

Héctor Enrique De La Hoz León

**MODELAGEM DE DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS
INTELIGENTES PARA BARRAMENTO DE PROCESSOS
BASEADO NA NORMA IEC 61850**

Dissertação submetido(a) ao Programa
de pós-graduação em Automação e
Sistemas da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau
de mestre em Sistemas de Controle
Orientador: Prof. Dr. Carlos Barros
Montez
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo
Ricardo Stemmer.

Florianópolis
2015

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

De La Hoz León, Hector Enrique

Modelagem de dispositivos eletrônicos inteligentes para o estudo do barramento de processos baseado na norma IEC 61850 / Hector Enrique De La Hoz León ; orientador, Carlos Barros Montez ; coorientador, Marcelo Ricardo Stemmer. - Florianópolis, SC, 2015.

171 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Sistemas de Tempo Real . 3. Sistemas de Automação para Subestações . 4. IEC 61850. I. Montez, Carlos Barros. II. Stemmer, Marcelo Ricardo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. IV. Título.

Héctor Enrique De La Hoz León

**MODELAGEM DE DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS
INTELIGENTES PARA O ESTUDOS DO BARRAMENTO DE
PROCESSOS BASEADO NA NORMA IEC 61850**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação de Engenharia de Automação e Sistemas

Florianópolis, 16 de Outubro de 2015.

Prof. Rômulo Silva de Oliveira, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Carlos Barros Montez, Dr.
Orientador
Universidade Federal De Santa Catarina

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.
Coorientador
Universidade Federal De Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Rômulo Silva de Oliveira, Dr.
Universidade Federal De Santa Catarina

João Marcos Castro Soares, Msc.
Reivax S/A Automação e Controle

Prof. Eraldo Silveira e Silva, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Odilson Tadeu Valle, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família, meus amigos e professores por terem-me apoiado nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Este livro é a materialização de um sonho que iniciou no ano 2008, quando cheguei por primeira vez a este “pedacinho de terra perdido no mar”. Muitas experiências vivi desde então e é claro conheci pessoas que direta e indiretamente ajudaram na conclusão deste trabalho.

Primeiramente quero agradecer aos meus familiares, em especial aos meus pais Maria e Osvaldo, por serem exemplo de trabalho e luta. À Deysy e ao Juan, por compartilharem comigo os pequenos detalhes e as alegrias da vida. Aos meus amigos da vida por me proporcionarem momentos inesquecíveis, especialmente ao Emerson por haver-me acolhido na sua casa como um irmão. À galera do basquete por estarem ali nesse momento de tranquilidade e saúde.

Ao Dhelyo Rodrigues, sua empresa CSP e todos os ex-colegas de trabalho que ali conheci, por haverem acreditado em mim e terem-me dado a oportunidade de aplicar o meu conhecimento em situações reais, disfrutei muito trabalhar com vocês. À empresa Reivax S.A, ao CNPq, a UFSC e ao PGEAS, pelo apoio técnico, científico e financeiro necessário para a conclusão do meu mestrado. Às empresas Reason e SEL, pelo suporte técnico e por terem deixado as suas instalações e os seus colaboradores à minha disposição.

Aos professores do PGEAS, em cabeça do professor Rômulo, por terem compartilhado parte do seu conhecimento em aulas e discussões. Ao professor Fernando Pacheco e ao professor Rafael Cancián por terem-me indicado no mestrado quando ainda era aluno de especialização no IFSC.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer aos meus orientadores Carlos Montez, Marcelo Stemmer e Jean-Marie Farines, por terem confiado em mim para o desenvolvimento deste projeto, pela ajuda em momentos quando nada fazia sentido e pela motivação para concluir o trabalho.

Obrigado.

*“Dificuldades preparam pessoas
comuns para destinos extraordinários”
(C.S Lewis)*

RESUMO

Existe um consenso nos diferentes agentes do setor elétrico (geradores, distribuidores, comercializadores, etc.) sobre a necessidade de executar mudanças profundas no atual Sistema Elétrico de Potência (SEP). A visão desse SEP moderno é conhecida como “*Smart Grid*” e é definida pelo *Electric Power Research Institute (EPRI)* como um SEP completamente automático que permite o fluxo bidirecional de eletricidade e informação entre clientes e fornecedores do serviço de energia elétrica. Nesse panorama, a modernização dos sistemas de automação das subestações de energia elétrica é fundamental para a materialização do *smart grid*. A norma internacional IEC 61850 padroniza o modelo de informação e os serviços de comunicação para sistemas de automação utilizados no SEP, particularmente em subestações, onde a sua implantação tem apresentado vantagens tanto na fase de projeto quanto na fase operação. Através de uma abordagem de sistemas de tempo real, este trabalho estuda o barramento de processos definido pela norma, destacando o tempo de transmissão fim a fim das mensagens como o principal índice de desempenho do sistema de comunicação. O estudo foi dividido em duas etapas: inicialmente foram desenvolvidos modelos de simulação para cada um dos dispositivos que compõem o barramento de processos. Estes modelos foram integrados em uma plataforma de simulação que permite visualizar e estimar o comportamento temporal das mensagens especificadas pela norma supracitada (GOOSE e *Sample Values*). Na segunda etapa, foi realizado um estudo de mercado com o objetivo de adquirir equipamentos para conformar a infraestrutura básica de um laboratório que viabilize a formação de engenheiros na área de automação de sistemas elétricos. Com a aquisição desses equipamentos e com a ajuda de uma ferramenta de geração de mensagens (desenvolvida também como parte deste trabalho) foi possível estabelecer relações entre os resultados do sistema simulado e o comportamento do sistema real.

Palavras-chave: 1. Sistemas de Tempo Real 2. Sistemas de Automação para Subestações 3. IEC 61850.

ABSTRACT

Within the different electric power agents (generators, distributors, suppliers, etc.), there is a general agreement about the need to perform deep changes in the current Electric Power System (EPS). The concept of this modern EPS is termed "Smart Grid" and is defined by the Electric Power Research Institute (EPRI) as a fully automatic EPS that allows bidirectional flow of electricity and information between customers and suppliers of electrical services. In this scenario, the modernization of automation systems used in electrical substations is crucial for the realization of the smart grid. The international standard IEC 61850 standardizes the information model and the communication services for automation systems used in EPS, particularly in substations, where it has shown advantages both in the design phase and in the operational phase. Using a real-time systems approach, this work studies the process bus defined by this standard, highlighting the transmission end-to-end time of the messages as the main performance metric of the communication system. The study was divided in two stages: in the initial stage, simulation models were developed for each of the devices that constitute the process bus. These models were integrated into a simulation platform that allows the user to observe and estimate the temporal behavior of the messages specified by the standard (GOOSE and Sample Values). In the second stage, a market study was carried out in order to acquire equipment for creating the basic infrastructure of a laboratory for the qualification of engineers in the field of electrical systems automation. With the purchase of these devices and with the help of a message generation tool (also developed as part of this work) it was possible to establish relationships between the results of the simulated system and the real system behavior.

