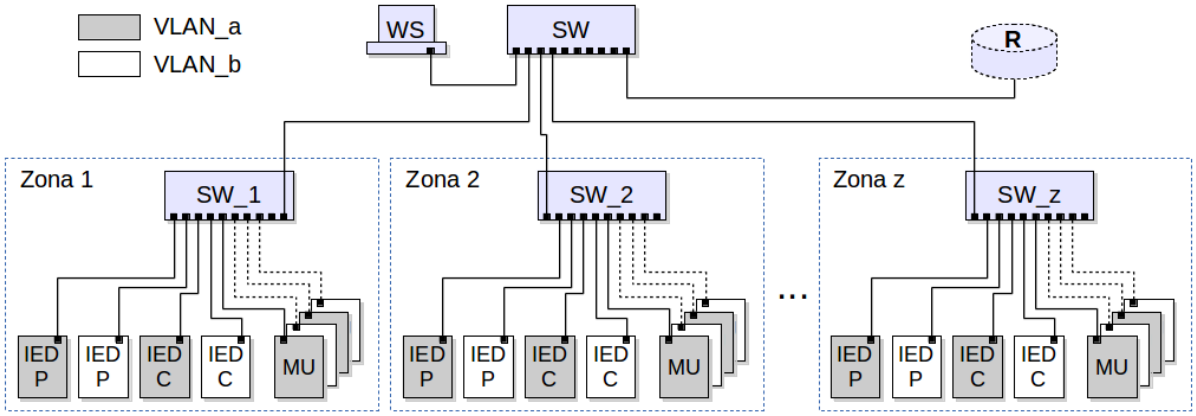


Figura 7.2: Cenário com topologia Estrela-Estrela

forma similar, a VLAN *b* (Branco na figura) possuía dispositivos espalhados pelas diferentes zonas. Após simular de acordo aos parâmetros da Tabela 7.1, foram conectadas gradualmente 2, 3 e 4 MUs para analisar o impacto delas na rede em transmissões entre as zonas.

7.1.2 Cenário #2 - Anel

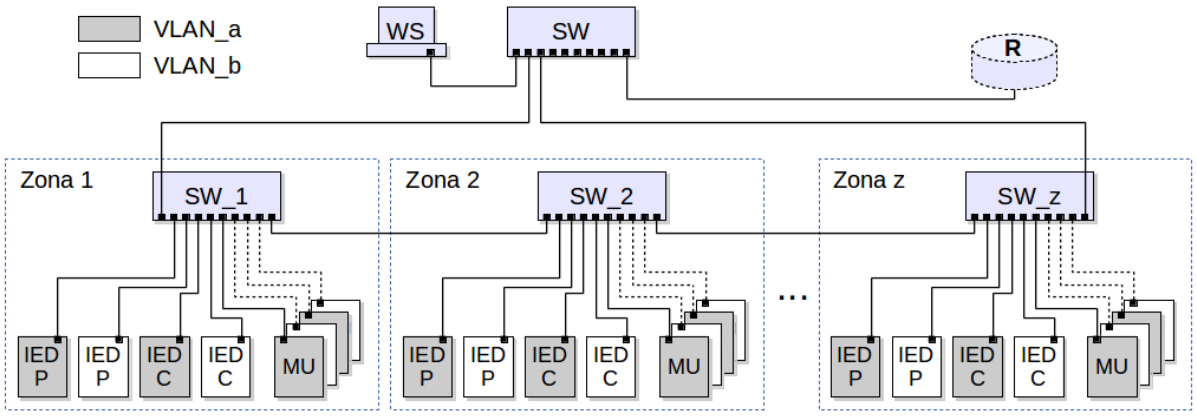


Figura 7.3: Cenário com topologia Anel-Estrela

De forma similar ao cenário #1, este cenário simulou o comportamento da rede de comunicação de um SAS usando a topologia **anel** para conectar o *switch* principal (SW) da subestação com os *switches* das vãos(SW1, SW2, ..., SWZ), e a topologia estrela para conectar os dispositivos ao *switch* do vão. Criaram-se as mesmas redes virtuais e o tráfego *multicast* entre os dispositivos correspondentes. A Figura 7.3 mostra as configuração das

topologia.

7.1.3 Cenário #3 - Híbrida

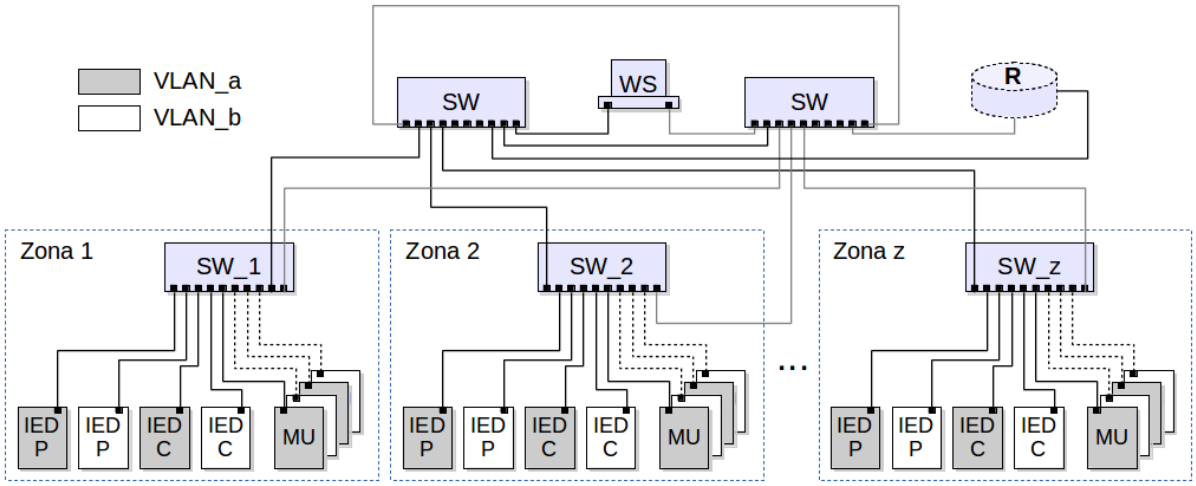


Figura 7.4: Cenário com topologia Malha-Estrela

Por fim o último cenário simulou o comportamento da rede de comunicação de um SAS usando topologia híbrida de **anel-estrela**. Foram usados dois *switches* na estação (primário e secundário) conectados em anel, aos quais foram conectados em estrela os *switches* dos vãos. Os dispositivos de cada vão foram interligados em estrela ao *switch* correspondente. A Figura 7.4 ilustra esse cenário.

