

Joé Niehues Bett Junior

**Análise do Desempenho de Barramento de Processo de Subestações
Baseadas na Norma IEC 61850**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica e Eletrônica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de
Engenheiro Eletricista
Orientador: Prof. Dr. Diego Issicaba

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Bett Junior, Joé Niehues
Análise do Desempenho de Barramento de Processo
de Subestações Baseadas na Norma IEC 61850 / Joé
Niehues Bett Junior ; orientador, Diego Issicaba,
2018.
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. IEC 61850. 3.
Modelagem orientada a objetos. 4. Automação de
subestação. I. Issicaba, Diego. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

Joé Niehues Bett Junior

**Análise do Desempenho de Barramento de Processo de Subestações
Baseadas na Norma IEC 61850**

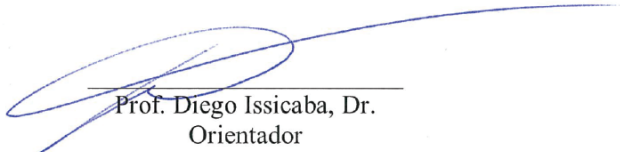
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para
obtenção do Título de Engenheiro Eletricista e aprovada em sua forma
final pelo Programa de Graduação em Engenharia Elétrica

Florianópolis, 8 de fevereiro de 2018.

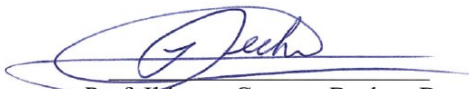


Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Coordenador do Curso

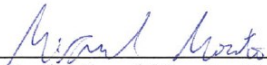
Banca Examinadora:



Prof. Diego Issicaba, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Idemar Cassana Decker, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Miguel Moreto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por todas as oportunidades que foram lançadas na minha vida até aqui.

Ao professor Diego Issicaba, por toda paciência, confiança e facilidade de trabalhar junto, digna de grande admiração.

Ao Hector de la Hoz León, que, também com paciência, sanou muitas dúvidas minhas ao longo do trabalho.

A todos os amigos que fiz durante a faculdade. Sem o companheirismo de todos seria praticamente impossível atravessar essa etapa.

Por último, e não menos importante, ao meu pai, minha mãe e minha irmã, por todo apoio, exemplo e amor incondicional. É motivo de enorme felicidade lembrar de minhas origens.

RESUMO

Este trabalho tem como foco analisar o desempenho de mensagens de barramentos de processos em subestações de sistemas de potência baseadas na norma IEC-61850. A partir da modelagem realizada em (Hoz León, 2015), o tempo de atraso de mensagens em barramentos de processos de subestações é estudado para diferentes cenários a fim de obter os respectivos tempos de atraso fim-a-fim. Um estudo probabilístico também é usado junto aos resultados obtidos em simulação para auxiliar na obtenção de conclusões acerca do desempenho de barramento de processos.

Palavras-chave: IEC-61850. Modelagem orientada à objetos. Automação de Subestação.

ABSTRACT

This work uses the fundamentals of the IEC-61850 standard to do an analysis of the temporal requirements of process bus, based on what is modeled in the standard. From the model of (Hoz León, 2015), the delay time of messages that compose the process bus is studied here in different scenarios in order to obtain their respective end-to-end delay time in theoretical situations. A probabilistic study is also devised in order to assist the performance analysis.

Keywords: IEC-61850. Object-oriented modeling. Substation automation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Arquitetura de SAS segundo IEC-61850
- Figura 2 – Organização do sistema de comunicação segundo a IEC-61850
- Figura 3 – Divisão de funções de uma SE em LNs
- Figura 4 – Hierarquia modelada pela IEC-61850
- Figura 5 – Modelo de informação da norma para o LN XCBR
- Figura 6 – Tempo de transmissão de acordo com a IEC-61850
- Figura 7 – Arquitetura do modelo OSI
- Figura 8 – Cabeçalhos dos protocolos IEEE 802.3, IEEE 802.1q e IEC-61850
- Figura 9 – Topologia em barramento
- Figura 10 – Topologia em estrela
- Figura 11 – Topologia em anel
- Figura 12 – Gestão de filas de um buffer do switch.
- Figura 13 – Dispositivos simulados que compõem um barramento
- Figura 14 – N número de barramentos conectados ao *switch*
- Figura 15 – Sequência de eventos durante uma falta com um *bay*
- Figura 16 – Tempo total de atraso fim-a-fim de canais de 10 Mbps
- Figura 17 – Tempo total de atraso fim-a-fim de canais de 100 Mbps
- Figura 18 – Probabilidade Estimada com BER (10Mbps e 1 *bay*)
- Figura 19 – Dispersão de Probabilidade (10Mbps e 1 *bay*)
- Figura 20 – Probabilidade Estimada com BER (10Mbps e 10 *bays*)
- Figura 21 – Dispersão de Probabilidade (10Mbps e 10 *bays*)
- Figura 22 – Probabilidade Estimada com BER (10Mbps e 20 *bays*)
- Figura 23 – Dispersão de Probabilidade (10Mbps e 20 *bays*)
- Figura 24 – Probabilidade Estimada com BER (100Mbps e 1 *bay*)
- Figura 25 – Dispersão de Probabilidade (100Mbps e 1 *bay*)
- Figura 26 – Probabilidade Estimada com BER (100Mbps e 10 *bays*)
- Figura 27 – Dispersão de Probabilidade (100Mbps e 10 *bays*)
- Figura 28 – Probabilidade Estimada com BER (100Mbps e 20 *bays*)
- Figura 29 – Dispersão de Probabilidade (100Mbps e 20 *bays*)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grupos de nós lógicos

Tabela 2 – Documentação do padrão IEC-61850

Tabela 3 – Classes de desempenho de mensagens

Tabela 4 – Tipo de mensagem e classe de desempenho

Tabela 5 – Definição das camadas do modelo OSI

Tabela 6 – Funções das camadas na modelagem da norma

Tabela 7 – Extensões feitas no INET

Tabela 8 – Vantagens e desvantagens da topologia de LANs em barramento

Tabela 9 – Vantagens e desvantagens da topologia de LANs em estrela

Tabela 10 – Vantagens e desvantagens da topologia de LANs em anel

Tabela 11 – Tempos de atraso de mensagens em μs ($B = 10 \text{ Mbps}$)

Tabela 12 – Tempos de atrasos das mensagens em μs ($B = 100 \text{ Mbps}$)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACSI – *Abstract Communication Service Interface*
APDU – *Application Protocol Data Unit*
ARQ – *Acknowledge Request*
BER – *Bit Error Rate*
CDC – *Common Data Classes*
CLP – *Controlador Lógico Programável*
COM – *Dispositivo de Comando de Abertura de Disjuntor*
DA – *Data Attribute*
DES – *Discrete Event Simulation*
DO – *Data Object*
EPRI – *Electric Power Research Institute*
GOOSE – *Generic Object Oriented Substation Event*
IEC – *International Electrotechnical Commission*
IED – *Intelligent Electronic Device*
IEEE – *Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos*
INTER – *Dispositivo de Intertravamento*
LAN – *Local Area network*
LD – *Logical Device*
LN – *Logical Node*
MAC – *Media Access Control*
Mbps – *Megabits por segundo*
MMS – *Manufacturing Message Specification*
MU – *Merge Unit*
NIC – *Network Interface Card*
OMNeT++ – *Objective Modular Network Testbed in C++*
OSI – *Open Systems Interconnection*
P&C – *Dispositivo de Proteção e Controle*
PHS – *Physical Device*
SAS – *Sistema de Automação de Subestação*
SCL – *System Configuration Language*
SE – *Subestação*
SEP – *Sistema Elétrico de Potência*
SMV – *Sampled Measured Values*
SV – *Sampled Values*
TC – *Transformador de Corrente*
TP – *Transformado de Potencial*
TPAA – *Two Party Application Association*
TTL – *Time Allowed to Live*
UCA – *Utility Communications Architecture*

VLAN – *Virtual LAN*

XML – *eXtensible Markup Language*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
2	A NORMA IEC-61850	20
2.1	BREVE HISTÓRIA DA NORMA	20
2.2	OBJETIVOS E COMPOSIÇÃO DA NORMA	21
2.2.1	Visão Sistêmica	21
2.2.2	Objetivos da Norma	22
2.3	MODELAGEM DA NORMA IEC-61850	27
2.4	CONCLUSÃO	31
3	O AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	34
3.1	CARACTERÍSTICAS DOS DÍSPPOSITIVOS DO BARRAMENTO DE PROCESSO	34
3.2	MODELOS DE SIMULAÇÃO	35
3.3	FORMATOS DE TRANSMISSÃO DAS MENSAGENS DO BARRAMENTO DE PROCESSOS	37
3.4	PLATAFORMAS DE SIMULAÇÃO	38
3.4.1	O Framework OMNeT++	38
3.4.2	Extensões Feitas no OMNeT++	39
3.4.3	A Modelagem do Switch	40
3.4.3.1	Local Area Network (LAN)	41
3.4.3.1.1	<i>Topologia em Barramento</i>	41
3.4.3.1.2	<i>Topologia em Estrela</i>	42
3.4.3.1.3	<i>Topologia em Anel</i>	43
3.4.3.2	Tipos de Switch	44
3.4.3.3	Modelo de Switch utilizado no OMNeT++	44

3.5	CONCLUSÃO	45
4	EXCUÇÃO DAS SIMULAÇÕES	46
4.1	ESTUDOS DE CASO	46
4.2	IMPACTO DO NÚMERO DE BARRAMENTOS CONECTADOS AO SWITCH	46
4.2.1	Análise do Desempenho Temporal das Mensagens em Diferentes Cenários	52
4.3	INFLUÊNCIA DE ERROS DE BIT	56
4.4	CONCLUSÃO	63
5	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Devido a fatores como o aumento na demanda de energia elétrica, o aumento do número de fontes geradoras e as dificuldades na expansão dos subsistemas de transmissão, um SEP pode operar no limite da sua capacidade, aumentando o risco de blecautes durante situações limítrofes de operação (De Castro, 2012). Consequentemente, é necessário que os diferentes subsistemas do SEP, em particular as subestações (SE), disponham de esquemas especiais de controle e supervisão que permitam mitigar o impacto de eventos em tempo de evitar um grande colapso do sistema elétrico de um país (Hoz León, 2015).

Neste contexto, a confiabilidade do sistema de comunicação de SEs tem um papel fundamental na busca pela operação ótima em tempo real dos SEPs. A saber, esses equipamentos se encarregam de transmitir as informações dos eventos que acontecem no SEP até os centros de controle (Skeie, 2002; Hoz León, 2015).

Ademais, ressalta-se que a integração de vários ramos de tecnologia disponíveis é necessária para auxiliar na confiabilidade de um SEP, tais como redes de comunicação de dados, tecnologia da informação e automação distribuída (Melchiori, 2011). Os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED) são um bom exemplo disso, uma vez que possuem capacidade de comunicação e integração ao Sistema de Automação de Subestações (SAS), e podem auxiliar os profissionais do SEP em várias tarefas cotidianas da operação de sistemas elétricos (Melchiori, 2011).

Diferentes protocolos de comunicação foram criados, dificultando a expansão e integração de diversos SAS uma vez que soluções alternativas necessitam ser implementadas para possibilitar a troca de informações entre protocolos distintos. Para resolver essas questões, o padrão internacional IEC-61850, Redes de Comunicação e Sistemas em Subestações, foi criado para uniformizar diversos aspectos de comunicação entre equipamentos de SEs, de acordo com suas 10 principais partes constituintes (Mackiewicz, 2006; IEC-61850, 2003; Hoz León, 2015).

A norma foi eficaz ao agregar interoperabilidade às redes de comunicação dos SAS. Uma de suas grandes contribuições foi definir o modelo de informação segregando funções específicas pertencentes aos dispositivos inteligentes de subestações. Essas funções mais simples são chamadas de Nós Lógicos (LN) e podem ser agrupadas para formar

o que a norma define como Dispositivo Lógico (LD) (Kostic, 2005; Zhao 2013, Hoz León, 2015).

Por fim, a norma estabelece os modelos de informação e os serviços de comunicação. Além disso, a IEC-61850 estabelece dois ambientes de comunicação: o barramento de estação, que habilita a comunicação entre os dispositivos de supervisão e comando, e o barramento de processos, que permite a comunicação entre dispositivos de comando e dispositivos de medição de grandezas elétricas (Hoz León, 2015).

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Em (Hoz León, 2015) foi realizado um estudo sobre o barramento de processos de SE definido na norma IEC-61850, onde o principal índice de desempenho é o tempo de transmissão fim a fim das mensagens que compõem esse barramento.

Para tal, foi implementado um ambiente de simulação em que a maioria dos componentes relevantes do barramento foram modelados e integrados a uma mesma plataforma. Foi possível simular o comportamento das mensagens provenientes dos dispositivos de controle e proteção (*Generic Object Oriented Substation Event - GOOSE*) e das mensagens oriundas de dispositivos de medição (*Sampled Measured Values - SMV*). A simulação da subestação foi testada em um laboratório a fim de comparar e validar os dados obtidos.

A simulação do trabalho supracitado foi realizada em um simulador de eventos modular orientado a objetos denominado OMNeT++ (*Objective Modular Network Testbed in C++*), o mesmo descrito em capítulos subsequentes. Esse simulador tem um comportamento modular que é aplicável ao escopo da norma IEC-61850 e permite simular um cenário coerente com o que é apresentado na norma, além de possibilitar a modelagem de um caso real envolvendo os equipamentos comumente utilizados em uma SE.

Este trabalho de conclusão de curso tem então por foco o estudo da norma IEC-61850, analisando o desempenho de mensagens que trafegam nos barramentos de processo considerando diferentes configurações no simulador desenvolvido em (Hoz León, 2015) e, como breve contribuição, a realização de uma análise probabilística dos tempos de mensagem fim-a-fim considerando a existência de perda de bits.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O trabalho em questão tem como objetivo analisar o desempenho de mensagens de barramentos de processos em subestações inteligentes de SEPs baseadas na norma IEC-61850 considerando para tanto a existência de taxa de perda de bit não nula.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos para a confecção do trabalho foram divididos em quatro etapas:

- Análise e estudo da norma IEC 61850;
- Análise e estudo do modelo de simulação para barramentos de processo desenvolvido em (Hoz León, 2015);
- Realização de estudo caso no modelo de simulação supracitado;
- Realização de uma análise probabilística de tempos e mensagem fim-a-fim considerando taxa de perda de bits.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O segundo capítulo deste trabalho apresenta aspectos principais da norma IEC-61850 com foco nos objetivos da norma, composição e modelagem envolvida.