Keywords: 1. Real-Time Systems 2. Substation Automation System 3. IEC 61850

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema elétrico de potência tradicional.	25
Figura 2. Arquitetura de um "Smart Grid" segundo EPRI.	27
Figura 3. Diagrama de sistema de proteção e controle de subestações.	34
Figura 4. Comparativo das diferentes tecnologias de relés.	35
Figura 5. Hierarquia do sistema de automação fabril segundo modelo CIM.	37
Figura 6. Modelo de referência OSI e conceitos associados.	39
Figura 7. Arquiteturas derivadas do projeto MAP.	42
Figura 8. Arquitetura de SAS segundo IEC-61850.	45
Figura 9. Diagrama de blocos da MU.	46
Figura 10. Visão do sistema de comunicação segundo IEC-61850.	50
Figura 11. Decomposição de funções em LN.	52
Figura 12. Visão de configuração proposta pela norma.	53
Figura 13. Pilhas de comunicação propostas pela norma.	56
Figura 14. Ordem de leitura das partes da norma.	56
Figura 15. Modelagem orientada a objetos utilizada pela IEC-61850.	58
Figura 16. Exemplo do modelo de informação da norma.	60
Figura 17. Exemplo do modelo de informação da norma.	61
Figura 18. Alguns serviços de comunicação da IEC-61850.	63
Figura 19. Modelo de serviço GOOSE/GSSE.	64
Figura 20. Visão completa do IED segundo IEC-61850.	65
Figura 21. Definição de tempo de transmissão.	66
Figura 22. Tipos de mensagens mapeados aos perfis de comunicação.	70
Figura 23. Modelos dos IED do barramento de processo. a) IED P&C. b) IED MU.	76
Figura 24. Cabeçalho do protocolo IEEE 802.3, IEEE 802.1q e IEC61850.	77
Figura 25. Elementos funcionais do OMNeT++.	83
Figura 26. Princípio de funcionamento do OMNeT++.	83
Figura 27. Diagrama do comportamento do módulo GOOSE.	86
Figura 28 Diagrama do comportamento do módulo SMV.	86
Figura 29. Diagrama de bloco do modelo do switch.	89
Figura 30 Diagrama de fluxo do escalonador no buffer do switch.	89
Figura 31. Diagrama do cenário T1-1.	96
Figura 32. Diagrama dos cenários D2-1.	97
Figura 33. Sequência de eventos no cenário T1-1.	99
Figura 34. Arquitetura de rede do cenário T1-1 e modelos de IED.	100
Figura 35. Modelo de tarefa de sistema de tempo real.	101
Figura 36. Comportamento temporal do dispositivo MU.	115
Figura 37. Formato da mensagem SMV transmitida no OMNeT++.	115
Figura 38. Comportamento do dispositivo P&C.	117
Figura 39. Parte da estrutura das mensagens GOOSE.	117
Figura 40. Avaliação do comportamento dinâmico definido pela norma IEC 61850.	118
Figura 41. Tempo de resposta do IED modelado.	118

Figura 42. Tratamento de mensagens com diferentes tipos de endereços.....	121
Figura 43. Tratamento de mensagens com marcação de <i>VLAN</i>	122
Figura 44. Mensagens recebidas por filas de prioridade.....	123
Figura 45. Máximo tempo de fila na porta zero do switch.	125
Figura 46. Arquitetura da rede de comunicação para o caso de estudo T1-1...	127
Figura 47. Inversão de prioridade e máximo EtE das mensagens SMV sem IEEE 802.1q.	132
Figura 48. Máximo EtE para mensagens SMV com IEEE 802.1q.	133
Figura 49. Comportamento das bursty sporadic tasks.	139
Figura 50. Máximo EtE de um Bay T1-1 com 14 MU.	142
Figura 51. Laboratório para automação de sistemas de energia elétrica.	143
Figura 52. Caracterização da ferramenta de transmissão de mensagens SMV.	146
Figura 53. Caracterização da ferramenta de transmissão de mensagens GOOSE.	146
Figura 54. Estrutura da mensagem GOOSE no <i>Wireshark</i>	147
Figura 55. Estrutura da mensagem SMV no <i>Wireshark</i> e reconstituídos no SvScout.....	147
Figura 56. Eventos do primeiro teste com equipamentos reais.....	149
Figura 57. Estrutura interna de uma porta do <i>switch</i>	150
Figura 58. Divisão de tráfego no <i>switch</i>	151
Figura 59. Arquitetura do segundo teste com equipamentos reais.....	151

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Comparação entre os diferentes níveis hierárquicos CIM.	37
Quadro 2. Especificação de protocolos segundo projeto MAP.	41
Quadro 3. Famílias de LN.	58
Quadro 4. Classes de desempenho.	67
Quadro 5 - Tipo de mensagem e classe de desempenho.	68
Quadro 6. Protocolos para cada camada do RM-OSI.	71
Quadro 7. Valores recomendados pela norma IEC61850 para os campos dos cabeçalhos IEEE 802.3, IEEE 802.1q.	78
Quadro 8. Campos do PDU GOOSE.	79
Quadro 9. Campos do PDU das mensagens SMV.	80
Quadro 10. Campos do <i>dataset</i> PhsMeas1.	81
Quadro 11. Parâmetros e estatísticas dos módulos GOOSE e SV.	87
Quadro 12. Comparativo da revisão bibliográfica com o presente trabalho.	92
Quadro 13. PICS modelo MU.	93
Quadro 14. PICS modelo P&C.	93
Quadro 15. Caracterização da rede do caso de estudo T1-1.	103
Quadro 16. Parâmetros das mensagens do sistema T1-1.	104
Quadro 17. Testes aplicados para conformidade de requisitos estáticos.	114
Quadro 18. Tempo de transmissão fim a fim do primeiro teste.	128
Quadro 19. Tempo de Fila do primeiro teste (mensagens <i>Unicast</i>).	129
Quadro 20. Tempo de transmissão fim a fim do segundo teste.	131
Quadro 21. Tempo de fila do segundo teste.	131
Quadro 22. Valores do tempo de resposta no pior caso e análise corrigida.	135
Quadro 23. Comparação entre valores do tempo de resposta no pior caso teórico e simulado no contexto do segundo teste.	136
Quadro 24. Tempo de transmissão fim a fim do primeiro teste.	137
Quadro 25. Tempo de transmissão fim a fim do segundo teste.	137
Quadro 26. Parâmetros da Equação (4) para análise de mensagens de prioridade 4 no caso T1-1 aumentado.	140
Quadro 27. Máximo tempo de resposta para o caso T1-1 aumentado.	141
Quadro 28. Características dos equipamentos do laboratório.	144
Quadro 29. Bay de T1-1 com equipamentos reais.	152
Quadro 30. Comparação do tempo de resposta obtido com o método simulado, analítico e experimental.	153

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACSI – *Application Communication Service Interface*
ASN – *Abstract Syntax Notation*
BER – *Basic Encoding Rule*
CDC – *Common Data Class*
CID – *Configured IED Description File*
CIM – *Computer Integrated Manufacturing*
DA – *Data Attribute*
DNP – *Distributed Network Protocol*
DO – *Data Object*
DUT – *Device Under Test*
EMI – *Electromagnetic Interference*
EPRI – *Electric Power Research Institute*
EtE – *End-to-End*
FIFO – *First In First Out*
GOOSE – *Generic Object Oriented Substation Event*
GSSE – *Generic Substation State Event*
HSR – *High-availability Seamless Redundancy*
ICD – *IED Capabilities Description File*
ICI – *Interface Control Information*
IDU – *Interface Data Unit*
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IEC – *International Electrotechnical Commission*
IED – *Intelligent Electronic Device*
IFG – *Inter-Frame Gap*
IP – *Internet Protocol*
IRIG – *Inter-Range Instrumentation Group*
ISO – *International Organization for Standardization*
I/O – *Input/Output*
LAN – *Local Area Network*
LD – *Logical Device*
LED – *Light Emitting Diode*
LN – *Logical Node*
MAP – *Manufacturing Automation Protocol*
Mbps – *Megabits por segundo*
MMS – *Manufacturing Message Specification*
MU – *Merging Unit*
NCIT – *Non-Conventional Instrumentation Transformer*
NIC – *Network Interface Card*
NS – *Network Simulator*

PDU – *Protocol Data Unit*
PICS – *Protocol Implementation Conformance Statement*
PPP – *Point to Point Protocol*
PPS – *Pulso Por Segundo*
PRP – *Parallel Redundancy Protocol*
PTP – *Precision Time Protocol*
P&C – *Proteção e Controle*
QoS – *Quality of Service*
REI – *Redes Eléctricas Inteligentes*
RM-OSI – *Reference Model for Open System Interconnection*
SAP – *Service Access Point*
SAS – *Sistema de Automação para Subestações*
SCD – *Substation Configuration Description File*
SCL – *Substation Configuration Language*
SCSM – *Specific Communication Service Mapping*
SDU – *Service Data Unit*
SEP – *Sistemas Eléctricos de Potência*
SMV – *Sample Measured Values*
SOE – *Sequence Of Events*
SSD – *Substation Specification Description File*
SV – *Sample Values*
TC – *Transformador de Corrente*
TCP – *Transport Control Protocol*
TI – *Transformador de Instrumentação*
TIC – *Tecnologias de Informação e Comunicação*
TPAA – *Two Party Application Association*
TTL – *Time allowed To Live*
TV – *Transformador de Voltagem*
UCA – *Utility Communication Architecture*
UDP – *User Datagram Protocol*
VLAN – *Virtual Local Area Network*
XML – *eXtensible Markup Language*