7.2 Resultados das simulações

Os três cenários propostos foram simulados com enlaces de comunicação de 10 Mbps e 100 Mbps. Descartaram-se os resultados sem uso de prioridade pois os valores obtidos superaram o limite permitido pela norma (3 ms) segundo suas classes de desempenho P2/3, e porque a Norma a partir da última revisão exige o uso de prioridades para estas mensagens críticas. Nos seguintes gráficos são apresentados os tempos de latência média (intervalo de confiança de 95%) de mensagens GOOSE em IEDs disjuntores, assim como de mensagens SV em IEDs de controle. Foram incrementadas de 1 até 4 o número de zonas conectadas ao *switch* principal da subestação, variando também o número de MUs entre 1 e 4 em cada vão.

7.2.1 Enlaces de 10Mbps

Os enlaces de 10 Mbps, apesar de não ser recomendados, ainda são encontrados em SAS com dispositivos legados, devido a isto e com a intenção de visualizar seu comportamento foram realizadas as simulações levando em consideração essas condições. Nas Figuras 7.5, 7.6 e 7.7 são registrados os resultados para os casos entre 2 e 5 zonas para as três topologias.

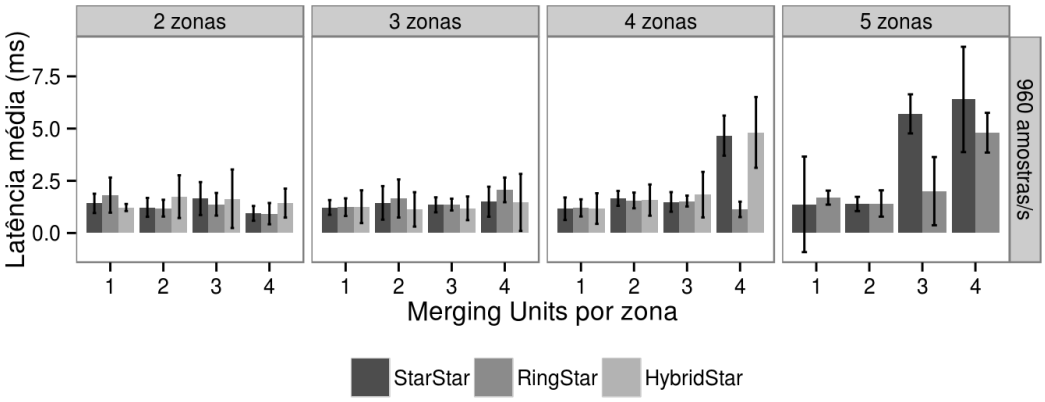


Figura 7.5: Latência média de GOOSE em IEDs disjuntores - 10Mbps e 960a/s

Segundo a Figura 7.5, quando as MUs transmitem 960 amostras/s foi possível suportar até 3 dispositivos e uma vão para que as mensagens GOOSE estivessem dentro dos limites permitidos pela Norma IEC 61850. Quando o número de zonas foi 4 o limite permitido foi ultrapassado em topologias estrela e híbrida conectando 4 MUs em cada zona. Isto é, os IEDs disjuntores não receberam as mensagens nos tempos permitidos ou as mensagens foram perdidas nas filas de transmissão dos *switches*. No caso de 5 zonas, a topologia híbrida perdeu seus pacotes durante a transmissão possivelmente nas filas dos *switches*.

Quando usada uma amostragem de 1920 amostras/s (Figura 7.6), com 2 zonas suportaram-se as 4 MUs dentro dos tempos permitidos pela norma, mas para 3 zonas, as topologias anel e estrela ultrapassaram o limite permitido de 3 ms e, na topologia híbrida, apresentou-se uma saturação nas filas dos *switches* que causaram com que as mensagens fossem descartadas e não se registrara nenhuma nos destinos. De forma similar com 4 zonas já as mensagens começaram a ser descartadas a partir de 3 MUs. O que quer dizer que o *switch* não conseguiu transmitir o suficientemente rápido as mensagens GOOSE que recebia dada sua taxa de transmissão (10 Mbps).