O terceiro capítulo do trabalho apresenta a plataforma de simulação utilizada no trabalho, assim como a modelagem utilizada para se obter os resultados e todo seu embasamento.

O quarto capítulo do trabalho traz a execução do trabalho proposto, com os métodos utilizados, cenários e resultados obtidos, fomentando a conclusão dos problemas apresentados.

O quinto e último capítulo apresenta a conclusão do trabalho.

2 A NORMA IEC-61850

A norma IEC-61850 foi desenvolvida com o fim de estabelecer interoperabilidade entre IEDs de diversos fabricantes através da unificação dos modelos de comunicação entre os mesmos. Neste capítulo a norma é descrita com o objetivo de sumarizar suas características, utilidades e composição.

2.1 BREVE HISTÓRIA DA NORMA

A modernização dos SEP e sua crescente demanda motivaram o desenvolvimento tecnológico de seus elementos. Um efeito desse desenvolvimento foi a necessidade de digitalização das subestações de energia elétrica e seus componentes, de modo a aperfeiçoar a experiência de comunicação dos vários equipamentos em uma SE e construir com eficácia os SAS (Melchiori, 2011).

Um sistema de automação de subestações pode ser composto por diversos equipamentos de diversos fabricantes diferentes, tais como IEDs, Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e computadores industriais. Nas décadas passadas, a existência de regras ou normas variadas para comunicação entre equipamentos de origens diferentes culminaram com um problema de integração dentro dos SASs (Melchiori, 2011).

Dessa forma, no final da década de 80, o *Electric Power Research Institute* (EPRI) começou a trabalhar no desenvolvimento do *Utility Communications Architecture* (UCA), que seria uma das primeiras tentativas de unificação de comunicação de dados para centrais elétricas (Melchiori, 2011). A segunda versão dessa arquitetura (UCA 2.0) veio a ser publicada no ano de 1997 e expandiu o documento anterior, definindo o modelo de dados e as definições de modelos de serviços abstratos de comunicação para aplicações no SAS, além de definir dois escopos para comunicações em subestações: um para comunicação entre centros de controle e outro para comunicação entre dispositivos de campo (Hoz León, 2015).

Paralelo ao EPRI, o *International Electrotechnical Commission* (IEC) procurava padronizar as interfaces para dispositivos de telecontrole através de um conjunto de normas denominadas IEC-60870-5. Em 1994, grupos de trabalho foram formados por pessoas que trabalhavam em ambas as normas (UCA 2.0 e IEC-60870-5) para procurar estabelecer uma padronização ainda mais abrangente para redes de comunicação de dados em SAS, e que permitisse uma maior

interoperabilidade. Havendo um acordo entre a IEC e o EPRI, começou a se estabelecer a norma que seria então denominada de IEC-61850, Redes de Comunicação e Sistemas em Subestações (Rodrigues, 2005).

2.2 OBJETIVOS E COMPOSIÇÃO DA NORMA

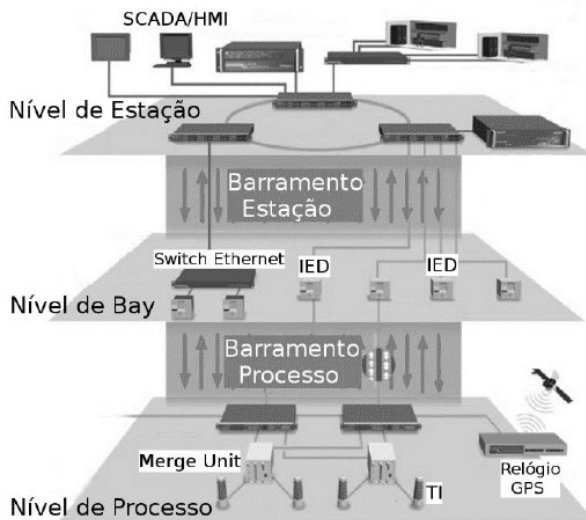
2.2.1 Visão Sistêmica

A norma IEC-61850 propõe uma divisão de rede de comunicação em uma arquitetura de dois barramentos. A divisão foi feita segundo as funções desempenhadas nos diferentes setores da subestação (IEC-61850, 2003). O barramento em setor mais elevado é chamado de **barramento de estação** e é utilizado para as operações de monitoramento e controle das subestações. É no barramento de estação onde acontece a comunicação entre os operadores da subestação (sistema supervisor) e os relés de proteção (Hoz León, 2015). O barramento em setor mais baixo é chamado de **barramento de processo** e foi planejado para substituir as tradicionais conexões cabeadas utilizadas entre os Transformadores de Instrumentação (TI) e os IEDs, diminuindo assim os custos de construção e manutenção de subestações (Moxa, 2012; Hoz León, 2015).

Conforme pode ser observado na Figura 1, a divisão da rede de comunicação em uma arquitetura de dois barramentos acarreta em uma divisão em 3 ambientes de automação de subestação (Hoz León, 2015). Descendo a ordem de hierarquia, temos primeiramente o **nível de estação** que contém o sistema de supervisão e controle de uma subestação. É desse nível que partem comandos que orientam a operação de uma subestação. Logo abaixo, através do barramento de estação, tem-se o **nível de barramento** (*bay*), que é onde se encontram os IEDs e equipamentos diversos de controle e proteção. Por último, além do barramento de processo se encontra o **nível de processo**, que compreende equipamentos de campo da subestação, como os Transformadores de Potencial (TP), Transformadores de Corrente (TC), seccionadores, disjuntores, e etc.

Tendo em vista a organização dos níveis de subestação previstos na norma, vale a pena chamar a atenção para um tipo de IED que também é previsto nesta: a **“Merge Unit”** (MU). Esse IED tem como função amostrar valores de tensão e corrente que são captados através dos TCs e TPs dos barramentos em que se encontram, e reproduzir digitalmente esses valores em taxas elevadas, totalizando

Figura 1 – Arquitetura de SAS segundo IEC-61850.



Fonte: (Moxa, 2012)

cerca de 80 amostras por ciclo para funções de proteção elétrica e cerca de 256 amostras por ciclo para funções de medição elétrica (Hoz León, 2015).

Os dados provenientes das MUs são denominados de Valores Amostrados (do inglês “*Sampled Values*” - SV), e são eles que alimentam os diversos IEDs presentes na subestação com informações em tempo real do processo físico que está acontecendo em cada ponto de medição, permitindo os diversos dispositivos de controle, comando e proteção intervirem quando necessário para a correta operação do sistema elétrico.

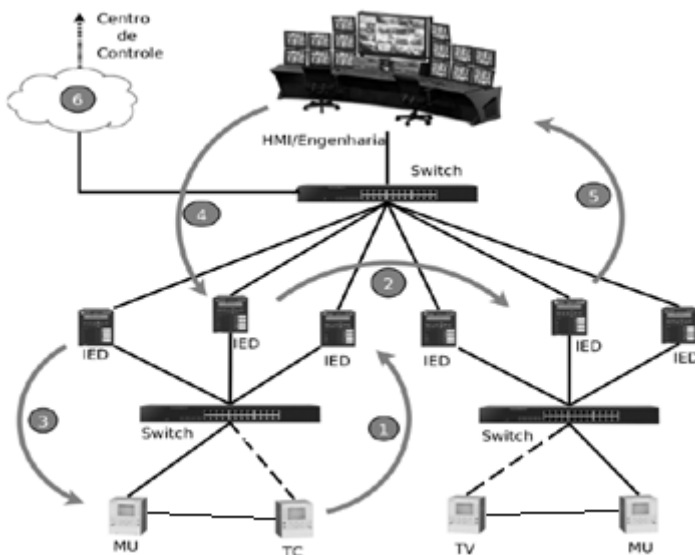
2.2.2 Objetivos da Norma

O principal objetivo da IEC-61850 é estabelecer padrões para assegurar a interoperabilidade entre diferentes IEDs de diferentes fabricantes que realizam diversas funções operativas em uma subestação de um sistema elétrico de energia (IEC-61850-5, 2003). Para atingir essa interoperabilidade, três aspectos fundamentais devem ser levados em conta: sintaxe, semântica e função distribuída. A sintaxe define que os dispositivos devem utilizar um protocolo padrão para se comunicarem em uma rede. A semântica define que os dados passados de dispositivo

para dispositivo devem ser entendidos (interpretados) entre estes. A função distribuída se refere à necessidade de vários dispositivos agirem em conjunto caso necessário (Hoz León, 2015).

Na Figura 2 são ilustradas as interfaces de comunicação definidas pela norma IEC-61850 dentro de uma arquitetura de SE, mostrando os níveis e barramentos da estrutura já citados anteriormente.

Figura 2 - Organização do sistema de comunicação segundo a norma IEC-61850.



Fonte: (IEC-61850-8, 2003)

As funções enumeradas na Figura 2 fazem parte dos SAS e são designadas para as seguintes atividades (Hoz León, 2015):

1. Envio de SV para os IEDs;
2. Troca rápida de dados de I/O para proteção e controle;
3. Processamento de sinais de controle e chaveamento;
4. Configuração do sistema e processos de engenharia;
5. Supervisão e monitoramento;
6. Comunicação com o centro de controle.

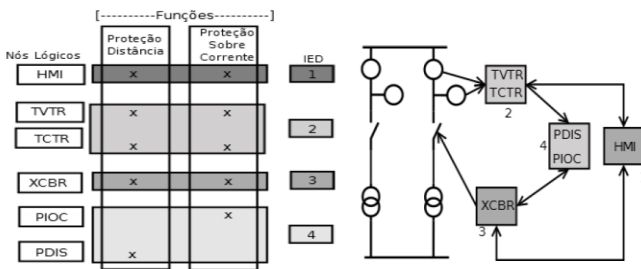
2.2.3 Composição da Norma

O documento da norma IEC-61850 está dividido em dez partes principais, de modo que a organização se dá da seguinte forma: as quatro primeiras partes tratam das terminologias utilizadas e requisitos elétricos, ambientais, de infraestrutura e de gestão de projetos, além de temas relacionados com os aspectos gerais do sistema de comunicação (Hoz León, 2015).

Na quinta parte da norma é abordada a forma de dividir e classificar as funções diversas das SEs utilizando o conceito de Nós Lógicos (do inglês “*Logical Nodes*” – LN), que é um ponto crucial da norma. Outro ponto importante abordado nesta seção da norma são os requisitos de desempenho das mensagens que compõem os sistemas de informação das SEs, e que servem como base para a avaliação de desempenho abordada neste trabalho.

A Figura 3 é apresentada na quinta parte da norma e nela é mostrada como é realizada a separação de funções em LNs e como estes são associados aos equipamentos físicos.

Figura 3 - Divisão de funções de uma SE em LNs.



Fonte: (IEC-61850-5 2003, Hoz León 2015)

A norma também explicita quais são as funções relativas às siglas mostradas, e as funções representadas pela Figura 3 anterior são as seguintes:

- HMI: Interface homem máquina;
- TVTR: Medição de tensão;
- TCTR: Medição de corrente;
- XCBR: Disjuntor;
- PIOC: Proteção de sobrecorrente;
- PDIS: Proteção de distância;

No lado esquerdo da Figura 3 tem-se duas funções executadas em SEs (Proteção de Distância e Proteção de Sobrecorrente) e cada uma foi dividida em várias funções menores (nós lógicos), estando essas funções implementadas em diversos IEDs conectados uns aos outros. Na parte direita da Figura 3 tem-se um diagrama unifilar que mostra onde os IEDs e seus respectivos nós lógicos se encontram no SAS (Hoz León, 2015).

Na sexta parte da norma, demonstra-se o processo de configuração do SAS por meio de uma linguagem própria da norma chamada SCL (*System Configuration Language*), que é baseada na linguagem XML (*eXtensible Markup Language*) (Hoz León, 2015).

A sétima parte da norma pode ser considerada a seção mais importante desta (Hoz León, 2015). Ela é dividida em quatro partes e em cada parte é discorrido um detalhe dos sistemas de comunicação do SAS. A parte 7-1 relata os modelos de informação e os princípios de comunicação recomendados pela norma. Na parte 7-2 são mostrados como funcionam os serviços de comunicação para interação das funções da SE. Esses serviços são denominados Interfaces Abstratas de Serviços de Comunicação (*Abstract Communication Service Interface - ACSI*). Na seção 7-3, através do conceito de modelagem orientada a objetos, são estabelecidas quais informações básicas comuns são contidas nos LNs, além de explicar sobre classes abstratas (conhecidas também como *Common Data Classes - CDC*) que são usadas para formar classes mais complexas que possuem informações específicas dos LNs. Por fim a parte 7-4 define os nomes e características de aproximadamente 90 nós lógicos que descrevem as funções mais fundamentais em um SAS, definindo detalhes sobre os mesmos (IEC-61850-1, 2003; Hoz León, 2015).

A categorização dos nós lógicos pode ser feita baseando-se no tipo de informação que os mesmos tratam. Sua nomenclatura é composta de quatro letras, sendo que a primeira diz respeito a qual grupo a função pertence (Melchiori, 2011). Alguns exemplos de nomenclatura de LNs são mostrados a seguir. Grupos são citados na Tabela 1.

- RREC - Religamento automático
- CSWT - Controlador de chaveamento
- MMXU - Medição operativa/indicativa
- PDIS - Proteção de distância
- XSWI - Chave seccionadora

Tabela 1 - Grupos de nós lógicos.

Grupo	Tipo de LN	Número de Elementos no Grupo
A	Controle Automático	4
C	Controle Supervisionado	4
G	Função Genérica Referenciada	3
I	Interface e Arquivamento	4
L	Sistema de Nó Lógico	2
M	Contador e Medição	7
P	Função de Proteção	27
R	Função de Proteção Relacionada	10
S	Sensores	3
T	Transformadores de Instrumento	2
X	Disjuntor/Seccionadora	2
Y	Transformador de Força	4
Z	Equipamentos Extras	14

Fonte: (IEC-61850-7, 2003; Melchiori, 2011)

Tabela 2 - Documentação do padrão IEC-61850.