SUMÁRIO

1.A NOVA GERAÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	25
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	25
1.1.1 Smart Grid.....	26
1.1.2 Interoperabilidade e Norma IEC-61850.....	28
1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	29
1.2.1 Perguntas da Pesquisa	29
1.4 OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	30
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	31
2.SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO PARA SUBESTAÇÕES.....	33
2.1 SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO PARA SUBESTAÇÕES.....	33
2.2 REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL COMO MOTIVAÇÃO PARA IEC-61850.....	36
2.2.1 Hierarquia das Redes Industriais	36
2.2.2 O Modelo OSI como Referência para Arquitetura de Redes.....	38
2.2.3 Padronização das Redes Industriais.....	40
2.3 SURGIMENTO DA NORMA IEC-61850.....	43
2.3.1 Barramentos de Comunicação Segundo a Norma IEC 61850.....	44
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
3.IEC-61850: ESTRUTURA BÁSICA DE COMUNICAÇÃO PARA SUBESTAÇÕES E ALIMENTADORES.....	49
3.1 INTRODUÇÃO À NORMA IEC-61850.....	49
3.1.1 Objetivos e Foco da Norma	49
3.1.2 Composição Geral do Documento da Norma	51
3.2 MODELAGEM NA NORMA IEC 61850.....	55
3.2.1 Modelo de Informação.....	56
3.2.2 Serviços de Comunicação do Barramento de Processos	61
3.2.3 Requisitos temporais da comunicação	65
3.3 PERFÍS DE COMUNICAÇÃO NA NORMA IEC 61850.....	69
3.3.1 Protocolos de Comunicação Utilizados na Norma IEC 61850	69

3.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	70
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
4.MODELOS DE SIMULAÇÃO DE IED SEGUNDO A NORMA IEC 61850...73	
4.1 DESCRIÇÃO DE DISPOSITIVOS DO BARRAMENTO DE PROCESSO.....	73
4.1.1 Considerações sobre as Características de Comunicação dos Dispositivos do Barramento de Processos.	73
4.1.2 Modelos de Simulação dos Dispositivos do Barramento de Processo.75	75
4.2 DESCRIÇÃO DAS MENSAGENS DO BARRAMENTO DE PROCESSO.....	76
4.2.1 Formato das mensagens IEEE 802.3 e IEEE 802.1q.....	77
4.2.2 Formato das mensagens GOOSE	79
4.2.3 Formato das mensagens SMV	80
4.3 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO.....	82
4.3.1 Frameworks OMNeT++ e INET como Base para Plataforma de Simulação IEC-61850	82
4.3.2 Extensões feitas no INET para Suporte do Barramento de Processos IEC-61850.....	84
4.3.3 Modelo de Simulação do <i>Switch</i>	87
4.6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	89
4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
5.ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TEMPORAIS DO BARRAMENTO DE PROCESSO IEC 61850.....	95
5.1 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	95
5.1.1 Especificações e considerações do estudo de caso	95
5.1.2 Descrição dos eventos do estudo de caso.....	98
5.2 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TEMPORAIS DO BARRAMENTO DE PROCESSO IEC 61850.....	100
5.2.1 Definições e Conceitos	100
5.2.2 Análise temporal do caso de estudo T1-1.....	103
5.2.3 Política de Escalonamento das Mensagens em T1-1	105

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	111
6.DESENVOLVIMENTO DE TESTES E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	113
6.1 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	113
6.1.1 Comportamento estático do dispositivo MU.....	114
6.1.2 Comportamento estático do Dispositivo P&C.....	116
6.1.4 Comportamento Dinâmico dos IED.....	117
6.1.3 Comportamento do <i>Switch</i>.....	120
6.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO.....	126
6.2.1 Desempenho da Rede no Caso de estudo T1-1.....	126
6.2.2 Desempenho da Rede Económica no Caso de estudo T1-1.....	136
6.2.3 Escalabilidade da Rede T1-1.....	137
6.3 EXPERIMENTOS COM PROTÓTIPO DE SAS.....	143
6.3.1 Arquitetura do Laboratório.....	143
6.3.2 Ferramenta para Geração de Mensagens GOOSE e SMV.....	144
6.3.3 Caracterização dos IED.....	148
6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	153
7. CONCLUSÕES.....	155
7.1 REVISÃO DAS MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS.....	155
7.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO.....	155
7.3 PERSPECTIVAS FUTURAS.....	156
REFERÊNCIAS.....	157
ANEXO A – IEC 61850-2, GLOSSÁRIO.....	165
ANEXO B – ABSTRACT SYNTAX NOTATION ONE/BASIC ENCODING RULES (ASN-1/BER).....	167
ANEXO C – TESTE DE ESCALONABILIDADE COM MODELO DE TAREFAS ESPORÁDICAMENTE PERIÓDICAS.	171

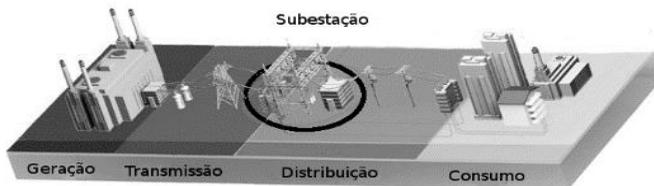
1. A NOVA GERAÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

O objetivo deste capítulo é mostrar uma visão panorâmica dos novos sistemas de automação para subestações elétricas e criar familiaridade com os tópicos abordados neste trabalho. Para isso, é apresentada uma contextualização sobre o estado tecnológico atual do setor elétrico. Na sequência, temas específicos sobre a norma IEC-61850 são introduzidos. Por fim, os desafios, os pressupostos teóricos, os objetivos e a organização deste trabalho são descritos.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A energia elétrica é um dos grandes pilares da nossa sociedade global. O sistema encarregado pelo fornecimento ininterrupto de fluido elétrico e de transportá-lo desde as usinas de geração, passando pelas redes de transmissão (subestações e redes de distribuição) até chegar aos centros de carga, é denominado *Sistema Elétrico de Potência* ou SEP (Lasseter, 2003). A Figura 1 ilustra os componentes de um SEP convencional.

Figura 1. Sistema elétrico de potência tradicional.



Fonte: (Moxa, 2013)

Como visto na figura, uma das partes fundamentais do SEP são as subestações, as quais são pontos do sistema onde a tensão da energia elétrica é manipulada até níveis considerados adequados para a utilização nos processos de transmissão, distribuição e consumo (Ramirez, 1991). As subestações podem ser classificadas em: subestações de transmissão/elevação, subestações de distribuição/diminuição e subestações de manobra/comutação (USDA, 2001).

Devido a diversos fatores como: o aumento na demanda de energia elétrica, o incremento na capacidade de geração e as dificuldades na expansão dos subsistemas de transmissão, um SEP pode operar no limite da sua capacidade, aumentando o risco de “apagões” durante eventuais situações de sobrecarga e perturbação (De Castro, 2012). Conseqüentemente, é necessário que os diferentes subsistemas do SEP, em particular as subestações, disponham de esquemas especiais de controle e supervisão que permitam atender eventos, a tempo de evitar uma catástrofe, como seria o caso de “*blackouts*” (colapso total do sistema) e as implicações sociais/jurídicas que estes acarretam.

Neste contexto, a confiabilidade do sistema de comunicação (encarregado de transmitir as informações dos eventos que acontecem no SEP até os centros de controle locais ou regionais) ganha grande importância, especialmente na operação em tempo real do sistema elétrico de energia (Skeie, 2002).