Amostrando a uma taxa de 4800 amostras por segundo (Figura 7.7) a inundação dos

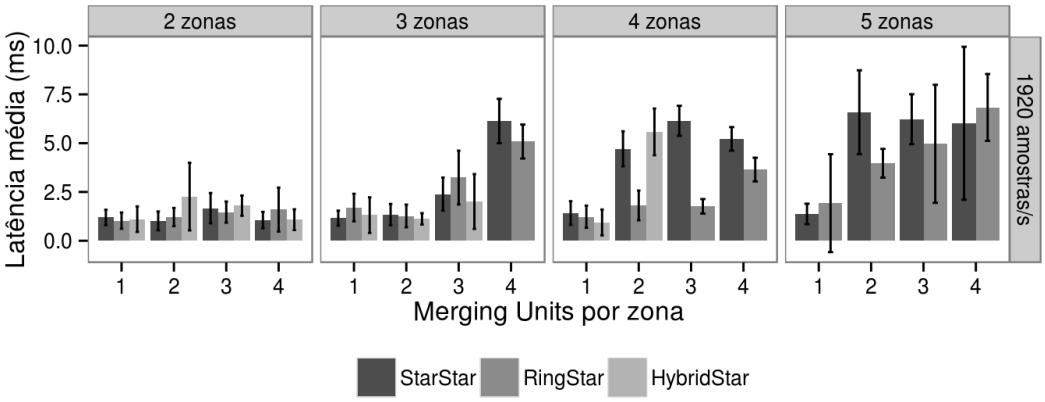


Figura 7.6: Latência média de GOOSE em IEDs disjuntores - 10Mbps e 1920a/s

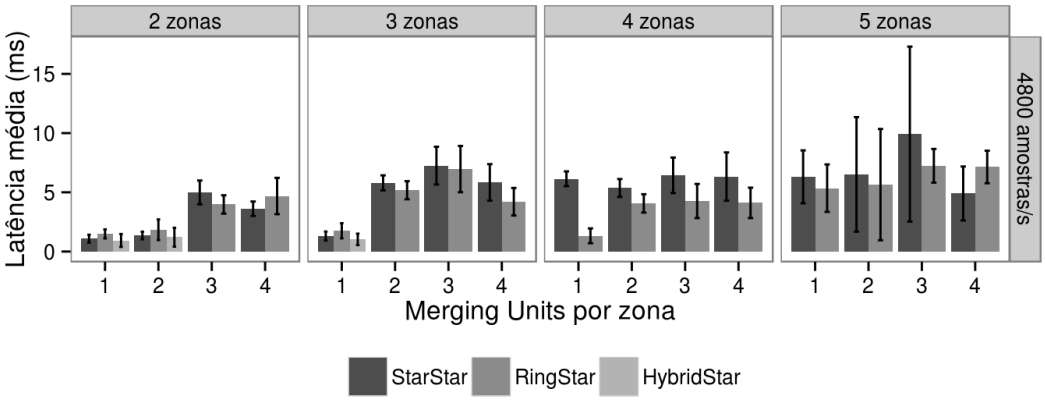


Figura 7.7: Latência média de GOOSE em IEDs disjuntores - 10Mbps e 4800a/s

segmentos de rede, principalmente das filas de transmissão dos *switches* começou a ter inconvenientes com 3 MUs em 2 zonas, mesmo usando classificação segundo sua prioridade. Conectando 3 zonas só suportou 1 MU em cada uma para alcançar os tempos de latência permitidos pela Norma nas mensagens GOOSE.

De maneira similar às GOOSE nos IEDs disjuntores são apresentadas, nas Figuras 7.8, 7.9 e 7.10, as latências medidas das SVs nos IEDs de controle para os cenários com as três topologias.

Quando usada uma taxa de 960 amostras/segundo nas MUs apresentou-se a situação similar das mensagens GOOSE nas SVs: em 5 zonas os *switches* na topologia híbrida não conseguiram transmitir as mensagens aos destinos e foram descartadas nas filas de saída devido a sua taxa de transmissão (10 Mbps).

De acordo com a Figura 7.6, conectando 4 MUs por *switch* em cada zona e amostrando

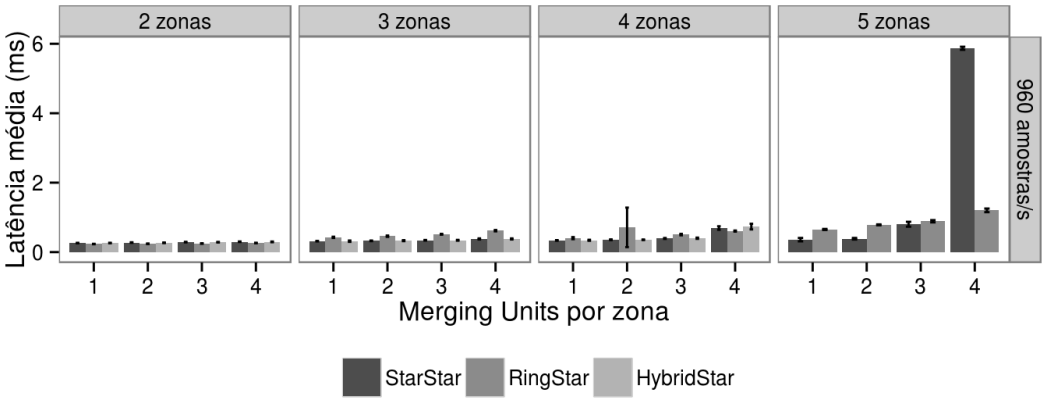


Figura 7.8: Latência média de SV em IEDs de controle - 10Mbps e 960a/s

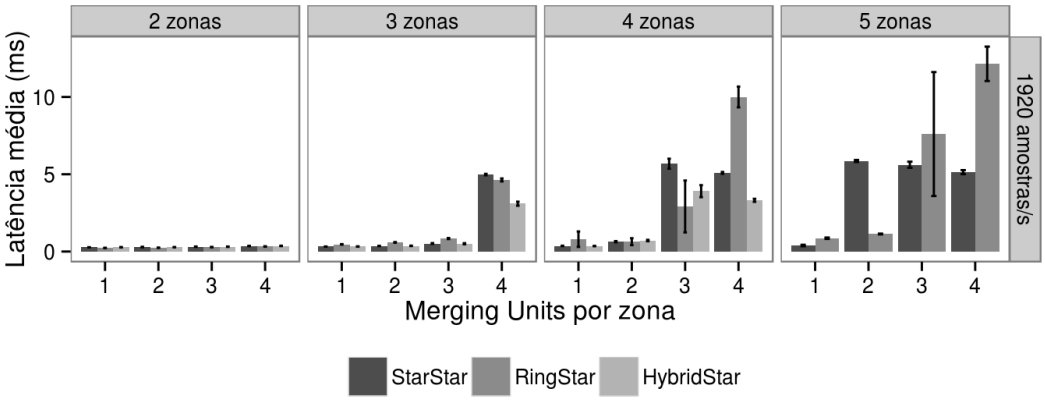


Figura 7.9: Latência média de SV em IEDs de controle - 10Mbps e 1920a/s

a 1920 a/s, a latência das SVs ultrapassaram o limite permitido nas três topologias estudadas. Quando conectadas 5 zonas á rede da subestação, para essa taxa, a topologia híbrida não registrou a recepção das mensagens enviadas pelas MUs.