Assunto	Parte	Descrição
Aspectos do Sistema	1	Introdução e Visão Geral
	2	Glossário
	3	Requisitos Gerais
	4	Gerenciamento de Sistema e Projeto
	5	Requisitos de Comunicação para Funções e Modelos de Dispositivos
Configuração	6	Linguagem de Configuração para IEDs de Subestações Elétricas (SCL)
Estrutura de Comunicação Básica para Equipamentos de Subestações e Alimentadores	7.1	Princípios e Modelos
	7.2	Serviços de Comunicação Abstratos (ACSI)
	7.3	Classes de Dados Comuns
	7.4	Classes de Nós Lógicos e de Dados Compatíveis
Mapeamento de Serviços de Comunicação Específicos	8.1	Mapeamento para MMS (ISO/IEC 9506 Parte 1 e Parte 2) e para ISO/IEC 8802-3
	9.1	Valores Amostrais sobre Enlace Serial Unidirecional <i>Multidrop</i> Ponto-a-Ponto
	9.2	Valores Amostrais sobre ISO/IEC 8802-3
Ensaio	10	Testes de Conformidade

Fonte: (IEC-61850, 2003)

Na oitava parte da norma são estabelecidos os protocolos para comunicação entre os IEDs e para transmissão de informações no SAS (Hoz León, 2015). Nesta seção da norma é descrito o protocolo MMS (*Manufacturing Message Specification*), referente a serviços de gerenciamento e configuração do sistema através das comunicações baseadas em pilhas de sete camadas. Também é apresentado o protocolo GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*), que ao invés de sete camadas usa apenas três, e se torna uma alternativa eficaz na comunicação dos SAS no que diz respeito a desempenho temporal de comunicação (Melchiori, 2011).

A nona parte é subdividida em outras duas e trata de protocolos baseados no padrão Ethernet para a transmissão de SVs, que são as mensagens produzidas pelas MUs, como descrito anteriormente (Hoz León, 2015).

Por fim a décima parte define como devem ser testados os equipamentos para verificar sua compatibilidade com a norma (Hoz León, 2015).

A Tabela 2 reúne as características das várias partes da norma.

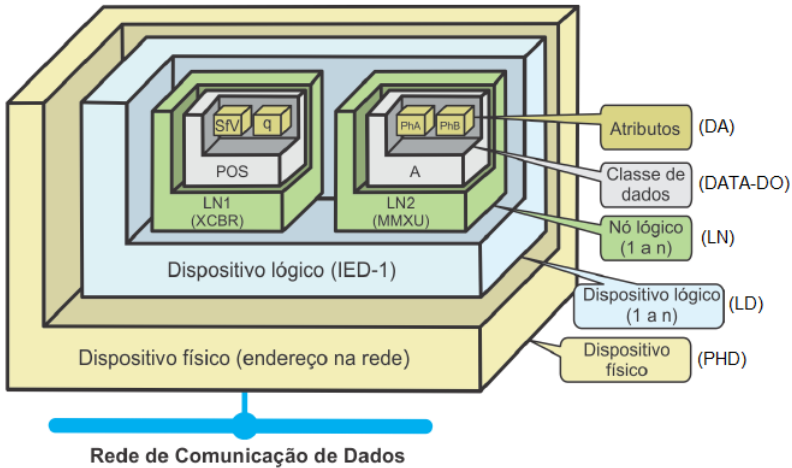
2.3 MODELAGEM DA NORMA IEC-61850

Como descrito anteriormente, a norma, através de modelagem orientada a objetos, divide as funções importantes do SAS em “partes” menores denominadas nós lógicos, que têm a capacidade de se comunicarem de forma a trocar informações necessárias à operação de SEs (IEC-61850-5, 2003; Melchiori, 2011). Desse modo, as funções atribuídas ao SAS são virtualizadas, formando uma hierarquia de classes que pode ser observada no diagrama UML disposto na Figura 4.

Na Figura 4 podemos visualizar alguns termos como Dispositivos Lógicos (do inglês “*Logical Device*” - LD) e Dispositivo Físico (do inglês “*Physical Device*” - PHD). Os LDs são conjuntos de vários LNs. Os PHDs na norma são sinônimos de IEDs. Continuando, podemos ver na hierarquia que os nós lógicos são compostos por objetos da classe **Dados** (DATA - DO), os quais possuem atributos (*DataAttribute* - DA), e são estes que armazenam os valores das informações das aplicações modeladas pelos LNs (Hoz León, 2015).

No processo de virtualização utilizado na IEC-61850, vários LNs podem conter o mesmo tipo de atributo de dados (DA) em suas funções para representar suas informações. Dessa forma são criadas as já mencionadas Classes de Dados Comuns (CDC) (IEC-61850-7, 2003).

Figura 4 - Hierarquia modelada pela IEC-61850.



Fonte: (Melchiori, 2011)

A maioria dos objetos da classe DO são do tipo CDC, fazendo com que ao mencionar um objeto DO, basta referenciar seu tipo de CDC para saber quais atributos estão compondo o objeto em questão (Hoz León, 2015).

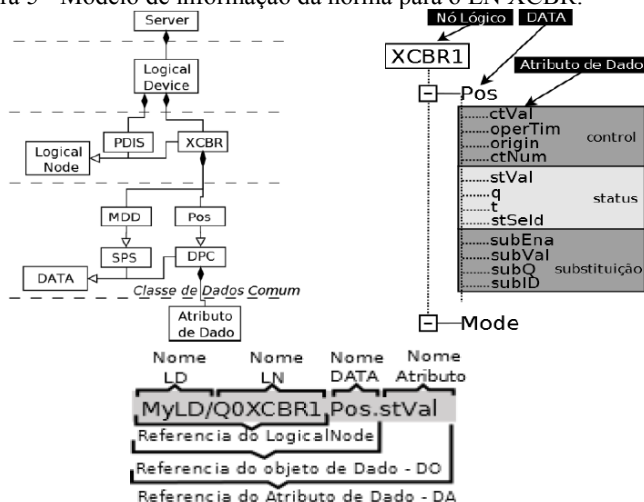
Na Figura 5 é mostrado um exemplo de relação das classes supracitadas no caso da virtualização das funções de disjuntores (*Circuit Breakers*). É possível observar variáveis de controle, monitoramento, configuração, entre outras, além do formato padronizado na norma para identificação textual dos dados do modelo de informação.

2.3.1 Serviços de Comunicação

A norma também estabelece o modelo utilizado para a comunicação de informação entre os diversos IEDs, descrita pela Interface Abstrata de Serviços de Comunicação (ACSI), conforme mencionada na parte 7-2 da IEC-61850.

Para isso, são estabelecidos dois formatos de associações de IEDs: associação bidirecional (do inglês *Two Party Application Association* - TPAA), ou cliente - servidor, e a associação por difusão (*Multicast*), também conhecida como publicador - subscritor (Hoz León, 2015).

Figura 5 - Modelo de informação da norma para o LN XCBR.



Fonte: (IEC-61850-7 2003, Hoz León 2015)

A TPAA ocorre geralmente em serviços orientados a conexão (e.g. supervisão, configuração, etc.) e a associação *Multicast* quando a troca de informações parte de um único publicador para vários destinatários (Hoz León, 2015).

Os serviços de comunicação possuem ainda três categorias: modelo de saídas, modelo de entradas e modelo para gestão online de IEDs e auto descrição. O modelo de saídas (mensagens de controle e GOOSE) deve gerar uma alteração nas funções da subestação, podendo mudar valores de estado de equipamentos da SE (IEC-61850-7 2003, Hoz León 2015). Os serviços de saída (Logs, SV, GOOSE) promovem um repasse de informação originado de um processo direto para o sistema de comunicação, e o modelo para gestão online se destinam à configuração remota dos IEDs (Hoz León, 2015).

Vale a pena ressaltar aqui o modelo de serviço GOOSE que serve como repasse de dados seguro tanto de entrada como de saída, permitindo uma transmissão de informação de eventos ocorridos na SE por comunicações do tipo *Multicast* (Hoz León, 2015).

Existe também um atributo denominado *Time Allowed to Live* (TTL - Tempo Permitido para Viver). Este atributo determina ao receptor o tempo máximo que este deve aguardar para receber a próxima mensagem. Durante um evento (ocorrência do SEP), o TTL é reduzido

abruptamente, e logo após volta a ser cada vez maior até retornar ao seu valor inicial com cada mensagem recebida. Se a mensagem subsequente não chegar até este tempo ser atingido, o receptor deve entender que houve uma interrupção na comunicação. Juntamente com outro parâmetro denominado “sequência de número” (*seqNum*), esses atributos evitam que o receptor interprete uma mensagem duplicada (IEC-61850-7, 2003; Hoz León, 2015).

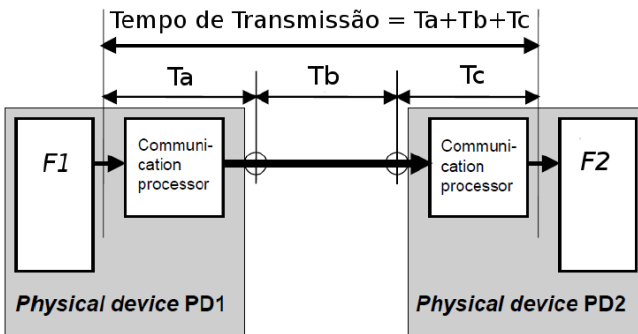
De maneira diferente, as mensagens *Sampled Values* (SV) são transmitidas de forma controlada temporalmente. Apesar de as SVs também serem transmitidas no modelo *Multicast* assim como o serviço GOOSE, essas não enviam o mesmo tipo de informação, devendo conter apenas valores de tensão e corrente à uma taxa de amostragem fixa (IEC-61850-7, 2003; Hoz León, 2015).

2.3.2 Requisitos Temporais

Como visto anteriormente, as mensagens GOOSE e SV requerem comportamentos temporais bem definidos. Dessa forma, a IEC-61850 define os requisitos temporais que as mensagens devem ter ao transitar entre os Nós Lógicos de acordo com a aplicação destas (proteção, controle, monitoramento, etc.).

A noção de tempo de transmissão estabelecida pela norma é ilustrada na Figura 6.

Figura 6 - Tempo de transmissão de acordo com a IEC-61850.



Fonte: (IEC-61850-5, 2003)

Na Figura 6 acima, o tempo de transmissão começa desde o momento em que o transmissor coloca os dados na sua fila de transmissão (T_a) até o momento que o receptor recebe os dados de sua

fila de recepção (T_c), passando pelo canal de comunicação (T_b) (IEC-61850-5, 2003).

Para lidar com os diferentes requisitos temporais utilizados em uma SE, a norma estabelece dois grupos de aplicação: as aplicações de controle e proteção (P1, P2 e P3) e as aplicações de medição e estimação de qualidade de energia (M1, M2 e M3). Essas aplicações ainda podem ser divididas em classes de desempenho de acordo com sua circunstância de aplicação (Hoz León, 2015).

Nesse âmbito, a Tabela 3 define as classes de desempenho e a Tabela 4 apresenta o tipo de mensagem contido nessas classes de acordo com a norma.

Tabela 3 - Classes de desempenho de mensagens.

Classe	Característica	Resolução por Amostra Digital (bits)	Taxa de Amostragem (amostras/s)	Aplicação
P1	Tempo de Transmissão = 10 ms	13	480	Dados de bay de distribuição secundária
P2	Tempo de Transmissão = 3 ms	16	960	Dados de bay de transmissão
P3	Tempo de Transmissão = 3 ms	18	1920	Dados de bay de transmissão com sincrofasores
M1	Medição até o 5º Harmônico	14	1500	Medição de qualidade de energia em área residencial
M2	Medição até o 13º Harmônico	16	4000	Medição de qualidade de energia em área industrial
M3	Medição até o 40º Harmônico	18	12000	Medição de qualidade de energia com sincrofasores

Fonte: (IEC-61850-5, 2003; Hoz León, 2015)

Tabela 4 - Tipo de mensagem e classe de desempenho.

Tipo de Mensagem	Classe de Desempenho	Requisito Temporal	Interface
1A - Mensagens Rápidas/Trip	P1	Tempo de Transmissão \leq 10 ms	Interface 3 e 2: Comutação de disjuntores, “Trip”, estado de disjuntores, etc.
	P2/P3	Tempo de Transmissão \leq 3 ms	
1B - Mensagens Rápidas, Outras	P1	Tempo de Transmissão \leq 100 ms	
	P2/P3	Tempo de Transmissão \leq 20 ms	
2 - Mensagens de Velocidade Média	M1, M2, M3	Tempo de Transmissão \leq 100 ms	Interface 1: Cálculo do RMS, etc.
3 - Mensagens de Velocidade Baixa	N/A	Tempo de Transmissão \leq 500 ms	Todas as Interfaces: Alarme, Medição de Grandezas não Elétricas
4 - Mensagens com dados não tratados, Raw	Ver Tabela 3, classes de desempenho M		Interface 1 e 3: Medição digital de grandezas elétricas
5 - Mensagens para configuração	N/A	Tempo de Transmissão \leq 1000 ms	Interfaces 2, 3, 4 e 6: Transferência de arquivos
6 - Mensagens para sincronização de tempo	P1	Diferença de Sincronia = \pm 1 ms	Todas as Interfaces: Sincronização de IED
	P2/P3	Diferença de Sincronia = \pm 0,1 ms	
	M1	\pm 4 us	
	M2/M3	\pm 1 us	
7 - Mensagens de Comando com Controle de Acesso	N/A	N/A	Interface 6, 4 e 3: Baseado nas mensagens tipo 3 com informação adicional para controle de acesso (senhas).

Fonte: (IEC-61850-5, 2003; Hoz León, 2015)

2.4 CONCLUSÃO

A norma IEC-61850 utiliza o artifício da modelagem orientada a objetos para criar o pilar conceitual que representa as várias funções executadas em uma subestação, que são os nós lógicos. Com cada LN representando uma atividade distinta, é possível enxergar com mais clareza todo o processo que envolve a operação de uma SE, seja durante um estado de operação seguro ou durante algum evento que possa colocar em risco o fornecimento de energia pelos agentes de operação.

Apesar de extensa e não-trivial, a norma fornece (através dos conceitos explicados de LNs, LDs, DOs, etc.) uma padronização dos modelos de comunicação entre os equipamentos distintos que são essenciais ao funcionamento de SEs e que podem ser fornecidos por diferentes fabricantes. Há décadas atrás, nos primórdios dos relés digitais, a dificuldade de comunicação entre estes devido à não padronização dos serviços de comunicação gerava conflitos e insegurança para a operação correta dos SEP.

Desse modo, a IEC-61850 surgiu com o objetivo de unificar esses serviços e estabelecer uma relação de interoperabilidade entre as máquinas de diferentes origens, sem afetar a competitividade entre as empresas e ainda trazendo alguns benefícios como a redução considerável de cabos de cobre destinados à proteção.