1.1.1 *Smart Grid*

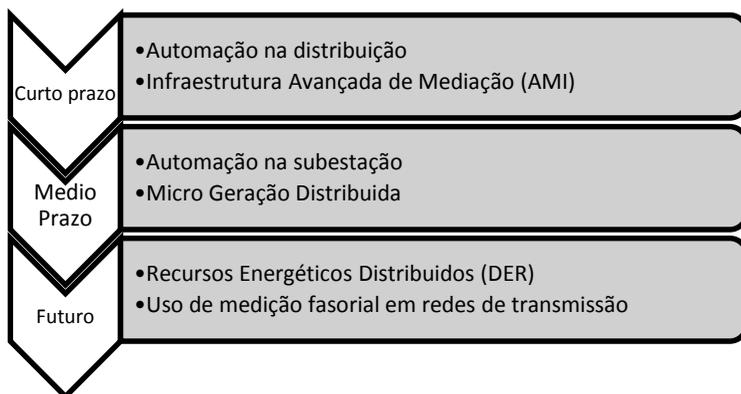
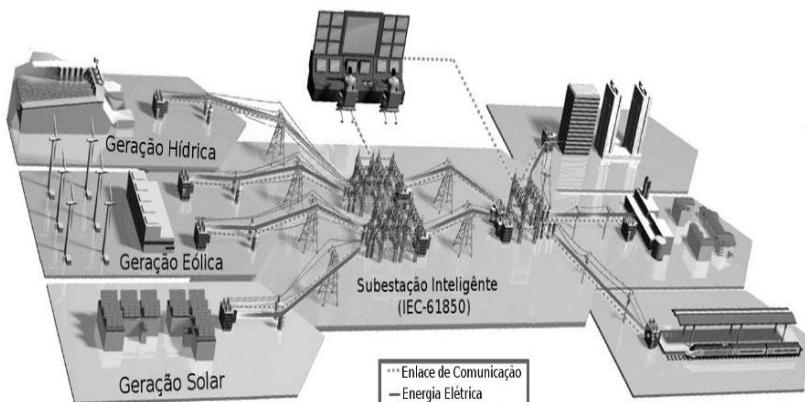
Existe um consenso nos diferentes agentes do setor elétrico (geradores, distribuidores, comercializadores, etc.) sobre a necessidade de executar uma mudança profunda no atual Sistema Elétrico de Potência. Sob o ponto de vista técnico, o objetivo é contar com um SEP moderno, que atenda à necessidade de gerar energia elétrica a partir de fontes renováveis e mantenha (ou melhore) a estabilidade elétrica do sistema atual (Miao, 2012). Esse requisito é suportado por acordos internacionais, como o chamado 20-20-20 da União Europeia, que expressam a preocupação existente diante das mudanças climáticas e problemas ambientais do planeta. Dessa forma, a modernização dos sistemas de energia elétrica deve-se tornar uma realidade nos próximos anos (Lee; Shon, 2010).

A visão desse SEP moderno é conhecida como “*Smart Grid*” ou **Rede Elétrica Inteligente** (REI, pela sua tradução do inglês) e é definida pelo *Electric Power Research Institute (EPRI)* como um sistema elétrico de potência completamente automático que permite o fluxo bidirecional de eletricidade e informação entre clientes e fornecedores do serviço de energia elétrica (Longo et al., 2013).

Descentralizando a tomada de decisões através de equipamentos que embarcam microprocessadores e tecnologias de comunicação, o *Smart Grid* permite o gerenciamento do SEP de forma segura e sob a demanda do mercado, agindo também como interface entre os diferentes atores do sistema de potência (Sollecito, 2009).

Na parte superior da Figura 2 apresenta-se a visão do EPRI sobre a modernização do SEP e a sua consequente evolução no “*Smart Grid*”. Já na parte inferior da mesma Figura, apresenta-se a rota tecnológica que deve ser seguida no Brasil (definida pela Agencia Nacional de Energia Elétrica - ANEEL) para obter um SEP de acordo com esta visão.

Figura 2. Arquitetura de um “*Smart Grid*” segundo EPRI.



Fonte: (Electric Power Research Institute, 2015), (Lima, 2013).

No Brasil, a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL é o documento principal para o estabelecimento do “*Smart Grid*” no país. No documento se definem as “condições gerais para o acesso de micro

geração e mini geração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica” (ANEEL, 2012).

É importante salientar que a adição das redes de comunicação ao sistema elétrico tradicional, especialmente nas subestações, tem permitido o aprimoramento de aplicações para proteção de equipamentos elétricos e o surgimento dos sistemas digitais para automação de subestações.

1.1.2 Interoperabilidade e Norma IEC-61850

Da mesma forma que ocorre na maioria dos setores industriais, os Sistemas de Automação para Subestações (SAS) são formados por equipamentos providos por diferentes fabricantes. O êxito do SAS moderno depende do sistema de comunicação utilizado para integrar vários dispositivos de proteção, controle e monitoramento num mesmo ambiente.

Com a publicação da norma IEC-61850 (2003), foram estabelecidas as diretrizes para atingir a **interoperabilidade**¹ nas redes de comunicação do SAS (Zhao, 2013). O aporte mais relevante desta norma foi a definição do **modelo de informação**, o qual consiste em separar as funções complexas dos dispositivos da rede de comunicação ou IED (*Intelligent Electronic Devices*), em funções mais simples, capazes de conter alguma informação útil para o SAS. 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).

Os LD são objetos encarregados de fornecer **serviços de comunicação** ao sistema. Os serviços de comunicação podem ser definidos como as funções de comunicação (leitura/escritura de dados, requisição de relatórios de eventos, relatório de operação, etc.) que possuem os IED para que outros dispositivos possam acessar as informações nele contidas e vice-versa (Pham, 2013).

Em conclusão, a norma define os dados que devem ser comunicados (modelo de informação) e a forma em que estes dados devem ser comunicados (serviços de comunicação). Adicionalmente a norma define dois ambientes de comunicação: O **barramento de estação**, que permite a comunicação entre dispositivos de supervisão e comando, e o **barramento de processos**, que permite a comunicação entre dispositivos de comando e medição de grandezas elétricas.

¹ No contexto do SAS, a Interoperabilidade é definida como capacidade de dois ou mais IED do mesmo fabricante, ou de diferente fabricante, para trocar informações e utilizá-la na correta execução de funções do SAS (IEC-61850-2, 2003).

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A norma IEC-61850 define os requisitos temporais das mensagens envolvidas no processo comunicação entre IED, portanto é importante estudar a sua aplicação na operação de sistemas de proteção elétrica considerando o tempo de resposta dessas mensagens (Skei, 2002) (Mackiewicz, 2006).

Além disso, existe a necessidade de testar, de forma segura e confiável, equipamentos que suportem a norma (Zhao, 2013). Nesse sentido, testar equipamentos em ambientes reais e de grande porte só é uma prática recomendada quando há certeza do correto funcionamento dos equipamentos. Assim, nas fases de desenvolvimento e treinamento é desejável contar com ferramentas economicamente acessíveis e que permitam o teste de equipamentos em ambientes controlados ou simulados (Souza, 2010).

1.2.1 Perguntas da Pesquisa

Seguindo as necessidades existentes nos SAS com relação à norma IEC-61850 (viabilidade em aplicações de proteção e desenvolvimento de ferramentas de teste e treinamento), surgem algumas perguntas que buscam-se responder com o presente trabalho.

Estas perguntas podem ser separadas em dois grupos seguindo uma divisão coerente com as necessidades supracitadas: Um grupo faz referência à necessidade de estudar a correção temporal das mensagens que trafegam pelo barramento de comunicação do SAS (especificamente no barramento de processos); enquanto o outro grupo faz referência às ferramentas que devem ser utilizadas para executar testes de equipamentos do SAS.

Perguntas sobre estudo da rede de comunicação do SAS:

- Que características devem ter as mensagens do barramento de processos do SAS para não violar os requisitos de desempenho temporal definidos pela norma IEC-61850?
- Qual é o impacto das mensagens não relativas à operação do SAS (tráfego de fundo) no barramento de processos proposto pela norma IEC-61850?
- É possível utilizar técnicas analíticas como ferramenta para prever o comportamento de equipamentos utilizados em sistemas de automação de subestações?