De forma similar às GOOSE lidas nos IEDs disjuntores, a latência das mensagens SV recebidas pelos IEDs de controle, para 4800 amostras por segundo, superaram os 3 ms a partir de 3 MUs com 2 zonas. Quando usadas 5 zonas os *switches* não conseguiram transmitir a uma taxa suficiente e suas filas foram lotadas, ocasionando a perda de pacotes.

7.2.2 Enlaces de 100Mbps

Simulando canais de comunicação de fibra de 100Mbps, os resultados obtidos apresentaram melhor comportamento. As Figuras 7.11, 7.12 e 7.13 resumem os resultados das latências nas mensagens GOOSE recebidas nos IEDs disjuntores. De forma similar, as Figuras 7.11,

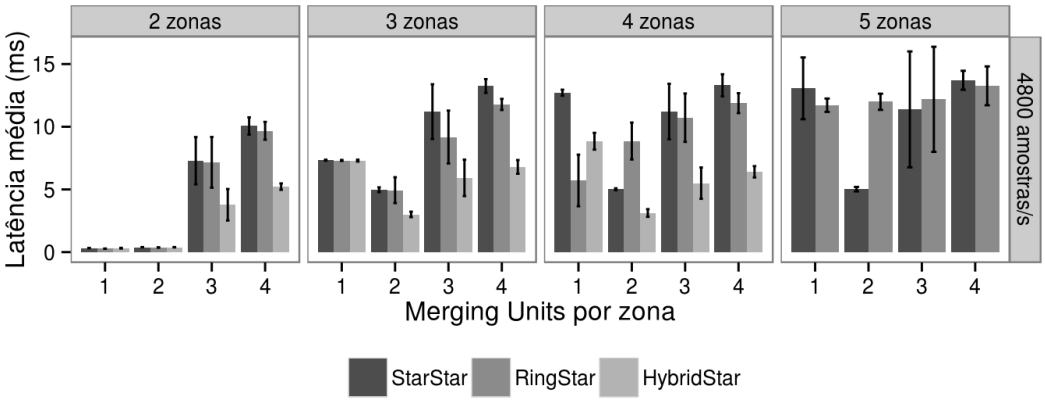


Figura 7.10: Latência média de SV em IEDs de controle - 10Mbps e 4800a/s

7.12 e 7.13 ilustram as latências das mensagens SVs nos IEDs de controle.

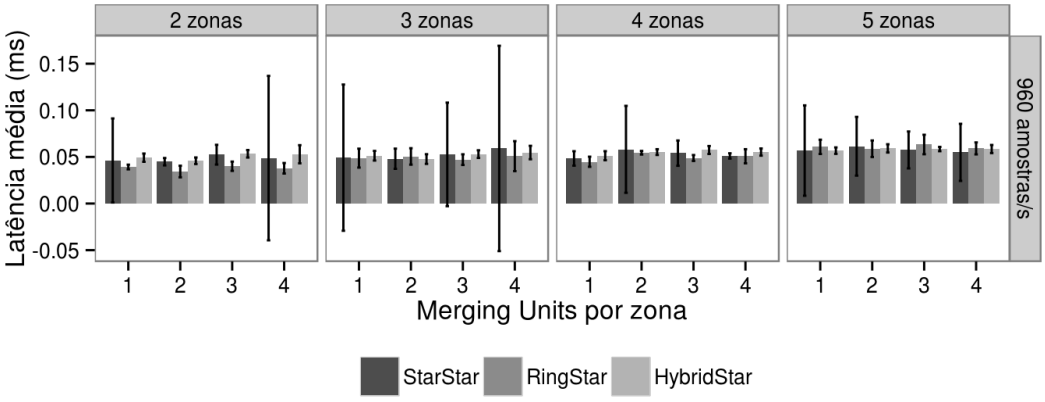


Figura 7.11: Latência média de GOOSE em IEDs disjuntores - 100Mbps e 960a/s

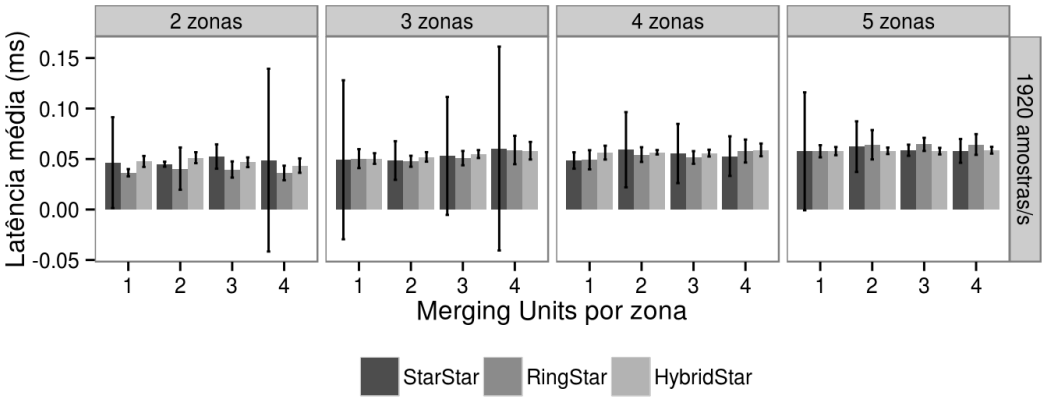


Figura 7.12: Latência média de GOOSE em IEDs disjuntores - 100Mbps e 1920a/s

Para uma taxa de 960 e de 1920 amostras por segundo nas MUs, nas Figuras 7.11

e 7.12, percebe-se que a latência em mensagens GOOSE recebidas em IEDs disjuntores atendeu os requisitos da classe de desempenho P2/3 para as três topologias com a quantidade de zonas simuladas.