Além disso a norma abre ainda mais espaço para o conceito de subestações inteligentes, permitindo uma realidade cada vez mais próxima de subestações autônomas, que permitirão uma operação progressivamente mais segura e controlável, interferindo na qualidade de energia fornecida pelos SEP.

3 O AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo é descrito como foi definido o modelo desenvolvido para as simulações e como o mesmo é modelado.

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS DISPOSITIVOS DO BARRAMENTO DE PROCESSO

Segundo a norma IEC-61850, os equipamentos de subestações elétricas são categorizados de acordo com a sua localização e sua função na SE (Hoz León, 2015). Como visto anteriormente na topologia de sistemas de automação de subestação, os equipamentos que se encontram no nível de processos são responsáveis por tarefas como medição de grandezas de tensão e corrente, englobando dispositivos como TCS, TPs e *Merge Units*. Já no nível acima (nível de *Bay*) estão concentrados os dispositivos de proteção e controle que utilizam as informações geradas pelos equipamentos do nível de processos, tais como relés de proteção.

Outra forma de classificar os dispositivos presentes nas SEs, é através dos tipos de mensagens geradas e processadas por estes (Hoz León, 2015). Assim, no ambiente operacional das SEs podemos categorizar três tipos de IEDs: as “*Measurement Units*” (*Merge Units* - MU) que são capazes de gerar mensagens SV, dispositivos de proteção e controle (P&C) que podem gerar mensagens GOOSE e outros dispositivos de comando (Hoz León, 2015).

Dessa forma, pode-se estabelecer uma modelagem de equipamentos de subestações no qual apenas o barramento de processos é levado em conta, uma vez que avalia a comunicação dos equipamentos que se encontram nos níveis de *Bay* e de processos, que também é o barramento de maior interesse no quesito de desempenho temporal de comunicação, que é o foco deste trabalho.

Assim, é importante estabelecer as capacidades que os IEDs modelados possuem referente ao ambiente de comunicação aqui determinado. Os IEDs de P&C têm a capacidade de gerar e processar mensagens GOOSE, também têm a capacidade de processar mensagens SV, porém não podem gerá-las. Os IEDs do tipo MU geram as mensagens SV, mas não conseguem processá-las (Hoz León, 2015).

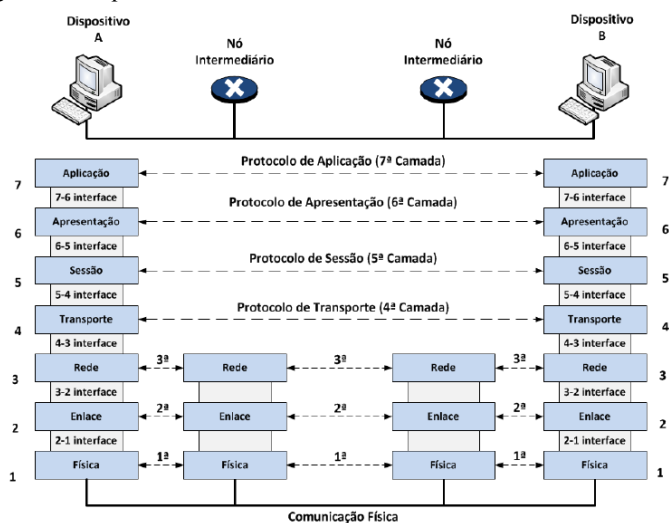
O escopo do trabalho se limita à análise temporal de mensagens trocadas no barramento de processos de acordo com a norma IEC-61850, sendo desnecessária a análise de outros aspectos técnicos como

desempenho de mensagens de baixa prioridade e funcionamento de *hardware*.

3.2 MODELOS DE SIMULAÇÃO

As mensagens de maior interesse para este trabalho que trafegam no barramento de processos de SEs segundo a norma (GOOSE e SMV) seguem o padrão IEEE 802.3 (Hoz León, 2015). Dessa forma, as estruturas usadas pelos protocolos em questão seguem o modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), que é ilustrado na Figura 7 e foi desenvolvido no final da década de 70 com o objetivo de integrar diferentes sistemas sem a necessidade de realizar mudanças nas lógicas de *hardware* e *software* destes (Forouzan, 2008; Melchiori, 2011).

Figura 7 - Arquitetura do modelo OSI.



Fonte: (Forouzan, 2008; Melchiori, 2011)

Este modelo é composto por sete camadas ordenadas e relacionadas entre si, e se caracterizam pelo processo de transferência de informações em rede. Isso acontece dentro das máquinas, onde uma camada solicita serviços das camadas inferiores e fornece serviços para as camadas superiores, e também fora das máquinas onde uma camada irá se comunicar com sua camada correspondente através de protocolos adequados através do processo *peer-to-peer* (Forouzan, 2008; Melchiori, 2011). A Tabela 5 resume as funções das camadas do modelo OSI.

Tabela 5 - Definição das camadas do modelo OSI.

Camada	Descrição
Aplicação	Fornecer uma interface para acesso aos recursos de rede, como transferência e acesso a arquivos, gerenciamento de banco de dados, e-mail, entre outros.
Apresentação	É responsável pela sintaxe e semântica das informações trocadas e conversão de dados para compatibilidade de aplicação.
Sessão	Organiza e estrutura a comunicação entre aplicações sincronizando a interação entre sistemas.
Transporte	Responsável pela entrega transparente de mensagens, corrigindo erros, averiguando fluxos de mensagens e qualidade de entrega fim-a-fim, fornecendo confiabilidade à comunicação.
Rede	Efetua o chaveamento e roteamento para organizar, estabelecer e finalizar comunicações entre os comunicadores.
Enlace	Associa as mensagens, atribui cabeçalhos devidos e assegura o transporte da mensagem, além de controlar o acesso a camada física através de processos de começo e fim de conexões, realizar endereçamento físico e controlar fluxos e erros.
Física	Provê os requisitos físicos, funcionais e processuais para ativar, manter e finalizar o fluxo de <i>bits</i> do meio físico. Define as características de comunicação

Fonte: (Kurose, 2010; Forouzan, 2008; Tanenbaum, 2003)

Apesar de o modelo OSI definir sete camadas de operação, a modelagem da norma IEC-61850 necessita de apenas três, que são as camadas de aplicação, enlace e física (Hoz León, 2015). Na Tabela 6 são destacadas as funções destas camadas no que diz respeito à modelagem do presente trabalho.

Tabela 6 - Funções das camadas na modelagem da norma.

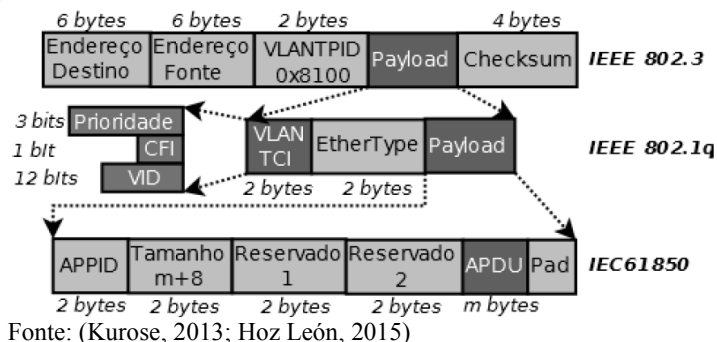
Camada	Geração	Recepção
Aplicação	Definir os elementos (e valores) que compõem a mensagem GOOSE	Analisa o conteúdo das mensagens e determina o comportamento que deve assumir o IED modelado
Enlace	(vindo da camada de aplicação) encapsulamento das mensagens em quadros (frames) com formato IEEE 802.1q	(vindo da camada física) analisa se a mensagem está realmente destinada ao IED e extrai o conteúdo da mensagem para determinar se a informação deve ser tratada pela camada de aplicação como uma mensagem SMV ou GOOSE (demux)
Física	Ligação ponto a ponto entre os IEDs da rede (IED <i>switch</i> inclusive). Definem-se parâmetros de comunicação bidirecional, tamanho dos buffers de recepção e transmissão, atrasos do canal de transmissão, taxa de erro de bits, etc.	

Fonte: (IEC-61850-8, 2003; Hoz León, 2015)

3.3 FORMATOS DE TRANSMISSÃO DAS MENSAGENS DO BARRAMENTO DE PROCESSOS

A estrutura das mensagens que trafegam nos barramentos de processo definidas na norma IEC-61850 são formatadas por esta e também pelas normas IEEE 802.3 e IEEE 802.1q (Hoz León, 2015). Dessa forma, as três normas modelam o formato de mensagens utilizados no modelo de comunicação estabelecido até aqui. A Figura 8 mostra o que cada uma dessas normas define no modelo de mensagens aqui usadas (Hoz León, 2015).

Figura 8 - Cabeçalhos dos protocolos IEEE 802.3, IEEE 802.1q e IEC-61850.



Os padrões IEEE acima mostrados possibilitam a divisão de redes locais (*Local Area Network* - LAN) em sub redes chamadas de redes virtuais (*Virtual LAN* - VLAN) (Hoz León, 2015). Além disso, as VLANs viabilizam a formação de domínios *Broadcast*, proporcionando a segmentação do tráfego de rede, i.e. apenas os dispositivos que fazem parte do mesmo domínio de *Broadcast* irão trocar mensagens entre si (Melchiori, 2011).

Desse modo, as VLANs podem melhorar ainda mais o desempenho temporal de tráfego de mensagens em sistemas de comunicação, uma vez que melhora a direcionalidade do caminho que essas mensagens percorrem (Hoz León, 2015). Outra função importante da VLAN é a possibilidade de se criar prioridades nas mensagens, função que é importante tanto no contexto da norma quanto na modelagem do SAS (Melchiori, 2011).

Este trabalho não se aprofundará nos conceitos e funções de todos campos dos cabeçalhos mostrados acima, apenas aqueles que são de

relevância maior para o entendimento geral de funcionamento do sistema modelado.

Observando a Figura 8, mais especificamente no cabeçalho IEEE 802.1q, vemos o campo *EtherType*. Este campo é responsável por identificar os protocolos de comunicação vindos de camadas superiores que são encapsulados por ele mesmo, sendo distinguidas mensagens GOOSE, SV, entre outras. É dessa forma que é possibilitada uma demultiplexação na camada de enlace, tornando a direcionalidade das mensagens mais fácil.

Ainda no cabeçalho IEEE 802.1q, vale a pena destacar o campo *VLAN TCI*, o qual possui 12 bits para identificação da própria VLAN à qual a mensagem se destina (através do sub campo VID) e três bits usado para definir a prioridade das mensagens que será utilizada na sua recepção (Hoz León, 2015).

Além de se diferenciarem pelo campo *EtherType*, as mensagens GOOSE e SV também se diferenciam pelo campo APDU (*Application Protocol Data Unit*), que traz consigo as informações propriamente ditas das mensagens (Hoz León, 2015).

3.4 PLATAFORMAS DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação deste trabalho foi feito no *framework* OMNeT++, estendendo o trabalho feito em (Hoz León, 2015). Nesta seção secundária serão abordados detalhes sobre o *framework* utilizado e as extensões utilizadas em (Hoz León, 2015) para criar o ambiente de simulação do barramento de processos definido na norma IEC-61850.

3.4.1 O *Framework* OMNeT++

O OMNeT++ é uma ferramenta de simulação de rede, baseada em módulos e caracterizada por realizar simulações por evento discreto (*Discrete Event Simulation - DES*) (Hoz León, 2015). Seus principais blocos funcionais são os módulos simples. Nestes módulos ocorrem eventos durante a simulação que ditam o funcionamento da simulação. Os módulos do OMNeT++ possuem portas (*Gates*) que permitem a comunicação entre os mesmos, podendo se formar conjuntos de módulos simples, que são denominados de módulos compostos (Hoz León, 2015).

O que permite que estes eventos ocorram são as trocas de mensagens entre os módulos simples e/ou módulos compostos. Além de poder fazer a troca de mensagens entre módulos simples ou compostos,

as mensagens podem ser direcionadas ao seu mesmo módulo de origem (*Self-message*) gerando assim outros eventos (Guerreiro, 2011; Hoz León, 2015).

Além do OMNeT++, outro *framework* é utilizado no trabalho: o INET, que é uma extensão do OMNeT++. O INET traz diversos módulos simples e compostos voltados para simulação de sistemas de comunicação baseados no modelo OSI, tais como *switches*, *host* e outros meios de comunicação (Hoz León, 2015).

Apesar dos módulos disponibilizados por ambos *frameworks*, nenhum dos dois apresentam modelos de dispositivos ou mensagens para a simulação da norma IEC-61850, e os modelos utilizados no presente trabalho foram feitos por (Hoz León, 2015).

O ambiente de simulação do OMNeT++ é construído a partir de quatro tipos de arquivos fundamentais. Primeiramente, os arquivos com extensão “.cc” são encarregados de definir o comportamento de cada módulo, como por exemplo, o que cada um faz quando recebe uma mensagem, quando eles devem enviar mensagens e também podem realizar eventos programados (Hoz León, 2015).

Os arquivos com extensão “.msg” definem o tipo de informação que contém as mensagens que são utilizadas na simulação. Nos arquivos “.ned” são estruturadas as redes nas quais as simulações são baseadas, contendo definições de como os diversos módulos são conectados (número de portas dos módulos, com qual módulo cada porta se conecta, etc.) e também qual a largura de banda e tipo das conexões (Hoz León, 2015).

Por fim, os arquivos de extensão “.ini” são incumbidos de associarem os arquivos necessários para a simulação e construir esta, podendo também parametrizar e configurar as execuções de simulação e definir os dados que serão gravados para posterior análise, permitindo assim a compilação da simulação (Hoz León, 2015).

3.4.2 Extensões Feitas no OMNeT++

Em (Hoz León, 2015) foram feitas as extensões necessárias para a simulação de modelos segundo a norma IEC-61850. A partir do *framework* INET, que já está organizado de acordo com as camadas do modelo OSI, foram feitas as ampliações necessárias para se modelar o ambiente de simulação no trabalho citado.

A seguir são apresentadas as extensões feitas em (Hoz León, 2015) no *framework* INET que serviram de base para a execução do presente trabalho:

Tabela 7 - Extensões feitas no INET.