- Sob quais condições, uma rede de comunicação para SAS não atenderia os requisitos temporais definidos pela norma?

Perguntas sobre ferramentas de teste e treinamento:

- Em tempo de projeto dos modelos de simulação dos diferentes IED, qual deve ser o nível de detalhe para obter uma representação válida dos equipamentos reais?
- Quais seriam os casos representativos de sistemas de proteção e controle de subestações a serem utilizados como cenários para estudo do barramento de comunicação em SAS?

1.4 OBJETIVOS E METODOLOGIA

Em concordância com os desafios lançados anteriormente, define-se o objetivo principal e os objetivos específicos deste trabalho. Na sequência será apresentada a metodologia utilizada para atingir estes objetivos.

Objetivo Geral:

Modelar os componentes de uma rede de comunicação baseada no barramento de processos definido pela norma IEC-61850 e estudar o comportamento dessa rede visando determinar o cumprimento de requisitos temporais definidos para aplicações proteção de subestações.

Objetivos Específicos:

- Definir os detalhes que devem ser desconsiderados e aqueles que devem ser modelados para obter uma representação válida dos IED que fazem parte do SAS.
- Definir um cenário representativo da operação de subestações que permita tanto a validação dos modelos quanto o estudo do comportamento da rede de comunicação do SAS através de simulações.
- Estudar o comportamento de equipamentos reais em ambiente controlado para verificar os resultados obtidos nas etapas de simulação.
- Entender o comportamento dos dispositivos de comutação de mensagens (*switches*) perante situações de alto volume de tráfego no barramento de comunicação.

- Definir e implantar um laboratório que sirva como início de uma linha de pesquisa em Sistemas de Automação de Subestações dentro do Departamento de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.

Seguindo o estabelecido no objetivo geral, pode-se dizer que esta pesquisa é de natureza **descritiva**.

Para as primeiras atividades será considerado um procedimento baseado em **análise bibliográfica**, onde serão estudados trabalhos sobre modelagem de IED e simulação de redes de sistemas de comunicação em subestações. Utilizando esta literatura serão produzidos modelos que representem equipamentos reais. Da mesma forma, serão obtidos cenários característicos dos sistemas de proteção e controle de subestações.

Na sequência, através de simulações, será utilizado um **procedimento de levantamento** para obter critérios de avaliação de desempenho da rede de comunicação e também para validar os modelos e os cenários obtidos no primeiro procedimento.

Finalmente, será utilizado um **procedimento experimental** onde serão utilizados equipamentos reais em conjunto com os modelos obtidos nos procedimentos anteriores com o fim de estudar, em ambiente controlado, o comportamento da rede de comunicação do SAS.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Tendo definido tanto os objetivos quanto a metodologia a ser seguida no projeto, este documento é estruturado em seis capítulos incluindo o capítulo inicial.

O **Capítulo 2, SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO PARA SUBESTAÇÕES**, apresenta os conceitos básicos sobre redes de comunicação industrial que serviram de inspiração para o desenvolvimento da norma IEC-61850. Neste capítulo se apresenta também o escopo deste trabalho.

O **Capítulo 3, IEC-61850: ESTRUTURA BÁSICA DE COMUNICAÇÃO PARA SUBESTAÇÕES E ALIMENTADORES**, discute as características relevantes da norma IEC-61850. Temas como os princípios de modelagem de informação, os serviços de comunicação e o mapeamento desse modelo em protocolos de comunicação concretos (como MMS e Ethernet) fazem parte da discussão deste capítulo.

O **Capítulo 4, MODELOS DE SIMULAÇÃO DE IED SEGUNDO A NORMA IEC 61850**, apresenta a descrição dos dispositivos que fazem

parte do barramento de comunicação da subestação e que devem ser modelados para atingir os objetivos deste trabalho.

No **Capítulo 5**, *ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TEMPORAIS DO BARRAMENTO DE PROCESSO IEC 61850*, Inicialmente é apresentado o contexto operacional sobre o qual serão executadas as validações dos modelos propostos. Na sequência, é apresentada a utilização de uma ferramenta matemática para analisar o comportamento temporal do barramento de processos proposto pela norma.

No **Capítulo 6**, *DESENVOLVIMENTO DE TESTE E ANALISE DE RESULTADOS*, apresentam-se os resultados das simulações executadas com os modelos, apresenta-se também a infraestrutura utilizada para testar alguns IED comerciais em ambientes controlados. A utilização de ferramentas com possibilidade de inserir mensagens na rede de comunicação dos IED (técnica *Hardware In The Loop - HIL*), também é tratada neste capítulo.

Por fim, no **Capítulo 7**, discutem-se os resultados obtidos nos capítulos anteriores e apresentam-se as conclusões do trabalho.

Os capítulos apresentam uma revisão bibliográfica, as quais servem tanto para destacar os trabalhos existentes referentes ao tema abordado no capítulo quanto para suportá-lo teoricamente. A divisão da revisão bibliográfica obedece à clara categorização existente na literatura encontrada sobre o tema de pesquisa. Resumidamente:

Teoria e estudo dos princípios da norma IEC-61850 – Nestes trabalhos são discutidos os princípios da modelagem de informação proposta pela norma assim como as vantagens e desvantagens na sua utilização. A maioria dos trabalhos encontrados neste sentido foram realizados entre os anos 2002 e 2006 quando a norma IEC-61850 estava na etapa de divulgação.

Modelagem e Simulação de equipamentos e redes de acordo com a norma IEC-61850 – O tópico central destes trabalhos é o estudo e avaliação, em ambientes virtuais, de alguma característica da norma. A geração de massa crítica em relação ao uso da norma IEC-61850 também faz parte das preocupações dos trabalhos que aparecem nesta categoria. Estes trabalhos têm data de realização a partir do ano 2003, demonstrando que já desde o início da publicação da norma existiam interesses em relação aos requisitos de comunicação ali propostos. Atualmente seguem sendo publicados trabalhos neste sentido, incluindo o apresentado neste documento.

2. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO PARA SUBESTAÇÕES

Neste capítulo são introduzidos alguns conceitos importantes para o estudo e entendimento dos requisitos de comunicação dos sistemas de automação para subestações. Inicialmente, os componentes dos SAS são apresentados. Em seguida, uma revisão sobre a evolução das redes de comunicação industriais é utilizada como introdução para a descrição do surgimento da norma IEC-61850. Finalmente, a visão do barramento de processos desta norma é apresentada, definindo o escopo deste trabalho.

2.1 SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO PARA SUBESTAÇÕES

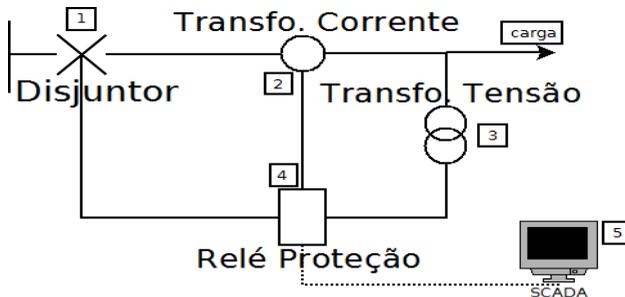
Os sistemas elétricos de potência atuais são considerados a maior máquina construída pelo homem, não só pela dimensão geográfica que ocupam, mas pela sincronia com que trabalham. Manter tamanha máquina em operação, sem danificá-la, não é uma tarefa trivial e dividir o SEP em regiões através de subestações têm sido o modo mais eficiente para executar esta tarefa (Kundur, 1993).

Os avanços tecnológicos junto ao desejo de contar com energia elétrica altamente disponível, diminuir o tempo de restauração do serviço após uma falha e reduzir o custo de mão de obra, fizeram com que as concessionárias e investidores do setor elétrico buscassem automatizar as funções executadas nas subestações. A automação de subestações nasce da interseção de três disciplinas: o controle, a proteção de sistemas elétricos e os sistemas de comunicação.