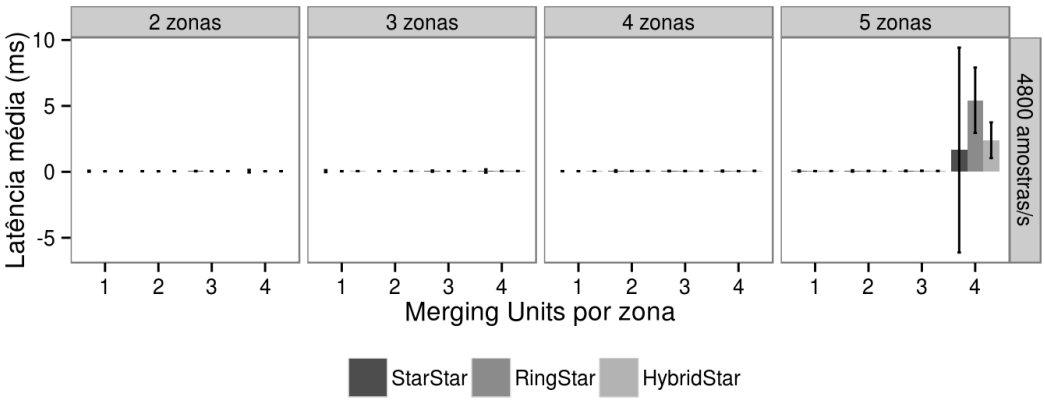


Figura 7.13: Latência média de GOOSE em IEDs disjuntores - 100Mbps e 4800a/s

Quando usadas 5 zonas, a partir de 4 MUs (Figura 7.13) ultrapassou-se o limite pela topologia anel, mas para as topologias estrela e híbrida, ainda foi tolerável e as mensagens GOOSE chegaram no intervalo de tempo válido.

De forma similar, as latências medidas das mensagens SVs nos IEDs de controle (Figuras 7.14, 7.15 e 7.16) estiveram dentro do limite permitido pela Norma IEC 61850. Apresentou-se o caso com 5 zonas, 4 MUs e taxa de 4800 amostras por segundo, que o tempo de latência incrementou significativamente com relação às outras quantidades de zonas, mas não chegou a ultrapassar os 3 milissegundos.

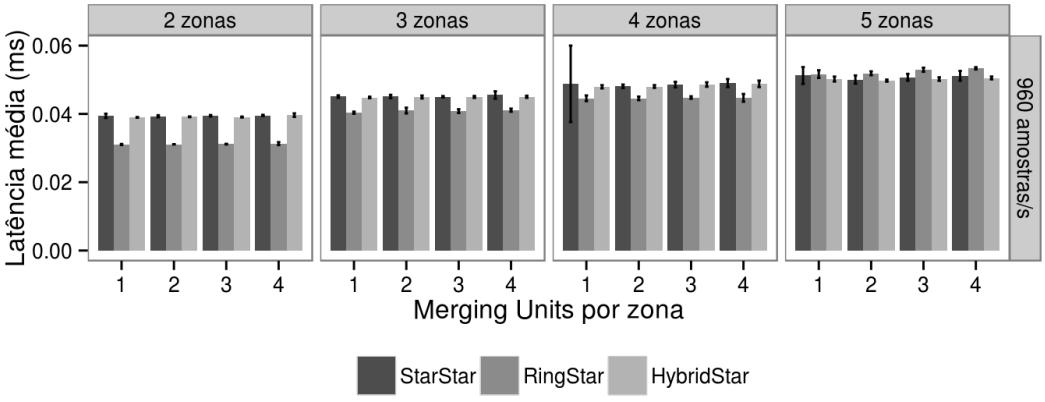


Figura 7.14: Latência média de SV em IEDs de controle - 100Mbps e 960a/s

Neste Capítulo foi utilizada a modelagem realizada para simular vários cenários de