Arquivo	Descrição
EtherAppGoose.ned	Define o módulo simples que processa e gera mensagens GOOSE.
EtherAppGoose.cc	Definem o comportamento do módulo <i>EtherAppGoose.ned</i> .
EtherAppGoose.h	
EtherGoose.msg	Contém a definição dos campos que formam as mensagens GOOSE.
EtherGooseStruct.h	Define as estruturas das mensagens GOOSE.
EtherAppSv.ned	Define o módulo simples que processa e gera mensagens SV.
EtherSv.msg	Contém a definição dos campos que formam as mensagens SV.
EtherSvStruct.h	Define as estruturas das mensagens SV.
EtherAppSv.cc	Definem o comportamento do módulo <i>EtherAppSv.ned</i> .
EtherAppSv.h	
EtherEncapExt.cc	Definem um módulo simples que tem a função de encapsular ou desencapsular tanto mensagens GOOSE quanto mensagens SV, e é baseado no módulo <i>EtherEncap</i> próprio do INET.
EtherEncapExt.h	
EtherEncapExt.ned	

Fonte: (Hoz León, 2015)

3.4.3 A Modelagem do *Switch*

O *switch* é um dispositivo que fornece um ponto de conexão física comum aos demais dispositivos de uma rede local (LAN). Sua operação se dá na camada 2 do modelo OSI determinando domínios de colisão distintos e otimizando o desempenho da rede. Através de um endereço MAC (*Media Access Control*), cada dispositivo possuirá sua localização distinta, fazendo assim com que cada mensagem seja enviada de sua origem apenas até o seu destino (Melchiori, 2011).

A norma IEC-61850 não define a atuação que devem ter os dispositivos de comutação, como os *switches*, porém, na determinação temporal de sistemas de comunicação, a presença destes aparelhos é fundamental para este tipo de estudo (Stemmer, 2010; Melchiori, 2011).

Antes de entender o comportamento do *switch*, será apresentado o conceito de LANs, e como estas são utilizadas nas redes de comunicação de SEs.

3.4.3.1 Local Area Network (LAN)

Uma *intranet* pode ser delimitada como uma rede interna de dispositivos baseados em padrões e tecnologias empregados pela internet, com o foco de compartilhar recursos e informações de maneira privada (Melchiori, 2011). Esse tipo de rede também é conhecido como as *Local Area Networks* (LANs), e, geralmente, possuem diferentes dispositivos conectados entre si, como computadores, IEDs, etc., além de serem limitados geograficamente.

Em geral, há três tipos de topologias físicas de LANs (que são a maneira que seus dispositivos são conectados). Essas topologias estão descritas em seguida.

3.4.3.1.1 Topologia em Barramento

A topologia de LANs em barramento é composta por uma mídia multiponto, que pode ser um condutor singular ou um cabo onde cada dispositivo de rede é conectado de forma apropriada através de uma interface de *hardware*. No final do barramento é conectado um dispositivo de *hardware* denominado “terminador”, que elimina o retorno de sinal existente no cabo e também evita a perda de sinal nos extremos deste cabo (Stallings, 2000; Melchiori, 2011).

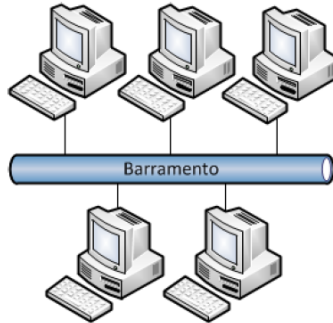
Na Tabela 8 são apresentadas suas vantagens e desvantagens, e a Figura 9 mostra o formato da topologia em questão.

Tabela 8 - Vantagens e desvantagens topologia de LANs em barramento.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ● Facilidade de implementação e manutenção; ● A mídia pode se localizar em um caminho mais eficiente, diminuindo a utilização de cabos; ● Facilidade de ampliação; ● Menor custo. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Diminuição da taxa de transmissão em caso de uma grande quantidade de dados ser transmitida; ● Se houver um rompimento no barramento, toda rede é afetada.

Fonte: (Forouzan, 2008; Melchiori, 2011)

Figura 9 - Topologia em barramento.



Fonte: (Forouzan, 2008; Melchiori, 2011)

3.4.3.1.2 Topologia em Estrela

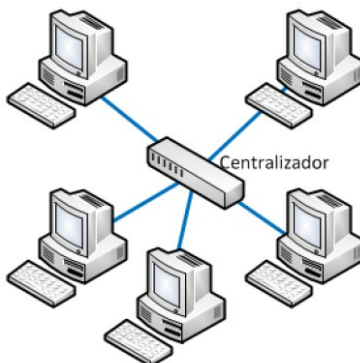
A topologia em estrela é composta por um dispositivo central no qual os demais elementos da rede estão conectados. A conexão desse elemento central é feita por uma conexão física ponto-a-ponto (Stallings, 2000; Melchiori, 2011).

Tabela 9 - Vantagens e desvantagens da topologia de LANs em estrela.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ● Uma falha no cabo não irá afetar a rede inteira, apenas o segmento defeituoso; ● Facilidade de expansão; ● Escalabilidade (se a capacidade do elemento central for excedida, basta trocar por outro de maior capacidade). 	<ul style="list-style-type: none"> ● Toda a rede pode ficar sem operação se um problema ocorrer com o elemento central; ● Maior custo com cabos (cada dispositivo precisa de um cabo conectando-o ao elemento central).

Fonte: (Forouzan, 2008; Melchiori, 2011)

Figura 10 - Topologia em estrela.



Fonte: (Forouzan, 2008; Melchiori, 2011)

3.4.3.1.3 Topologia em Anel

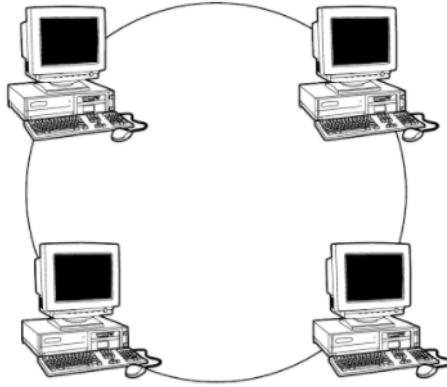
A topologia em anel consiste em um número de repetidores, cada um conectado a outros dois através de um *link* unidirecional para formar um único caminho fechado. Os dados são transmitidos sequencialmente através do anel de um repetidor para o outro em um único sentido (Stallings, 2000).

Tabela 10 - Vantagens e desvantagens da topologia de LANs em anel.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ● Instalação e reconfiguração não são complexas, pois cada dispositivo está conectado a apenas outros dois; ● Facilidade no isolamento de falhas, pois, se um dispositivo não receber um sinal em um determinado tempo um alerta é emitido. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Se um dos dispositivos do anel falhar, toda rede pode ser comprometida; ● Ampliações demandam que a rede seja tirada de operação.

Fonte: (Forouzan, 2008; Melchiori, 2011)

Figura 11 - Topologia em anel.



Fonte: (Lowe, 2008)

3.4.3.2 Tipos de *Switch*

Existem basicamente quatro tipos de *switches* no mercado (Jones, 2003; Melchiori, 2011):

- ***Cut-through*** - Apenas o MAC de destino dos *frames* recebidos é verificado e baseado nesse endereço, o *frame* recebido é encaminhado, nenhuma outra verificação é realizada;
- ***Store and Forward*** - Todo o *frame* é copiado para uma memória interna do *switch* e é realizada uma checagem de erro, para só então ser enviado ao destino;
- ***Hybrid*** - São uma combinação do *Cut-through* e *Store and Forward*, até um certo limiar de erro operam como o primeiro tipo, após esse limiar operam como o segundo tipo;
- ***Fragment-free*** - Verifica os primeiros 64 *bytes* do *frame* recebido a procura de erros, se nenhum for encontrado o *frame* é enviado ao destino, sem ser armazenado no *switch*.

3.4.3.3 Modelo de *Switch* utilizado no OMNeT++

No trabalho feito em (Hoz León, 2015), a modelagem do *switch* foi feita utilizando o modelo *Store and Forward*, e será este modelo que será utilizado neste trabalho. Além disso, a topologia utilizada será a em estrela, que faz com que os *switches* possam receber todo o tráfego da rede, se aproximando de um pior cenário possível (Hoz León, 2015).

Assim, como também feito em (Hoz León, 2015), a simulação do *switch* feita no OMNeT++ segue as exigências dos protocolos especificados pelas normas IEEE 802.3 e IEEE 802.1q, além de utilizar uma política de priorização de mensagem. Este modelo possui três elementos principais: As placas de interface de rede (*Network Interface Card* - NIC), a unidade de comutação (*Switch Fabric*) e as filas de saída (*Buffer*). Em cada modelo de *switch* há uma NIC e oito *buffers* de saída (um para cada prioridade conforme o padrão IEEE 802.1q) em cada uma das portas disponíveis para conexão de dispositivos (Hoz León, 2015).

Quando uma das portas NIC do *switch* recebe uma mensagem, esta é direcionada para a unidade de comutação para que seja definida em qual porta a mensagem será retransmitida até seu destino (Hoz León, 2015). Em seguida, a mensagem segue para um módulo simples denominado de “classificador”, que posiciona a mensagem em alguma das oito “filas de saída” de acordo com sua prioridade (Hoz León, 2015).

O modelo de *switch* aqui utilizado não registra automaticamente as VLANs (descritas anteriormente), e para utilizar este recurso deve ser feito um arquivo de configuração, o qual é feito através de um módulo simples denominado “tabela de endereços” (*MAC table*), o qual define o endereço físico e a VLAN a qual pertence tal porta de comunicação do *switch*, porém essa tabela somente é usada se o recurso de restrição de domínio estiver sendo utilizado na simulação (Hoz León, 2015).

3.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram abordados o modo de simulação dos dispositivos que compõem o barramento de processos da norma IEC-61850 e também a plataforma computacional em que a simulação será feita neste trabalho.

O OMNeT++, por ser uma ferramenta de simulação orientada a objetos, se enquadra muito bem para essa função, uma vez que a modelagem dos SASs feitas pela norma também utiliza o conceito de modelagem orientada a objetos.

Nos próximos capítulos, estes conceitos vistos até aqui são utilizados na simulação que é realizada no trabalho.

4 EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Neste capítulo é apresentado o cenário base para a simulação de estudos de caso e os tipos de simulação que foram realizadas a fim de analisar o desempenho temporal das mensagens que trafegam no barramento de processo de SEs de acordo com a norma IEC-61850.

4.1 ESTUDOS DE CASO

Nesta seção é apresentado o contexto das simulações realizadas e os modelos de aproximação de casos reais de acordo com o proposto na norma IEC-61850. Primeiramente, o cenário idealizado no trabalho é baseado em uma situação de máximo tráfego de mensagens a fim de explorar as condições mais extremas que os barramentos de processo de SASs possam suportar.

Para isso, são simuladas situações em que haverá apenas um *switch* dedicado à rede de comunicação de toda a subestação, sendo este encarregado da comunicação de todos IEDs de todos os barramentos que estarão conectados através da **topologia em estrela**. Com o fim de estressar a condição de tráfego de dados na subestação, simularam-se casos teóricos nos quais faltas simultâneas são identificadas em todos os barramentos da subestação, demandando assim a atuação de todos os elementos modelados.

Além disso, é estudada a influência no atraso fim-a-fim (*end-to-end delay*) da existência de medidas “errôneas” desde as MUs até a chegada da mensagem GOOSE no LN de abertura de disjuntor. Dessa forma, foram elaboradas amostragens de erro de bit e estimadas as distribuições de probabilidade de tempos fim-a-fim.

4.2 IMPACTO DO NÚMERO DE BARRAMENTOS CONECTADOS AO SWITCH

Como descrito anteriormente, este estudo é voltado à análise do comportamento temporal de mensagens, onde um único *switch* estará dedicado a todos dispositivos dos barramentos, sendo que o número de barramentos será variado a fim de estudar o impacto causado no sistema de comunicação do SAS.

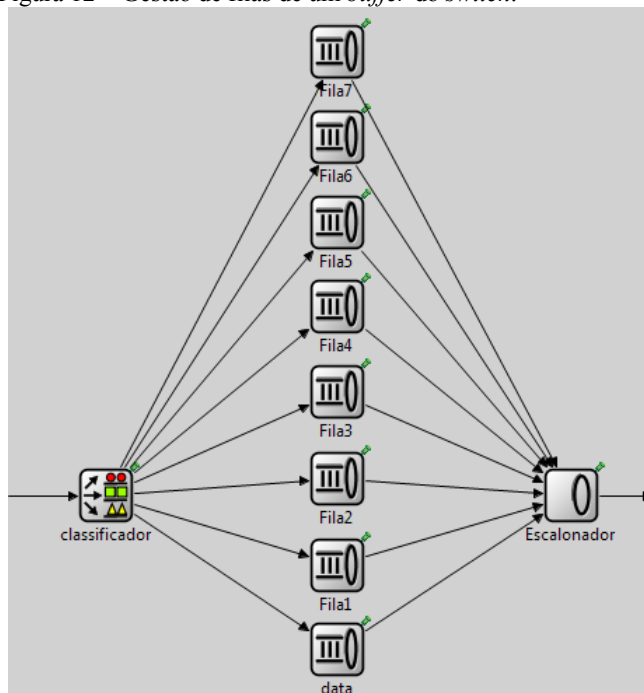
Vale a pena lembrar que no modelo simulado não há atrasos causados pelo processamento interno dos equipamentos (atrasos de *hardware*), tanto nos IEDs quanto no *switch*. Logo, os únicos fatores

causadores de atraso são devidos a largura de banda do canal e gestão de filas no *switch*.

O atraso devido à gestão de filas no *switch* ocorre por dois fatores: à classificação das mensagens que vão para as filas de saída de acordo com sua respectiva prioridade (determinada pela VLAN) e também devido à um módulo interno do *switch* denominado “escalador”, que envia as mensagens que estão esperando nas portas de saída, processando-as de acordo com suas prioridades (Hoz León, 2015).

A gestão de filas do *switch* (que ocorre dentro dos *buffers* de saída) é ilustrada na Figura 12, e o que é observado nesta figura ocorre em todas as portas disponíveis para conexão de equipamentos no *switch*.

Figura 12 – Gestão de filas de um *buffer* do *switch*.