Os sistemas de controle no contexto das subestações são definidos como aqueles que fornecem os meios para monitorar e comandar a operação da subestação. Já os sistemas de proteção cuidam dos equipamentos elétricos tanto de falhas mecânicas quanto de eventuais condições anormais no SEP, como é o caso de um curto circuito. Por último, os sistemas de comunicação são aqueles que permitem a transmissão de informações entre entidades do SEP para efeitos de proteção e controle (AEMC, 2014)(IEC-61850-2, 2003).

Embora a filosofia dos sistemas de automação de subestações não tenha mudado muito ao longo do tempo, a tecnologia utilizada tem evoluído constantemente (Leelaruji, 2011). Na Figura 3 é apresentado o esquema básico do SAS.

Figura 3. Diagrama de sistema de proteção e controle de subestações.



Fonte: (Netto 2012)

Como descrito na Figura 3, o SAS é formado principalmente por: 1 – Disjuntor, 2 – Transformador de corrente, 3 – Transformador de tensão, 4 – Relé de proteção e 5- Sistema Supervisório.

Os **transformadores de corrente (TC) e de tensão (TV)**, também chamados de **transformadores de instrumentação (TI)**, têm sido utilizados como o instrumento padrão para a medição das grandezas elétricas fundamentais desde o início da construção do SEP (Netto, 2012). Os TI convencionais (os mais usados atualmente) aproveitam princípios indutivos e capacitivos para obter as medidas de tensão e corrente. A informação extraída deles é um sinal analógico que, conseqüentemente, precisa ser digitalizado e processado para que possa ser utilizado nos sistemas de comunicação dos SAS modernos.

Recentemente têm surgido TI chamados de não convencionais (NCIT – *Non-Convventional Instrumentation Transformers*) por utilizar princípios óticos e eletrônicos para obter a medida de tensão e corrente do SEP (Netto, 2012). A informação obtida deles é um sinal digital que pode ser transmitido diretamente através de redes de comunicação para os demais elementos SAS.

Apesar de oferecerem algumas vantagens para os sistemas de automação, o setor elétrico não tem incorporado massivamente os NCIT devido à fragilidade da suas interfaces e à falta de robustez do seu sinal de saída frente ao ambiente hostil (Interferência Eletromagnética - EMI) apresentado nas subestações de alta tensão e média tensão (Ingram, 2013).

Por outro lado, os **relés de proteção** têm sido utilizados por mais de 100 anos para proteger equipamentos elétricos. Os relés de proteção utilizam as grandezas elétricas obtidas dos TI para estimar possíveis perturbações no SEP e acionar disjuntores para isolar elementos faltosos da rede elétrica (Zhao, 2012).

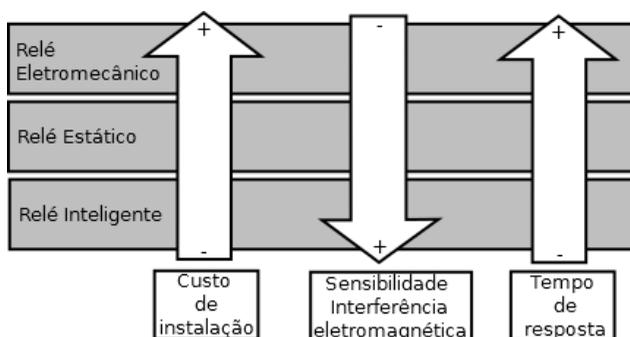
A tecnologia utilizada nos relés de proteção tem evoluído significativamente desde meados do século vinte. A primeira geração de relés de proteção (raramente usados hoje em dia), foram chamados de relés eletromecânicos. São construídos predominantemente por elementos mecânicos e realizam a lógica de proteção baseados no movimento relativo das suas partes, o qual é causado pelo efeito das grandezas elétricas nos seus circuitos de entrada.

Na sequência apareceram os relés estáticos, chamados assim por substituírem os elementos móveis do relé eletromecânico por dispositivos eletrônicos como tiristores e transistores (McDonald, 2012).

A última geração de relés de proteção é conhecida como relés digitais ou *Intelligent Electronic Device* (IED). Estes relés utilizam lógica embarcada em microprocessadores para executar a sua tarefa fundamental. Pela sua maior capacidade de processamento, os IED conseguem agrupar num único equipamento funções que tradicionalmente seriam executadas por equipamentos separados. Além disso, os IED oferecem funções de comunicação digital para integrar outros dispositivos instalados no SAS em aplicações de proteção especiais, as quais não seriam viáveis com as tecnologias anteriores. Como exemplo, pode-se citar as aplicações de proteção/controle remoto e *data logging* (Netto, 2012).

Na Figura 4, apresenta-se um comparativo das diferentes tecnologias de relés de proteção.

Figura 4. Comparativo das diferentes tecnologias de relés.



Fonte: (Netto, 2012)

2.2 REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL COMO MOTIVAÇÃO PARA IEC-61850

Com o surgimento das redes de comunicação, a informatização tem se inserido cada vez mais nas atividades diárias dos seres humanos e, junto com a massificação da tecnologia, permitiram definir as redes de comunicação como um sistema ubíquo (Coulouris, 2012).

Os setores comerciais e industriais têm aproveitado as redes e sistemas de comunicação para aprimorar os seus produtos e otimizar a prestação dos seus serviços. Nesta seção se apresenta a evolução das redes de comunicação industriais destacando a forma em que estes avanços impulsionaram o surgimento da norma IEC-61850 para automação de subestações.

2.2.1 Hierarquia das Redes Industriais

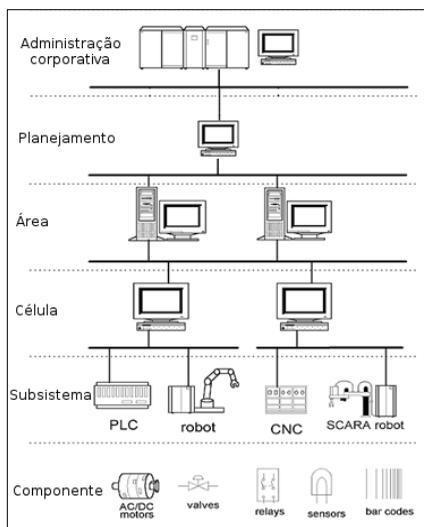
A automatização das atividades fabris iniciou-se com a utilização de redes de comunicação para facilitar tarefas administrativas nos ambientes de escritórios. O sucesso conseguido nestes cenários fez aumentar o desejo por automatizar também as atividades mais próximas dos processos de fabricação (Rabelo, 2012). Assim, na década de 1980, existiam propostas para automatizar as plantas industriais utilizando as mesmas tecnologias empregadas para automação de escritórios. No entanto, algumas características dos sistemas de produção industrial como: condições ambientais hostis, comportamento temporal determinístico e descentralização da capacidade decisória; fizeram com que as tecnologias para automação de escritórios não fossem bem adaptadas para o cenário de chão de fábrica (Djiev, 2002).

Com o intuito de definir as características que devem ter as redes de comunicação nos diferentes ambientes industriais, criou-se uma hierarquia do sistema de automação conhecida como CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) (Rabelo, 2012).

Na Figura 5, apresenta-se a proposta do modelo CIM onde se visualizam 6 níveis diferentes de automação, estruturando o sistema de comunicação fabril em sub redes e agrupando os equipamentos por setor e funcionalidade.

No **nível de componente**, por exemplo, estão localizados os atuadores e sensores intimamente ligados ao processo de fabricação. Aquisição de dados, monitoramento, emissão de alarmes e atuação são algumas das funções que corresponde a este nível hierárquico.

Figura 5. Hierarquia do sistema de automação fabril segundo modelo CIM.



Fonte: (Djiev, 2002)

Um nível acima do nível de componente se posiciona o **nível de subsistema**. Nele se encontram os dispositivos para controle dos equipamentos do nível inferior. Detecção de condições de emergência e realização de auto diagnósticos são algumas das funções definidas neste nível. Subindo de nível na hierarquia CIM se encontra o **nível de célula**, no qual é executado o controle supervisório dos equipamentos do nível de subsistema. Funções de otimização, supervisão e controle em malha fechada da produção são executadas neste nível. Finalmente, os três níveis superiores do modelo CIM têm funções administrativas e de planejamento da produção.