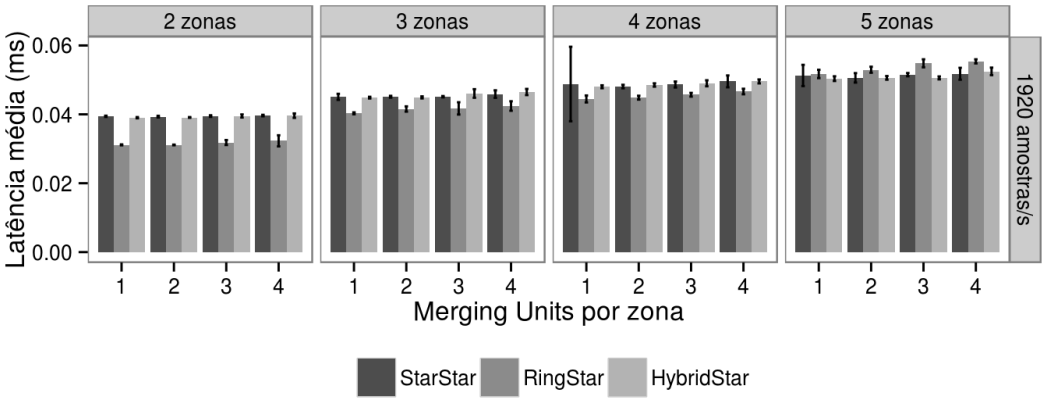


Figura 7.15: Latência média de SV em IEDs de controle - 100Mbps e 1920a/s

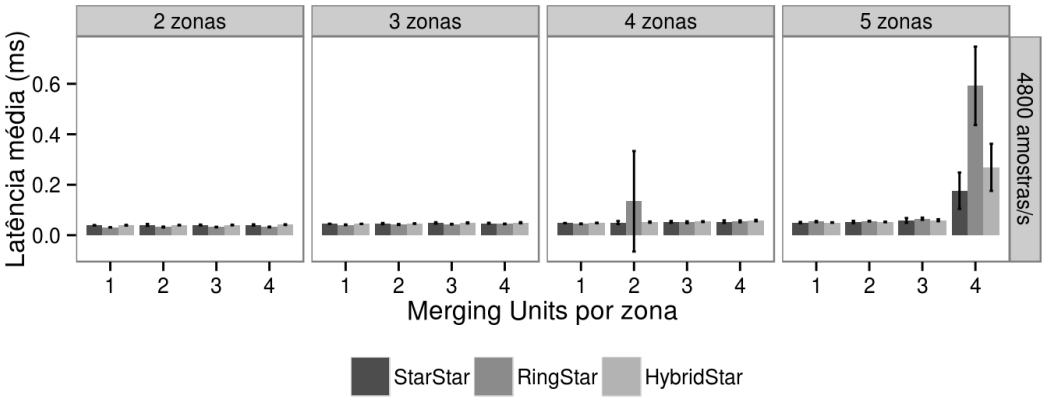


Figura 7.16: Latência média de SV em IEDs de controle - 100Mbps e 4800a/s

Sistema de Automação de Subestação (SAS) com as topologias anel, estrela e híbrida. Recriou-se a falha no sistema elétrico de [5] para visualizar o impacto ocasionado pela adição de MUs a um sistema de comunicação de um SAS. Foram medidas as latências de mensagens GOOSE e SV em IEDs disjuntores e IEDs de controle, respetivamente, para analisar a capacidade das topologias estudadas.

Capítulo 8

Conclusões

A implementação de uma nova subestação não inclui as restrições ocasionadas pela mistura com elementos legados. No entanto, quando o que se precisa é expandir uma subestação e seu Sistema de Automação de Subestação (SAS), devido a um aumento na demanda de energia elétrica, apresentam-se desafios causados pelos dispositivos e tecnologias existentes que fazem com que a projeção dessa expansão considere o impacto do sistema antigo na parte nova, e vice-versa. Quando iniciada essa incorporação de novos *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) e *Merging Unit* (MU) a sistemas existentes, em SAS compatíveis com a Norma IEC 61850 que possuam os barramentos de de estação e processo na mesma rede de comunicação, é necessário dimensionar o perfil de tráfego e a capacidade que terá o sistema completo resultante. Atualmente, não existe um procedimento padrão para incorporar segmentos novos a um SAS existente, as concessionárias deixam a *liberdade* aos fornecedores, os quais fazem suas conexões segundo seu critério. Isto pode não dar certo quando se trata de uma subestação de grande porte e com um número elevado de dispositivos conectados à rede pois o novo segmento pode atender os requisitos da IEC 61850 individualmente, mas não em conjunto com os segmentos legados. É recomendado realizar uma análise de capacidade e de desempenho global que permita visualizar os possíveis impactos desses novos acoplamentos. Nesse contexto, as ferramentas de simulação facilitam recriar diferentes cenários com um custo-beneficio positivo para a empresa e para a acadêmia.

O presente trabalho desenvolveu e implementou uma proposta de modelagem de um SAS, em simulação, compatível com a Norma IEC 61850 que permite analisar a capacidade da rede de comunicação, e o atendimento das latências permitidas pela norma IEC 61850 para suas mensagens mais críticas. Para tanto, foram implementados modelos para IED, MU e *Switch Ethernet* gerenciável, os quais são dispositivos usados nos sistemas de

comunicação dos SASs. Além disso, introduziu a modelagem de um nó *Dual Attached Node PRP* (DANP) para cenários baseados na Norma IEC 61850. Esses modelos são blocos desenvolvidos para a plataforma de simulação OMNET++, que permitem a avaliação de desempenho de topologias de rede de SAS. Sabe-se que cada caso de automação de uma subestação depende das funções de proteção e controle e das condições diferentes de cada implementação, mas o presente modelo permite simular, dinamicamente, diferentes cenários de modo a obter uma análise melhor das possíveis combinações, conexões de rede e perfis de tráfego.

Os modelos desenvolvidos permitiram avaliar cenários mais variados que os revisados na literatura dada a parametrização levada a cabo e o aproveitamento de bibliotecas para a geração de números aleatórios presentes em OMNET++. Com isto é possível gerar *infinitos* perfis de geração de tráfego que ao longo das rodadas dos cenários a serem simulados, ofereçam melhor aproximação nas análise de desempenho das redes projetadas. Foi visto no Capítulo 7 como uma rodada pode apresentar comportamento excepcional com latências elevadas, por isso é importante simulações iterativa para cálculo de médias estatísticas para ter dados mais confiáveis.

Segundo os resultados obtidos nas simulações se percebe que o uso de prioridades em *switches* pertencentes a uma subestação diminui o atraso nas mensagens críticas. A separação de prioridades de mensagens *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e *Sampled Value* (SV), em principio com o mesmo valor de prioridade segundo as recomendações da norma, garante um menor atraso nas mensagens tipo 1A que são as mais críticas. No entanto a capacidade de transmissão e o tráfego de fundo gerado pelos módulos *IPBurst*, pode afetar as latências das mensagens com prioridade maior devido a que se inicia a transmissão de um pacote grande de dados em ausência de um pacote prioritário na fila de saída de um *switch*, o pacote prioritário esperará até o pacote grande ser enviado [47].