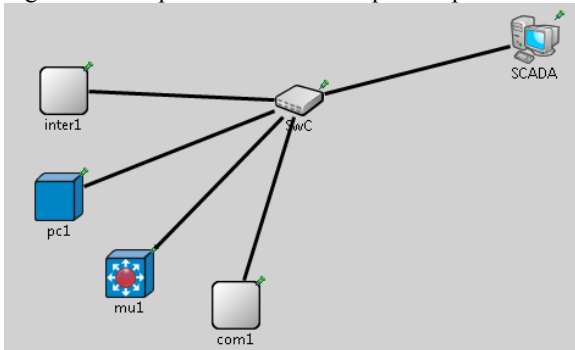


Fonte: (Hoz León, 2015)

Para essa simulação, são utilizados quatro tipos de dispositivos que fazem parte do processo de comunicação de cada *bay*, conforme Figura 32. Esses dispositivos, com seus respectivos nós lógicos, são:

- MU: dispositivo que faz a constante medição de valores de tensão e corrente (TVTR, TCTR);
- P&C: dispositivo de proteção (PTRC, PTOC);
- INTER: dispositivo de lógicas de intertravamento (CILO, CSWI);
- COM: dispositivo de comando e comutação de circuitos (XCBR).

Figura 13 - Dispositivos simulados que compõem um barramento.



Fonte: Autor

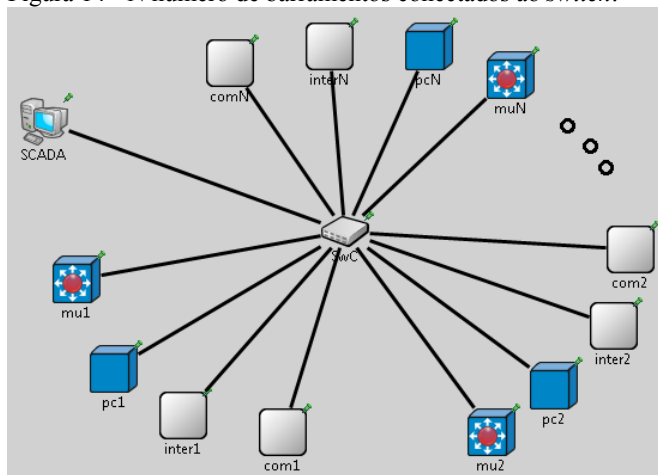
Ainda do ponto de vista da comunicação, o tráfego de mensagens durante a simulação é realizado da seguinte forma: antes de o IED P&C detectar uma amostra “anormal” de corrente proveniente da medição da MU do respectivo barramento, as mensagens que trafegam pelo barramento de processo estarão sendo enviadas a uma taxa fixa. As mensagens SV contêm valores de corrente e tensão e as mensagens GOOSE contêm informações sobre situação de contatos de disjuntores, etc. (Hoz León, 2015).

O dispositivo P&C enviará uma mensagem GOOSE solicitando a abertura de disjuntor para o IED de lógica de intertravamento. Por fim o INTER enviará outra mensagem GOOSE de comando de abertura de disjuntor para o COM, sendo efetuada assim a abertura do disjuntor necessária para a proteção do sistema elétrico (Hoz León, 2015).

Tendo especificado o modelo de simulação, o critério de análise do impacto temporal é o tempo fim-a-fim desde que a mensagem contendo medição “anormal” de corrente é originada pela MU até o momento que a mensagem GOOSE destinada a orientar a abertura do disjuntor chega ao COM.

Desse modo, são realizadas simulações com progressivos números de *bays*, aumentando-se os números de dispositivos que estão conectados ao *switch*. A Figura 14 ilustra este conceito.

Figura 14 - N número de barramentos conectados ao *switch*.

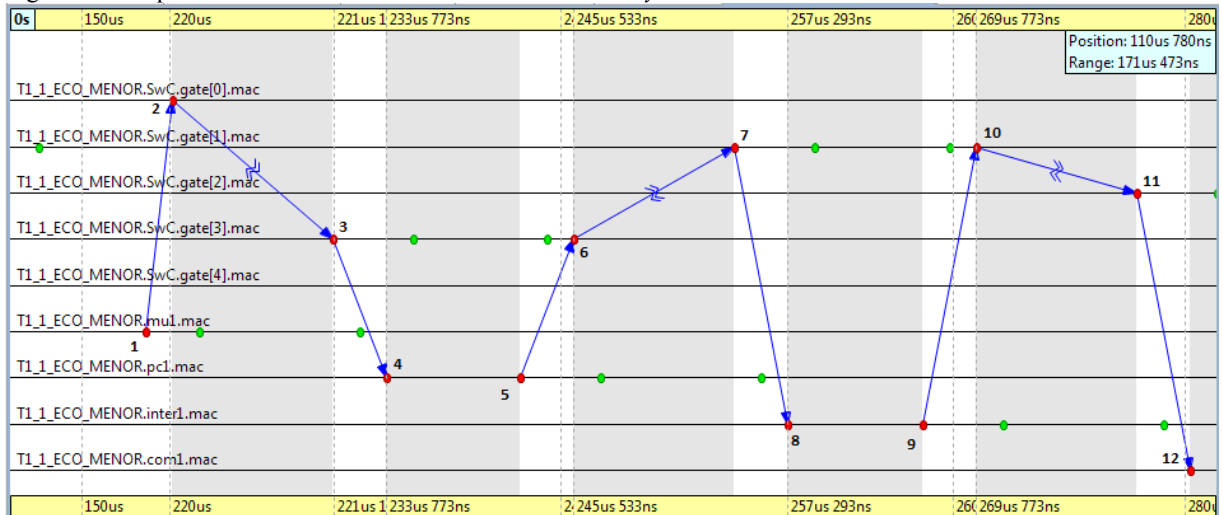


Fonte: Autor

Para ilustrar como se desenvolve a troca de mensagens no barramento de processos durante uma falta, a Figura 15 ilustra como são verificadas as trocas de mensagens entre os IEDs simulados no OMNeT++ através de eventos realizados pela simulação. O que se observa na Figura 15 diz respeito a um cenário com apenas um barramento, e com apenas **uma** medição anormal de corrente de modo que seja mais simples a visualização das trocas de mensagens que são aqui relevantes para o estudo.

Para facilitar a compreensão, cada caminho percorrido pelas mensagens mostradas na Figura 15 é descrito a seguir:

- **1-2:** A mensagem SV gerada na MU com medidas de corrente fora do estado normal da operação é enviada ao *switch*;
- **2-3:** O *switch* direciona a mensagem SV à porta correspondente ao seu destino final (P&C, no caso);
- **3-4:** A mensagem SV com medidas “anormais” chega ao dispositivo P&C;

Figura 15 - Sequência de eventos durante uma falta com um *bay*.

Fonte: Autor

-
-
-
- **5-6:** O dispositivo P&C gera uma mensagem GOOSE para o dispositivo INTER solicitando a abertura do disjuntor do seu respectivo barramento, e a envia ao *switch*;
- **6-7:** O *switch* direciona a mensagem GOOSE a porta correspondente ao seu destino final (INTER);
- **7-8:** A mensagem GOOSE chega ao dispositivo INTER;
- **9-10:** Uma mensagem GOOSE é gerada no dispositivo INTER comandando a abertura do disjuntor ao dispositivo COM, e esta é enviada ao *switch*;
- **10-11:** O *switch* direciona a mensagem GOOSE a porta correspondente ao seu destino final (COM);
- **11-12:** A mensagem GOOSE chega ao dispositivo COM que imediatamente abrirá o contato do disjuntor necessário à execução da proteção.

Vale salientar aqui que o tempo de processamento dentro dos IEDs e do *switch* não são levados em conta, fazendo com que o tempo da simulação enquanto as mensagens estão dentro destes não transcorra. Isto é percebido nos períodos em que o fundo do visualizador de eventos está mais escuro (2-3, 4-5, 6-7, 8-9 e 10-11), que é quando o tempo não é contabilizado na simulação.

Neste período observado, mede-se o tempo que leva para cada envio de mensagens, obtendo-se o seguinte:

- Da MU para o *switch*, e do *switch* para o P&C: 12,72 μ s
- De P&C para o *switch*, e do *switch* para INTER: 11,76 μ s
- De INTER para o *switch*, e do *switch* para COM: 12,48 μ s

Estes resultados estão coerentes com o esperado, pois tratam-se de apenas atrasos devido à largura de banda do canal (que no caso foi de 100 Mb/s), uma vez que o tamanho das mensagens SV, GOOSE proveniente do IED P&C e GOOSE proveniente do IED INTER são de 159 bytes, 147 bytes e 156 bytes, respectivamente.

Somando-se todos os intervalos de tempo corrido na simulação, temos que o tempo fim-a-fim, desde a mensagem SV gerada com dados emergenciais medidos até a chegada da mensagem GOOSE demandando a abertura do disjuntor no IED COM, foi de 73,92 μ s.

Tendo compreendido o funcionamento da simulação em questão, podemos agora testar o efeito de se introduzir cada vez mais barramentos e verificar o impacto sobre o desempenho temporal das mensagens que trafegam pelo barramento de processos dos SAS.

4.2.1 Análise do Desempenho Temporal das Mensagens em Diferentes Cenários

Para análise de desempenho temporal das mensagens que trafegam no barramento de processos, são conectados progressivamente os IEDs que compõem o sistema de proteção de *bays* de uma subestação. Observam-se os tempos que as mensagens levam até chegar a seus respectivos destinos e obtendo deste modo o tempo fim-a-fim desde o reconhecimento de valores atípicos de corrente até a abertura do disjuntor correspondente.

São enfatizados aqui os conceitos sobre o funcionamento da simulação:

- Não existe atraso relativo ao processamento interno de mensagens por parte dos IEDs, apenas atrasos referentes a fila de mensagens no *switch*.
- Em todos os casos está sendo usado o artifício da VLAN, que já foi explicado e atribuí prioridades as mensagens, fazendo com que elas sejam melhor direcionadas a seus respectivos destinos.
- Os atrasos devidos aos canais de comunicação se justificam unicamente pela largura de banda dos mesmos e pelo tamanho das mensagens. Neste trabalho são explorados canais de largura de banda de 10 Mbps e 100 Mbps.

Sabendo-se previamente o tamanho das mensagens, a partir das equações a seguir é possível prever os tempos de atraso dos canais de acordo com a largura de banda.

$$\tau_{canal} = \frac{M_{bits}}{B} \quad (1)$$

onde M_{bits} se refere ao tamanho da mensagem em *bits*, e B é a largura de banda em bits por segundo.

Desta forma, os resultados para situações em que a largura de banda dos canais são de 10 Mbps e 100 Mbps são apresentados nas

Tabelas 11 e 12, respectivamente. Os tempos são separados em cada atraso sofrido pelas mensagens em particular e o tempo total necessário para a abertura do disjuntor desde o reconhecimento da medida que causou a abertura.

Tabela 11 – Tempos de atraso de mensagens em μs (B = 10 Mbps).

10 Mbps				
N° de Bays	MU → P&C	P&C → INTER	INTER → COM	Total
<i>1</i>	<i>0,000265658</i>	<i>0,000662568</i>	<i>0,000267096</i>	<i>1195,322</i>
<i>2</i>	<i>0,000265835</i>	<i>0,001028688</i>	<i>0,000268264</i>	<i>1562,786</i>
<i>3</i>	<i>0,000266011</i>	<i>0,001394807</i>	<i>0,000269432</i>	<i>1930,25</i>
<i>4</i>	<i>0,000266188</i>	<i>0,001760927</i>	<i>0,000270599</i>	<i>2297,714</i>
<i>5</i>	<i>0,000266364</i>	<i>0,002127047</i>	<i>0,000271767</i>	<i>2665,178</i>
<i>6</i>	<i>0,000266541</i>	<i>0,002490694</i>	<i>0,000272935</i>	<i>3030,17</i>
<i>7</i>	<i>0,000266717</i>	<i>0,00286377</i>	<i>0,000274103</i>	<i>3404,59</i>
<i>8</i>	<i>0,000267962</i>	<i>0,003223853</i>	<i>0,000274968</i>	<i>3766,782</i>
<i>9</i>	<i>0,000268333</i>	<i>0,003591065</i>	<i>0,000277988</i>	<i>4137,387</i>
<i>10</i>	<i>0,00027056</i>	<i>0,004021745</i>	<i>0,000281033</i>	<i>4573,338</i>
<i>11</i>	<i>0,000270331</i>	<i>0,004409551</i>	<i>0,000279343</i>	<i>4959,225</i>
<i>12</i>	<i>0,000270962</i>	<i>0,004780592</i>	<i>0,000280088</i>	<i>5331,641</i>
<i>13</i>	<i>0,000271157</i>	<i>0,005100932</i>	<i>0,000281775</i>	<i>5653,864</i>
<i>14</i>	<i>0,00027091</i>	<i>0,005485407</i>	<i>0,000283375</i>	<i>6039,692</i>
<i>15</i>	<i>0,000271365</i>	<i>0,005870124</i>	<i>0,000282688</i>	<i>6424,177</i>
<i>16</i>	<i>0,000271978</i>	<i>0,00618657</i>	<i>0,000284467</i>	<i>6743,015</i>
<i>17</i>	<i>0,000272124</i>	<i>0,006571532</i>	<i>0,000284217</i>	<i>7127,874</i>
<i>18</i>	<i>0,000272482</i>	<i>0,006954228</i>	<i>0,000286196</i>	<i>7512,905</i>
<i>19</i>	<i>0,000272512</i>	<i>0,007324129</i>	<i>0,000285798</i>	<i>7882,44</i>
<i>20</i>	<i>0,000272187</i>	<i>0,007640126</i>	<i>0,000285926</i>	<i>8198,24</i>

Fonte: Autor

As Figuras 16 e 17 apresentam os tempos totais de atraso obtidos pelas simulações acima para os sistemas com largura de banda de 10 Mbps e de 100 Mbps.

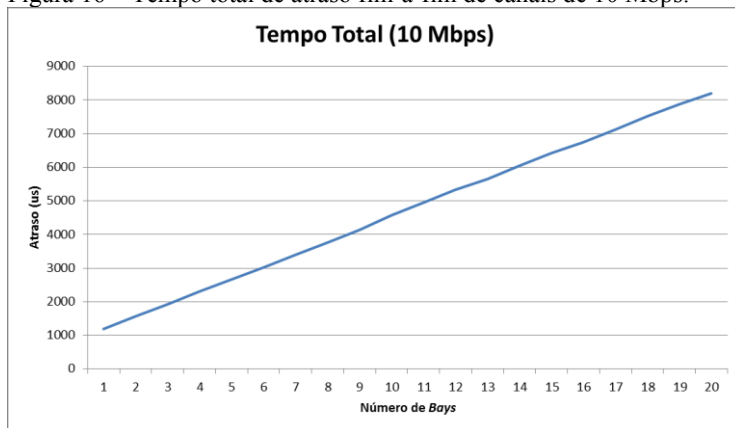
Tabela 12 – Tempos de atraso de mensagens em μ s (B = 100 Mbps).