É importante salientar que um alto volume de mensagens relativamente curtas (da ordem das centenas de bytes) transmitidas entre um número elevado de equipamentos, é característica da comunicação nos níveis hierárquicos inferiores do CIM (Yadav, 2010). No Quadro 1 é apresentada uma comparação qualitativa das características dos níveis hierárquicos descritos anteriormente.

Quadro 1 - Comparação entre os diferentes níveis hierárquicos CIM.

<i>Nível</i>	<i>Numero de estações/segmento</i>	<i>Hostilidade do meio</i>	<i>Tráfego médio (pacotes/s)</i>	<i>Tamanho médio dos dados (Bytes)</i>
<i>Componente</i>	Mais do que 1000	Muito Hostil	Mais do que 1000	Aprox 500
<i>Unidade</i>	Mais do que 500	Muito Hostil	Mais do que 1000	Aprox 1500
<i>Célula</i>	Mais do que 200	Moderado	Aprox. 500	Aprox 1500
<i>Área</i>	Aprox. 100	Moderado	Aprox. 500	Mais do que 1000
<i>Planejamento</i>	Aprox. 50	Ambiente Controlado	Aprox. 100	Mais do que 1000
<i>Administração</i>	Aprox. 10	Ambiente Controlado	Aprox. 100	Mais do que 1000

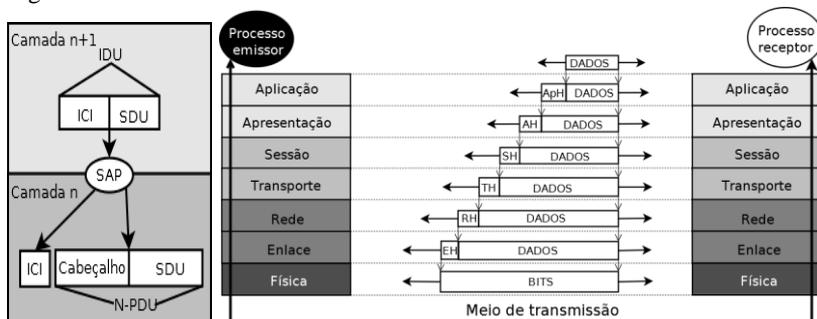
Fonte: (Stemmer, 2010).

2.2.2 O Modelo OSI como Referência para Arquitetura de Redes

Com a motivação de tornar abertos os sistemas de comunicação empregados tanto na fabricação de produtos quanto na prestação de serviços, em meados da década de 1970, iniciou-se na ISO (*International Standardization Organization*) a definição de um modelo de referência para arquiteturas de redes de comunicação que permitisse a interconexão de equipamentos heterogêneos. O resultado foi um modelo estruturado por camadas no qual se definem os serviços que devem ser oferecidos nas diferentes etapas da transferência de dados em redes de comunicação (Kurose, 2013).

O modelo proposto pela ISO recebeu o nome de Modelo de Referência para a Interconexão de Sistemas Abertos (RM-OSI, *Reference Model for Open System Interconnection*), o qual está organizado numa estrutura monolítica onde o nome de cada uma das camadas indica o tipo de serviço fornecido: Aplicação (7), Apresentação (6), Sessão (5), Transporte (4), Rede (3), Enlace (2), Física (1). As camadas inferiores (camadas 1 e 2) têm funções para transmissão de dados através do meio físico que liga os diferentes nós da rede. Já as camadas superiores têm funções relacionadas com: roteamento de mensagens até o seu destino, estabelecimento de conexão fim a fim e interação entre os usuários finais e o sistema de comunicação (Tanenbaum, 2012).

Figura 6. Modelo de referência OSI e conceitos associados.



Fonte: (Zhao, 2012)(Stemmer, 2010).

Conforme apresentado na Figura 6, o modelo OSI define duas formas de comunicação: Comunicação física (ou vertical) e Comunicação lógica (ou horizontal). Apesar da comunicação ser de fato executada verticalmente entre camadas do mesmo nó, cada uma das camadas enxerga a comunicação como sendo horizontal, isso é se estabelecendo diretamente entre camadas pares de nós diferentes. A comunicação horizontal é conseguida por meio da inserção de cabeçalhos (na Figura 6 AH, SH, etc.) (Forouzan, 2007). Por sua vez, a comunicação vertical se dá por meio de *SAP* (*Service Access Points*) o qual é o ponto de acesso aos serviços oferecidos por uma camada do modelo OSI. Durante a transmissão de dados, uma camada N+1 só poderá acessar os serviços da camada N (e ao contrário no processo de recepção de dados) através dos *SAP*. Dessa maneira, os *SAP* definem as interfaces entre camadas do modelo *OSI* (Stemmer, 2010).

O formato utilizado para repassar os dados entre as camadas durante a comunicação vertical, é conhecido como *IDU* (*Interface Data Unit*). As *IDU* são formadas por uma parte denominada *SDU* (*Service Data Unit*) e por uma parte denominada *ICI* (*Interface Control Information*). O *SDU* nada mais é do que a informação a ser transmitida via rede para a camada par do nó receptor (comunicação horizontal). Já o *ICI* contém informações que ajudam na gestão dos dados por parte da camada inferior que os recebe (por exemplo tamanho do *SDU*, prioridade, etc.). O *SDU* acrescentado dos cabeçalhos utilizados para comunicação horizontal é chamado de *PDU* (*Protocol Data Unit*).

O modelo OSI é um modelo abstrato, não define nem os protocolos nem os formatos das mensagens utilizadas para comunicação. No entanto, o fato de estruturar a tarefa de comunicação monoliticamente por camadas, definindo os seus serviços e funções, possibilita aos

engenheiros projetar redes de comunicação flexíveis sob o ponto de vista de desenvolvimento (Forouzan, 2007).

É importante destacar que, além do modelo de referência OSI, existem outros modelos de arquitetura de redes, entre os quais se encontra o modelo TCP/IP. Apesar de a norma IEC-61850 utilizar tanto o RM-OSI quanto o TC/IP para modelar a sua arquitetura de rede, neste texto não será abordado o modelo TCP/IP para manter uniformidade e clareza nos conceitos apresentados (IEC-61850-8-1, 2003).

2.2.3 Padronização das Redes Industriais

Após a definição do modelo RM-OSI, o passo seguinte na obtenção de sistemas de comunicação abertos foram os chamados projetos de padronização de redes industriais (Sillman, 2013). Esses projetos têm por objetivo definir os protocolos que devem ser utilizados em cada uma das etapas do processo de comunicação, atendendo às necessidades dos diferentes ambientes das instalações fabris. Entre as primeiras iniciativas para este propósito se destacam: o Projeto Proway, o Projeto IEEE 802 e o Projeto MAP (Stemmer, 2010).

O Projeto MAP (*Manufacturing Automation Protocol*) foi uma iniciativa da *General Motors* para se liberar das decisões tecnológicas e comerciais dos seus fornecedores (Stemmer, 2010). Tendo escolhido o RM-OSI como a arquitetura de rede padrão, o objetivo do projeto MAP consistiam em selecionar os protocolos a serem implementados em cada uma das camadas de comunicação para assim obter redes que permitissem a comunicação funcional entre equipamentos de diversos fabricantes. No Quadro 2 se apresentam os protocolos escolhidos pelo projeto MAP na sua versão 3.0.

Note-se no Quadro 2, na camada de aplicação foi escolhido o protocolo **MMS** (*Manufacturing Message Specification*) que tem por objetivo definir serviços de comunicação que permitem o acesso a recursos existentes em sistemas abertos (Stemmer, 2010). Os serviços de comunicação especificados pelo MMS são o suficientemente genéricos como para cobrir uma grande variedade de necessidades de comunicação no ambiente industrial. O carregamento remoto de programas, o controle a distância de equipamentos e a elaboração de relatórios de operação são alguns dos serviços especificado pelo MMS (Falk, 95). Entre outras características, o MMS é um protocolo orientado a objetos e os seus serviços estão baseados no paradigma de comunicação Cliente-Servidor (Sillmann, 2013).