Existe uma incerteza quando usados protocolos como *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP) em topologias não determinísticas, como o caso da híbrida, pois os caminhos lógicos de transmissão da informação variam de cenário em cenário dependendo do *switch* raiz. Recentes protocolos como *Parallel Redundancy Protocol* (PRP),*High-availability Seamless Redundancy* (HSR) e *Media Redundancy Protocol* (MRP) podem aproveitar as condições determinísticas de topologias simples como anel e estrela, adicionando capacidades de redundância, em alguns casos, invisíveis aos nós.

A comparação da modelagem e os resultados obtidos com publicações da literatura

como Sidhu *et al.* [5] e Juarez *et al.* [14] permitiu visualizar que as ferramentas de simulação de eventos discretos apesar te terem comportamentos diferentes internamente, os resultados gerados são similares e coerentes. No entanto, a parametrização das simulações diferenciam os resultados consideravelmente. Isto foi percebido, por exemplo, com a ativação dos geradores de tráfego, que com tempos de inicio aleatoriamente diferentes, os resultados obtidos permitiram um panorama maior, ao contrario das simulações realizadas na literatura, pois os geradores eram iniciados nos mesmos instantes de tempo durante as iterações, ocasionando dados medianamente constantes, mas convenientes nas análises realizadas.

Mostrou-se que a plataforma OMNET++ é uma ferramenta capaz de representar diferentes entornos que permitam simular as redes de comunicação em sistemas de automação, além disso, os presentes desenvolvimentos permitirão analisar diferentes entornos e implementar novos modelos para verificar os requisitos de latência em IEDs e MUs na troca de informações internamente nas subestações e, segundo as recentes especificações da norma, entre subestações.

Usando o desenvolvimento do presento trabalho, futuros desenvolvimentos permitirão, por exemplo, avaliar diferentes mecanismos de enfileiramento de pacotes nos dispositivos fundamentais como os *switch* industriais, além de motivar a inclusão de técnicas de enfileiramento também em IEDs ou MUs, para diminuir as latências de mensagens GOOSE e as SVs desde a própria origem. Além disso, novos desenvolvimentos e testes de técnicas de enfileiramento para sistemas baseados na norma IEC 61850 poderão ser realizados com a modificação do módulos *queue* e *CoS*.

Na camada de aplicação IED é possível modelar comportamentos de entradas analógicas e digitais mais reais de eventos de falha na rede elétrica. Assim, implementar sequencias de eventos de sistemas de proteção, controle e monitoramento, que, mediante situações aleatórias permitam representar melhor o funcionamento de uma subestação ante uma sobrecorrente, ou desfase, etc. A versatilidade de OMNET++ e o ponto de partida dado pela presente modelagem permite expandir os blocos criados para incluir mais funcionalidades.

Protocolos como Internet Group Management Protocol (IGMP) e capacidades de *IGMPSnooping* nos *swicthes* podem ser implementações importantes para complementar os módulos existentes, pois facilitariam a implementação atual de *multicast* na camada *Ethernet* e evitaria o uso de módulos adicionais para a configuração de IEEE802.1Q como o módulo *Ieee8021QConfigurator* que se encarrega de fazer essas funções manualmente.

Referências

[1] *IEC 61850 Communication Networks and Systems for Power Utility Automation*, 2010.

[2] *Industrial Communication Networks – High-availability Automation Networks*, 2010.

[3] Hirschmann, "Media redundancy concepts - high availability in industrial ethernet," Hirschmann, Tech. Rep., 2011.

[4] "Operador nacional do sistema elétrico - ons," 2013. [Online]. Available: http://www.ons.org.br

[5] T. S. Sidhu and Y. Yin, "Modelling and Simulation for Performance Evaluation of IEC61850-Based Substation Communication Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1482–1489, July 2007. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4265725

[6] "The network simulator ns-2," 2013. [Online]. Available: http://www.isi.edu/nsnam/ns/

[7] "Discrete-event simulator for internet system - ns-3," 2013. [Online]. Available: http://www.nsnam.org/

[8] "Omnet++ network simulation framework," 2013. [Online]. Available: http://www.omnetpp.org

[9] "Opnet modeler suite," 2013. [Online]. Available: http://www.opnet.com

[10] "Java," 2013. [Online]. Available: http://www.java.com

[11] M. Thomas and I. Ali, "Reliable, fast, and deterministic substation communication network architecture and its performance simulation," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 4, pp. 2364–2370, 2010. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5570104

[12] T. Sidhu and Y. Yin, "IED modelling for IEC61850 based substation automation system performance simulation," *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, p. 7 pp., 2006. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1708970

[13] S. H. Yang and H. S. Yang, "Performance Analysis of IEC 61850 based Substation," pp. 854–858, 2012.

[14] J. Juárez, C. Rodríguez-Morcillo, and J. A. Rodríguez-Mondéjar, "Simulation of IEC 61850-based substations under OMNeT++," *Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation Tools and Techniques*, 2012. [Online]. Available: http://eudl.eu/doi/10.4108/icst.simutools.2012.247730

[15] J.-c. Tan and W. Luan, "IEC 61850 based substation automation system architecture design," *Power and Energy Society General Meeting, ...*, pp. 1–6, 2011. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6039814

[16] K. Brand, C. Brunner, and W. Wimmer, "Design of IEC 61850 based Substation Automation Systems according to customer requirements," in *Cigré Technical Exhibition in Paris*, 2004, pp. 1–8.