100 Mbps				
Nº de Bays	MU → P&C	P&C → INTER	INTER → COM	Total
<i>1</i>	<i>0,00002544</i>	<i>2,33502E-05</i>	<i>2,54894E-05</i>	<i>74,27954893</i>
<i>2</i>	<i>0,00002544</i>	<i>2,35949E-05</i>	<i>2,5512E-05</i>	<i>74,54692435</i>
<i>3</i>	<i>0,00002544</i>	<i>2,38396E-05</i>	<i>2,55347E-05</i>	<i>74,81429976</i>
<i>4</i>	<i>0,00002544</i>	<i>2,40843E-05</i>	<i>2,55573E-05</i>	<i>75,08167518</i>
<i>5</i>	<i>0,00002544</i>	<i>2,43291E-05</i>	<i>2,558E-05</i>	<i>75,34905059</i>
<i>6</i>	<i>0,00002544</i>	<i>2,45738E-05</i>	<i>2,56026E-05</i>	<i>75,616426</i>
<i>7</i>	<i>0,00002544</i>	<i>2,48185E-05</i>	<i>2,56253E-05</i>	<i>75,88380142</i>
<i>8</i>	<i>0,00002544</i>	<i>2,51831E-05</i>	<i>2,5648E-05</i>	<i>76,27108706</i>
<i>9</i>	<i>2,55003E-05</i>	<i>2,59791E-05</i>	<i>2,56668E-05</i>	<i>77,14625716</i>
<i>10</i>	<i>2,56542E-05</i>	<i>2,574E-05</i>	<i>2,59978E-05</i>	<i>77,39192903</i>
<i>11</i>	<i>2,56498E-05</i>	<i>2,58221E-05</i>	<i>2,60265E-05</i>	<i>77,49838638</i>
<i>12</i>	<i>2,56458E-05</i>	<i>2,59194E-05</i>	<i>2,60346E-05</i>	<i>77,59979609</i>
<i>13</i>	<i>2,56425E-05</i>	<i>2,60051E-05</i>	<i>2,6045E-05</i>	<i>77,69259896</i>
<i>14</i>	<i>2,56394E-05</i>	<i>2,60891E-05</i>	<i>2,60542E-05</i>	<i>77,78281839</i>
<i>15</i>	<i>2,56369E-05</i>	<i>2,61456E-05</i>	<i>2,60593E-05</i>	<i>77,84177813</i>
<i>16</i>	<i>2,56729E-05</i>	<i>2,62083E-05</i>	<i>2,60667E-05</i>	<i>77,94790538</i>
<i>17</i>	<i>2,56678E-05</i>	<i>2,62604E-05</i>	<i>2,60757E-05</i>	<i>78,00388153</i>
<i>18</i>	<i>2,56637E-05</i>	<i>2,6308E-05</i>	<i>2,60767E-05</i>	<i>78,04842266</i>
<i>19</i>	<i>2,56598E-05</i>	<i>2,63544E-05</i>	<i>2,60823E-05</i>	<i>78,09654245</i>
<i>20</i>	<i>2,56565E-05</i>	<i>2,63896E-05</i>	<i>2,6085E-05</i>	<i>78,13097007</i>

Fonte: Autor

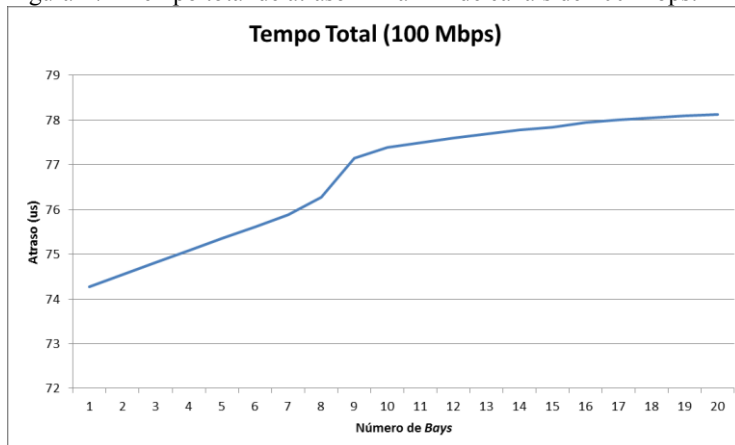
Como primeira análise, baseado no requisito temporal de desempenho de mensagens que trafegam no barramento de processos (3 ms), observa-se que em um sistema com largura de banda de 100 Mbps tem-se uma grande folga com relação a esse limite. Já em um sistema com largura de banda de 10 Mbps esse limite é extrapolado a partir de 6 barramentos conectados ao *switch*.

Figura 16 – Tempo total de atraso fim-a-fim de canais de 10 Mbps.



Fonte: Autor

Figura 17 - Tempo total de atraso fim-a-fim de canais de 100 Mbps.



Fonte: Autor

Com esses resultados, pode-se prosseguir para uma análise que leva em conta imperfeições nos canais de comunicação (erros de transmissão de *bits*), que são os maiores responsáveis pelos atrasos de mensagens na simulação.

4.3 INFLUÊNCIA DE ERROS DE BIT

De modo a tornar o estudo mais realista, é analisada aqui a influência da representação da taxa de erro de bits (BER – *bit error rate*). Assume-se uma BER com probabilidade fixa de 10^{-4} , onde devido ao *bit* corrompido, faz-se necessário o reenvio do pacote completo, dobrando-se o tempo necessário para que os dados corretos cheguem ao seu destino. A probabilidade de que um pacote de tamanho F esteja corrompido pode ser obtido através da equação (Falahati, 2012):

$$p = 1 - (1 - BER)^F \quad (2)$$

Dessa forma, foi elaborada uma simulação Monte Carlo considerando possível até três mensagens com erros de *bits* corrompidos consecutivos para um mesmo pacote (truncamento), devendo este ser novamente reenviado ao seu destino. Como procedimento, amostrou-se a ocorrência de mensagens com erros de *bits*, sendo que cada ocorrência tinha como impacto duplicar o tempo de envio da mensagem entre dois dispositivos.

Para a análise dos dados, primeiramente foi feita uma estimação imparcial através da equação de valor esperado (Issicaba, 2013):

$$\hat{E}[G] = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n G(y_u) \quad (3)$$

onde $G(y_n)$ se trata da função teste dada pelo tempo total de atraso fim-a-fim, n é o número de amostras e G é uma variável aleatória contínua que mapeia os valores da função $G(y_n)$.

Com um alto valor de iterações, podemos estimar a variância σ^2 como:

$$\sigma^2 \approx S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (G(y_n) - E_n[G])^2 \quad (4)$$

Essa variância tende a um valor igual a $\frac{\sigma^2}{n}$ e a variável aleatória $Z = \frac{E_n[G] - \mathbb{I}}{S/\sqrt{n}}$ segue a distribuição normal $N(0,1)$. Além disso, a medição normalizada da dispersão da probabilidade é dada pela razão entre o

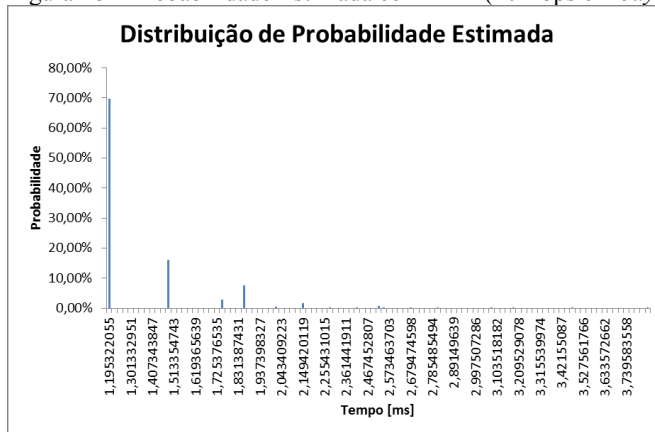
desvio padrão medido e a sua média, e é chamado de coeficiente de variação (Issicaba, 2013).

$$\beta = \frac{\sqrt{V(\hat{E}[G])}}{\hat{E}[G]} \quad (5)$$

normalmente essa medição se diz confiável com uma precisão de 95%, resultando em um beta menor que 0,05.

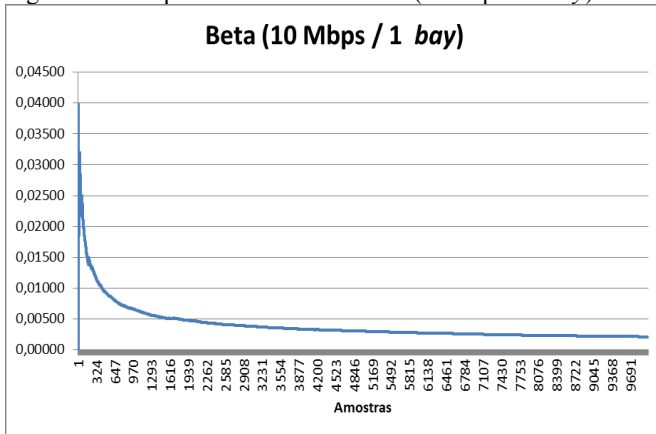
Os testes foram realizados considerando SEs com um, dez e vinte barramentos, cada uma analisada sob uma largura de banda de canal de 10 Mbps e 100 Mbps. Da Figura 18 à Figura 29 são ilustradas as probabilidades estimadas dos tempos e convergência dos valores médios.

Figura 18 – Probabilidade Estimada com BER (10Mbps e 1 bay).



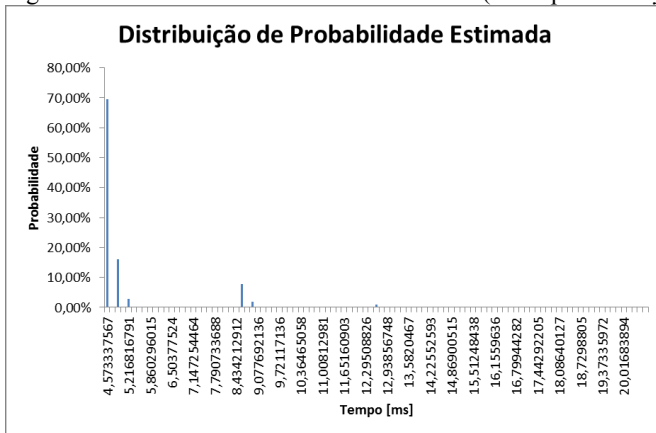
Fonte: Autor

Figura 19 – Dispersão de Probabilidade (10Mbps e 1 bay).



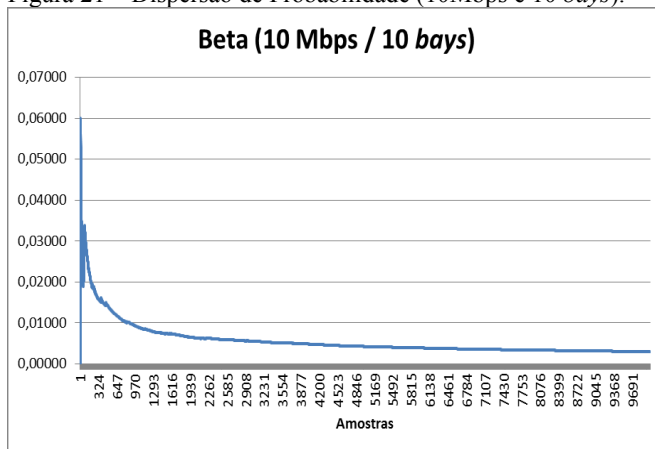
Fonte: Autor

Figura 20 – Probabilidade Estimada com BER (10Mbps e 10 bays).



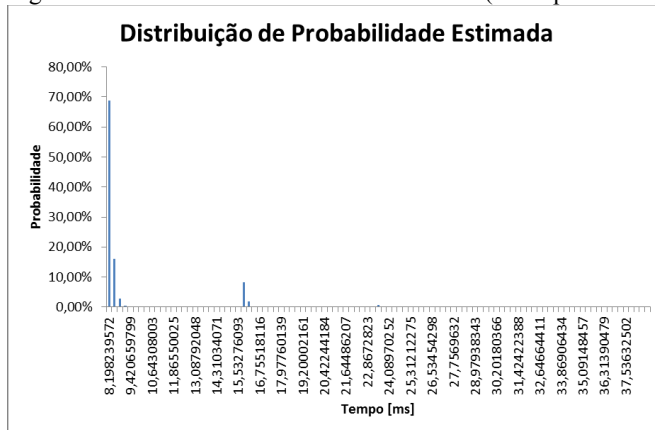
Fonte: Autor

Figura 21 – Dispersão de Probabilidade (10Mbps e 10 bays).



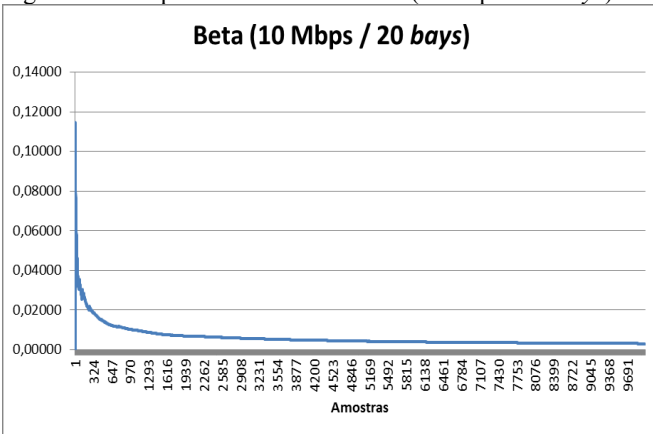
Fonte: Autor

Figura 22 – Probabilidade Estimada com BER (10Mbps e 20 bays).



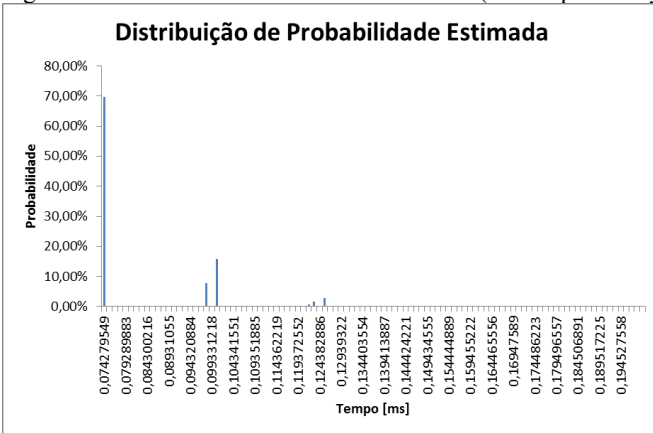
Fonte: Autor

Figura 23 – Dispersão de Probabilidade (10Mbps e 20 bays).



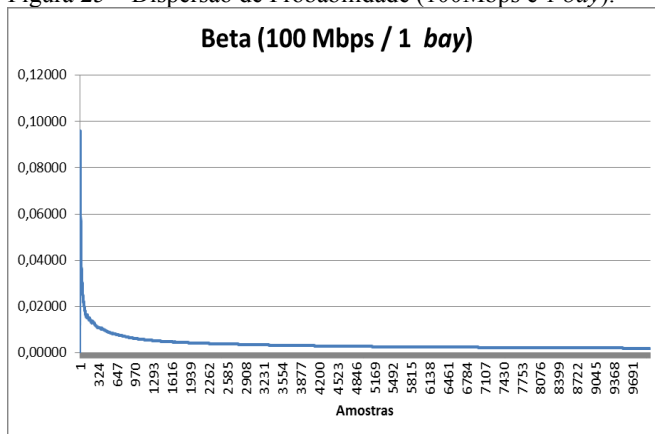
Fonte: Autor

Figura 24 – Probabilidade Estimada com BER (100Mbps e 1 bay).



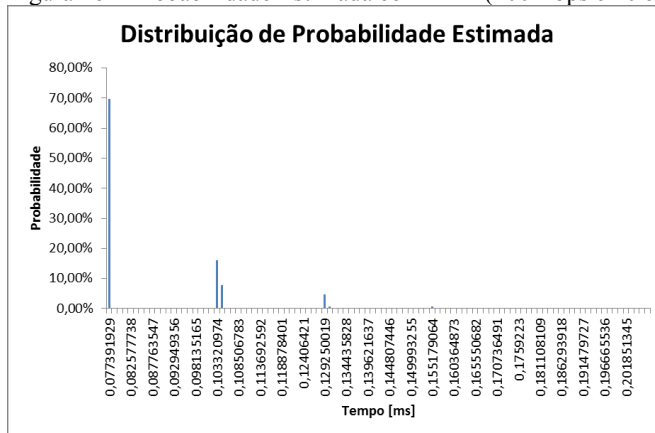
Fonte: Autor

Figura 25 – Dispersão de Probabilidade (100Mbps e 1 bay).



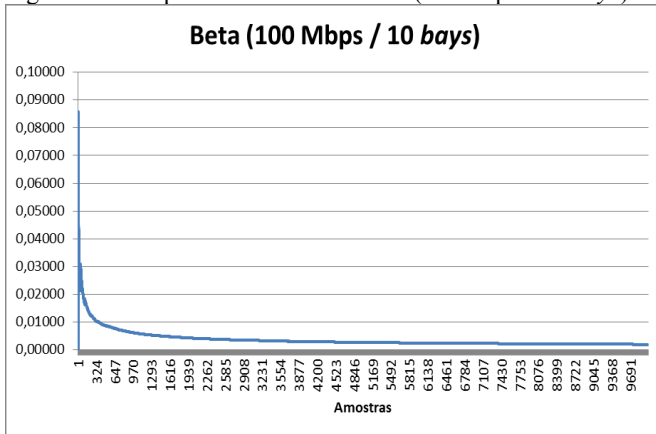
Fonte: Autor

Figura 26 – Probabilidade Estimada com BER (100Mbps e 10 bays).



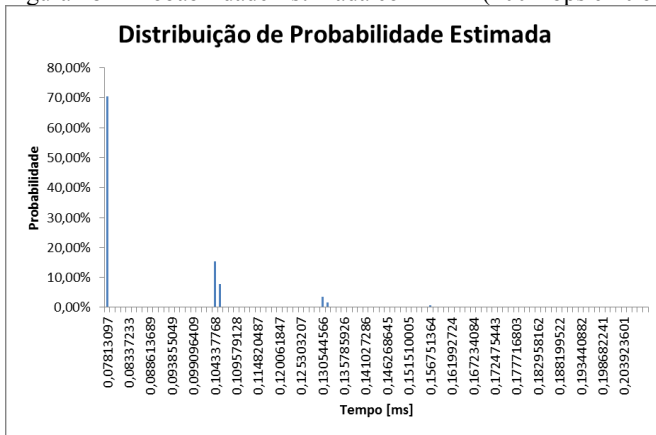
Fonte: Autor

Figura 27 – Dispersão de Probabilidade (100Mbps e 10 bays).

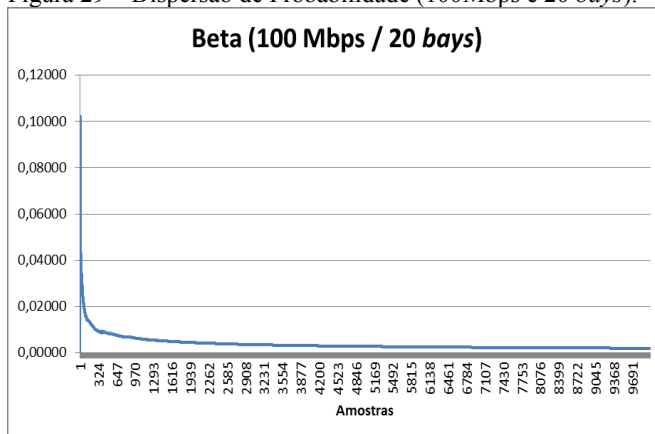


Fonte: Autor

Figura 28 – Probabilidade Estimada com BER (100Mbps e 20 bays).



Fonte: Autor

Figura 29 – Dispersão de Probabilidade (100Mbps e 20 *bays*).

Fonte: Autor

As Figuras 18 até a Figura 29 mostraram os histogramas e diagramas de convergência dos coeficientes β obtidos com análise probabilística supracitada, mostrando a frequência de ocorrência dos atrasos possíveis de acordo com cada cenário simulado. Os coeficientes β convergiram rapidamente para valores inferiores a 5%, evidenciando uma boa precisão dos cálculos de probabilidades. Os histogramas forneceram probabilidades nulas de extrapolação de tempo de atraso maior que 3 ms para sistemas com largura de banda de 100 Mbps, enquanto que para a largura de banda de 10 Mbps, com dez e vinte barramentos essas probabilidades são de 100%, e no caso de 1 barramento a chance é de 0,0018%.

4.4 CONCLUSÃO

Nesta seção foram apresentadas as características e resultados das simulações. Primeiramente os tempos fim-a-fim obtidos com o auxílio da modelagem feita no OMNeT++, e então uma manipulação de análise de dados probabilísticos foi utilizada para estimar o atraso extra que pode ocorrer com possibilidades de ocorrer erro nos *bits* enviados através dos canais de comunicação.

Quanto as simulações feitas no OMNeT++, os resultados foram satisfatórios sabendo que apenas dois fatores influenciaram nos tempos fim-a-fim das mensagens. Primeiramente o atraso devido à largura de banda pôde ser previsto, pois na simulação trata-se de um tempo determinístico que apenas depende do tamanho do pacote de mensagens

e largura de banda. O que se observou alterando o tempo além deste parâmetro foi o atraso devido a filas de dados no *switch*, que retornaram resultados condizentes com o esperado.

Na análise probabilística de situações com taxas de erro de *bits*, pode-se concluir que os cálculos foram precisos uma vez que as dispersões das probabilidades (coeficiente β) convergiram rapidamente para valores menores que 5%. Para as configurações utilizadas, a largura de banda de 100Mbps apresentou probabilidade zero de ocorrência em todos os casos, e a largura de banda de 10 Mbps apresentou probabilidade de ocorrência de atraso maior que três milissegundos de 100% para os casos de 10 e 20 barramentos, além de uma chance de 0,0018% no caso de um barramento.

5 CONCLUSÃO

O objetivo da análise de tempo fim-a-fim das mensagens estudado aqui foi voltado a verificar se o tempo desde a medição proveniente de alguma falta lida por uma *Merge Unit* até a abertura de um disjuntor provocada pela chegada de uma mensagem GOOSE foi suficiente para atender a classe de desempenho mais exigente (no sentido de desempenho temporal) de acordo com a norma IEC-61850. Foi determinado que esta classe requer que o tempo de reação do sistema de proteção não atrase mais do que três milissegundos para que sejam executadas suas funções de segurança.

Desse modo, com a modelagem desenvolvida por (Hoz León, 2015) foi possível montar os cenários de teste para analisar o comportamento das mensagens que compõem o barramento de processo de SAS, utilizando os nós lógicos de funções mais próximas possíveis de funções de proteção de sistemas elétricos.

Com os resultados obtidos na modelagem feita no OMNeT++, verificou-se que, sob as circunstâncias levadas em conta na simulação (atrasos apenas em canal de comunicação e filas ocasionadas no *switch*), um sistema que possui uma largura de banda de 100 Mbps satisfaz com folga o limite de três milissegundos, até para um caso em que 80 dispositivos (cenário com vinte barramentos, quatro dispositivos por barramento) estão conectados a um único *switch*, sob as condições de simulação. Quando se trata de um sistema limitado a 10 Mbps de largura de banda, em casos com seis barramentos ou mais, o limite de três milissegundos é extrapolado.

Para se obter uma análise com mais critérios, foi incorporado ao estudo uma taxa probabilística de taxa de erro de *bits*. Com esse critério foi introduzida uma chance a todos os cenários de se ter o tempo fim-a-fim maior que o máximo de três milissegundos, exceto aos que já ultrapassavam essa marca, com o intuito de poder observar a confiabilidade dos diferentes *layouts*. Constatou-se que sob uma largura de banda de 10 Mbps e um barramento apenas conectado ao *switch*, a chance de o tempo fim-a-fim vir a ser maior que o limite supracitado é de 0,0018%, enquanto que para dez e vinte *bays* a chance é de 100%. Quando se trata de um sistema de 100 Mbps de largura de banda, a chance é 0% até para a configuração com 20 barramentos.

Dessa forma, para garantir um bom desempenho temporal em um sistema de automação de subestação, é interessante garantir que a largura de banda do sistema de comunicação das mensagens que trafegam no barramento de processos de subestações seja de 100 Mbps

ou mais, de forma a garantir que as mensagens rápidas que são necessárias em casos de emergência atuem em tempo apropriado para que estragos maiores tais como perdas totais de dispositivos caros ou grandes cortes de carga do SEP não aconteçam devido a falhas com os equipamentos de uma subestação.

REFERÊNCIAS

DE CASTRO, Nivalde José; BARA NETO, Pedro. **Expansão do Sistema Elétrico Brasileiro e o Potencial Hidroelétrico da Região Amazônica**. 50. ed. 50: UFRJ, 2012. 32 p. Disponível em: <http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/53_TDSE50.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2015.

FALAHATI, B.; DARABI, Z.. MOUSAVI, M. J.; and FU, Y. **Stochastic latency assessment in substation automation systems**, In Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA. 2012 IEEE.

FOROUZAN, Behrouz A. **Comunicação de Dados e Redes de Computadores**. 4. São Paulo: McGraw Hill, 2008.

GUERREIRO, H. A. D. E. **Substation Automation Systems and IEC 61850: Interoperability Testing**. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Electronics And Telecommunications Engineering, Universidade do Algarve, Algarve, 2011.

HOZ LEÓN, Héctor Henrique De La. **Modelagem de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes para Barramento de Processos Baseado na Norma IEC 61850**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Florianópolis, 2015.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-61850: Communication Network and Systems in Substation**. S.l.: IEC, 2003. v. 10.

ISSICABA, D. **Block-Oriented Agente-Based Architecture to Support the Power Distribution System Operation: System Design and Environment Model**. 2013. Tese de Doutorado – Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Elétrica e Engenharia de Computação, Porto, 2013.

JONES, Stephan, e Ron Kovacs. **Introduction to Communications Technologies** - A Guide for Non-Engineers. Boca Raton: Auerbach Publications, 2003.

KANABAR, Mitalkumar. **Investigating Performance and Reliability of Process Bus Networks for Digital Protective Relaying**. 2011. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Graduate Program In Engineering Science Department Of Electrical And Computer Engineering, School Of Graduate And Postdoctoral Studies, University Of Western Ontario, Canada, 2011.

KOSTIC, Tatjana ; PREISS, Otto; FREI, Christian. Understanding and using the IEC 61850: a case for meta-modelling. **Computer Standards & Interfaces**, [s.l.], v. 27, n. 6, p.679-695, jun. 2005. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.csi.2004.09.008.

KUROSE, James F., e Keith W. Ross. **Redes de computadores e a Internet: uma abordagem top-down**. 5. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.

LOWE, Doug. **Networking All-in-one Desk Reference**. John Wiley & Sons, 31 de Março de 2008. 876 p.

MACKIEWICZ, Ralph. — Overview of IEC 61850 and Benefits. **Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES**. IEEE, 2006. 376 - 383 .

MELCHIORI, G. **Avaliação Experimental do Tempo de Transferência das Mensagens GOOSE para Dispositivos Eletrônicos Inteligentes**. 2011. 67f. Monografia de Especialização, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2011.

MOXA. **IEC 61850-3 and IEEE 1588 in Smart Substation: Substation Technical Guide Book**. [s.l]: Moxa Inc., 2012. 68 p.

RODRIGUES, José Roberto Moreira. — Primeira Subestação em Funcionamento com IEC 61850. **VI SIMPASE - Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos**. São Paulo: Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista e Cigré-Brasil, 2005.

SKEIE, T.; JOHANNESSEN, S.; BRUNNER, C. Ethernet in substation automation. **IEEE Control Syst. Mag.**, [s.l.], v. 22, n. 3, p.43-51, jun. 2002. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/mcs.2002.1003998.

STALLINGS, William. **Local and metropolitan area networks**. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2000.

STEMMER, Marcelo Ricardo. **Redes Locais Industriais: A INTEGRAÇÃO DA PRODUÇÃO ATRAVÉS DAS REDES DE COMUNICAÇÃO**. Florianópolis: Editora UFSC, 2010. 272 p.

TANENBAUM, Andrew S. **Redes de Computadores**. 4. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2003.

ZHAO, Pengcheng et al. Development of the IEC 61850–9–2 software merging unit IED test and training platform. **2013 Ieee Grenoble Conference**, Grenoble, v. 1, n. 1, p.1-6, jun. 2013. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/ptc.2013.6652385.