[17] K. Lee, S. Lee, and M. Lee, "Worst Case Communication Delay of Real-Time Industrial Switched Ethernet With Multiple Levels," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1669–1676, Oct. 2006. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1705659

[18] T. Skeie, S. Johannessen, and C. Brunner, "Ethernet in substation automation," *Control Systems, IEEE*, no. June, pp. 43–51, 2002. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1003998

[19] V. C. Güngör and F. C. Lambert, "A survey on communication networks for electric system automation," *Computer Networks*, vol. 50, no. 7, pp. 877–897, May 2006. [Online]. Available: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389128606000193

[20] M. G. Kanabar and T. S. Sidhu, "Performance of IEC 61850-9-2 Process Bus and Corrective Measure for Digital Relaying," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 725–735, Apr. 2011. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5409526

[21] ——, "Reliability and availability analysis of IEC 61850 based substation communication architectures," *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1–8, 2009. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5276001

[22] CIGRE WG D2.16, "(TB315) Communications technology fundamentals for the design of modern protection and control systems, Tech. Rep. April, 2007.

[23] S. Roostaee, R. Hooshmand, and M. Ataei, "Substation Automation System Using IEC 61850," in *The 5th International Power and Optimization Conference PEOCO2011*, no. June, 2011, pp. 6–7.

[24] G. Kim and H. Lee, "A study on IEC 61850 based communication for intelligent electronic devices," in *Science and Technology, 2005. KORUS 2005. Proceedings. The 9th Russian-Korean International Symposium on.* IEEE, 2005, pp. 765–770. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1507898

[25] Y. Liang and R. H. Campbell, "Understanding and Simulating the IEC 61850 Standard," *Ieee Trans. On Power Delivery*, vol. 22, pp. 1482–1489, 2007.

[26] D. Baigent, M. Adamiak, R. Mackiewicz, and G. M. G. M. SISCO, "Iec 61850 communication networks and systems in substations: an overview for users," *SISCO Systems*, 2004.

[27] *Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*, 2002.

[28] C. M. D. Dominicis, P. Ferrari, A. Flammini, and S. Rinaldi, "Integration of Existing IEC61850-based SAS within new High-Availability Architectures," *Architecture*, 2010.

[29] S. Zimath, I. Cruz, G. Silveira, L. Marquies, and C. Dutra, "Redundancy, Time Synchronization, Synchrophasors and Process Bus in IEC61850 Edition 2," in *XI STPC Seminário Técnico de Proteção e Controle*, 2012, pp. 1–11.

[30] *IEC 60870 Telecontrol Equipment and Control*, 1990.

[31] A. Apostolov and D. Tholomier, "Impact of IEC 61850 on Power System Protection," *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, pp. 1053–1058, 2006. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4075894

[32] I. Xyngi and M. Popov, "IEC61850 overview - where protection meets communication," *10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change*, pp. P46–P46, 2010. [Online]. Available: http://link.aip.org/link/IEECPS/v2010/iCP558/pP46/s1&Agg=doi

[33] K. Trivedi, *Probability & Statistics With Reliability, Queuing And Computer Science Applications, 2Nd Ed.* Wiley India Pvt. Limited, 2008. [Online]. Available: http://books.google.com.br/books?id=h9v8KhlN8tAC

[34] G. Scheer and D. Dolezilek, "Selecting, Designing, and Installing Modern Data Networks in Electrical Substations," *... of the 9th Annual Western Power ...*, pp. 1–10, 2007. [Online]. Available: https://www.selinc.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=3481http://www.zonaeletrica.com.br/downloads/ctee/simpase2009/minicurso1/Part06ScientificComparisonofComms05_12_09.pdf

[35] L. Andersson, K.-p. Brand, C. Brunner, and W. Wimmer, "Reliability investigations for SA communication architectures based on IEC 61850," *2005 IEEE Russia Power Tech*, pp. 1–7, June 2005. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4524707

[36] A. Chen, "Requirements for Ethernet networks in substation automation," pp. 46–49, 2008.

[37] *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks.*, 2004. [Online]. Available: http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.1D-2004.pdf

[38] R. M. Michael Pustylnik, Mira Zafirovic-Vukotic, *Performance of the Rapid Spanning Tree Protocol in Ring Network Topology*, RuggedCom. [Online]. Available: http://www.ruggedcom.com/pdfs/white_papers/performance_of_rapid_spanning_tree_protocol_in_ring_network_topology.pdf

[39] RuggedCom Inc., "Latency on a Switched Ethernet Network," pp. 4–9, 2008. [Online]. Available: http://www.ruggedcom.com/pdfs/application_notes/latency_on_a_switched_ethernet_network.pdf

[40] A. Allen, *Probability, Statistics, Queueing Theory: With Computer Science Applications*, ser. Computer Science and Scientific Computing Series. Acad. Press, 1990. [Online]. Available: http://books.google.com.br/books?id=PMMUbHvr-7sC

[41] M. Vadiati, M. Asadi, B. Shahbazi, S. Farzalizadeh, M. Shariati, and M. Rassaie, "A new approach for determination of the communication buses architecture based on IEC 6180 in substation automation system," in *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. Ieee, June 2008, pp. 1023–1026. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4581337

[42] J.-C. Tournier and T. Werner, "A quantitative evaluation of IEC61850 process bus architectures," *Power and Energy Society General*, pp. 1–8, 2010. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5588205

[43] L. Zhu, N. Dong, X. Duan, J. Chen, and D. Shi, "Research on Digital Simulation Platform for Networked Substation," *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1–4, June 2007. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4275833

[44] J.-c. Tan and W. Luan, "IEC 61850 based substation automation system architecture design," *Power and Energy Society General Meeting, ...*, pp. 1–6, 2011. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6039814

[45] P. Crossley, L. Yang, A. Wen, R. Chatfield, M. Redfern, and X. Sun, "Design and performance evaluation for a protection system utilising IEC 61850-9-2 process bus," *2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, pp. 534–538, Oct. 2011. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6180459

[46] M. Kleemann and C. Rehtanz, "Concept and requirements of a simulator for substation automation systems," *Innovative Smart Grid ...*, pp. 1–6, 2010. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5638990

[47] J.-D. Decotignie, "Ethernet-Based Real-Time and Industrial Communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 6, pp. 1102–1117, June 2005. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1435741