Embora a proposta MAP tenha sido pensada para atender as necessidades de comunicação em vários setores industriais, a sua arquitetura de sete camadas introduz nas mensagens (por conta dos cabeçalhos) uma quantidade grande de bits (*overhead*) que fazem dela uma escolha indesejável para aplicações nos níveis mais baixos da hierarquia dos sistemas de automação industriais.

Como foi visto anteriormente, segundo a hierarquia CIM, é nos níveis de automação mais próximos do chão de fábrica onde são utilizados mensagens curtas, com alto volume de transmissão e com necessidade de alto determinismo temporal (Quadro 1). A solução para este problema foi a definição de uma nova arquitetura de rede mais enxuta por meio da exclusão das camadas: Rede (3), Transporte (4), Sessão (5) e Apresentação (6). Esta nova proposta foi chamada de **MiniMAP** e está descrita na Figura 7.a. A vantagem de não contar com as quatro camadas excluídas é a diminuição do *overhead*, garantindo assim tempos de respostas mais adequados em comparação aos obtidos com a proposta MAP original. No entanto, na proposta MiniMAP é preciso utilizar protocolos mais sofisticados para compensar funcionalidades de roteamento e transporte perdidas na simplificação da arquitetura (Sillmann, 2013).

Quadro 2. Especificação de protocolos segundo projeto MAP.

<i>Camada</i>	<i>Protocolo</i>
<i>Aplicação</i>	<i>Manufacturing Message Specification (MMS).</i>
<i>Apresentação</i>	Abstract Syntax Notation (ASN)
<i>Sessão</i>	Sessão Orientada à Conexão (ISO 8326)
<i>Transporte</i>	Transporte Orientado à Conexão (ISO 8072)
<i>Rede</i>	Rede Não Orientada à Conexão (ISO 8348)
<i>Enlace</i>	Ethernet/Token Ring (IEEE 802.3/IEEE 802.4)
<i>Física</i>	Ethernet

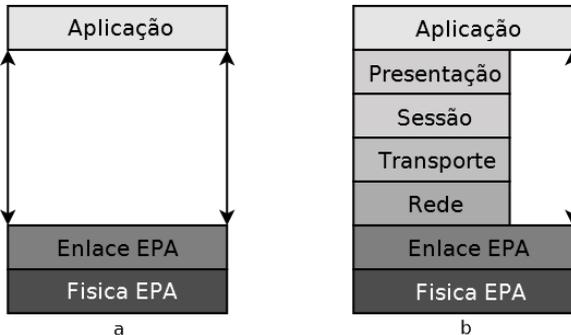
Fonte: (Stemmer, 2010).

A proposta MiniMAP não é compatível com a proposta MAP original, por isso estas duas propostas foram combinadas para criar uma nova arquitetura chamada de **MAP/EPA** (*Enhanced Performance Architecture*), descrita na Figura 7.b. Nessa arquitetura, os processos da camada de aplicação tem a opção de enviar seus dados através da pilha de

comunicação de sete camadas ou através da pilha de comunicação de três camadas. A escolha entre as duas camadas depende dos requisitos temporais na entrega das mensagens (Stemmer, 2010).

Com o decorrer do tempo, a proposta MAP (MiniMAP e MAP/EPA) foi perdendo sua presença no mercado, porém a importância do seu estudo está no seu valor histórico como um dos primeiros grandes esforços para a padronização de redes de comunicação, servindo como inspiração para a definição de diversas arquiteturas de rede (incluindo a norma IEC 61850) que tem como objetivo atender os requisitos de comunicação dos diferentes ambientes fabris.

Figura 7. Arquiteturas de camadas de rede derivadas do projeto MAP.



Fonte: (Sillmann, 2013)

Até agora foi descrita a hierarquia das redes industriais proposta pelo CIM, a qual serve para identificar as necessidades e características da comunicação em diferentes setores fabris. Na sequência, foi apresentado o RM-OSI como um modelo abstrato, organizando monoliticamente por camadas, que especifica as funções e serviços de comunicação para cada uma das etapas da transferência de informação entre entidades conectadas em rede. Entretanto, especificar as funções de cada etapa da comunicação através da utilização do modelo OSI, não é suficiente para obter uma rede que permita a comunicação entre equipamentos de diversos fabricantes. Para isso, é preciso estabelecer acordos sobre:

- O **modelo de dados**, isso é as informações que têm que ser comunicadas entre entidades.

- Os protocolos de comunicação utilizados em cada etapa do processo de comunicação, isso é os **mecanismos** utilizados para que estas informações sejam comunicadas.

A norma IEC-61850 contém o acordo ao qual as empresas do setor elétrico tem chegado sobre estes dois aspectos, necessários para a formação de redes de comunicação interoperáveis em SAS. Na sequência é apresentado o contexto histórico no qual surgiu a norma IEC-61850.

2.3 SURGIMENTO DA NORMA IEC-61850

Ao redor do ano 1986, os mais influentes fabricantes de produtos para o setor elétrico decidiram tornar abertos os sistemas de comunicação utilizados nos SAS (McDonald, 2012). Trabalhos anteriores, como o projeto CIM, o projeto RM-OSI e o projeto MAP/EPA serviram como base para a definição de uma norma específica dos sistemas de comunicação utilizados em subestações de energia elétrica.

Os primeiros trabalhos neste sentido foram dirigidos pelo EPRI, que em 1991 publicou a primeira versão da chamada **UCA** (*Utility Communications Architecture*). No documento publicado como resultado destes esforços, se esboça uma arquitetura de comunicação que define protocolos de comunicação para cada camada do modelo de referência OSI (Ingram, 2013).

No entanto, a definição de protocolos não foi suficiente para atingir o objetivo da interoperabilidade, pois, como apresentado anteriormente, faltava por especificar o modelo de informação (as informações a serem transmitidas). Além disso, o escopo da norma (os níveis hierárquicos do sistema entre os que se dá a comunicação) não estava bem definido (McDonald, 2012).

Com esses desafios ainda pendentes, o EPRI deu continuidade no trabalho e no ano 1997 completou a segunda versão da sua arquitetura, a qual é conhecida como UCA 2.0. O aporte feito nesta segunda etapa, em relação à UCA original, foi a definição de modelos de dados e a definição de modelos de serviços abstratos de comunicação para as aplicações do SAS (Mackiewicz, 2006). Além disso, a UCA 2.0 definiu dois escopos para a comunicação em subestações: um para a comunicação entre centros de controle (fora da subestação) e outra para a comunicação entre dispositivos de campo (dentro da subestação, no nível de processo) (Netto, 2012).

Paralelo a todo o processo do EPRI, a “*International Electrotechnical Commission*” (IEC) iniciou trabalhos visando a

padronização de interfaces de comunicação para dispositivos de tele controle em subestações, as quais ainda não tinham sido definidas pela UCA 2.0. Esses esforços foram condensados na norma IEC 60870.

Nesse cenário, em 1994 criou-se uma força tarefa composta por especialistas nas duas propostas existentes (UCA 2.0 e IEC 60870) com o objetivo de integrá-las e formar um padrão único que atendesse os requisitos das aplicações de automação e controle nas subestações de energia elétrica e em especial que permitisse a interoperabilidade entre IED de diferentes fabricantes (Brand, 2004).

O grupo de trabalho 10 do Comitê Técnico 57 da IEC (TC57/WG10) foi o encarregado para a execução desta tarefa. Os conceitos e fundamentos estabelecidos nas duas versões da UCA se tornaram a base do trabalho, o qual foi materializado na primeira versão da norma IEC 61850 publicada em 2003 (MacKiewicz, 2006).

2.3.1 Barramentos de Comunicação Segundo a Norma IEC 61850

Além do modelo de informação e dos serviços de comunicação, a norma IEC-61850 propõe uma arquitetura de rede de comunicação dividida em dois níveis. A divisão foi feita segundo as operações realizadas nos diferentes setores da subestação (IEC-61850-7-1, 2003).

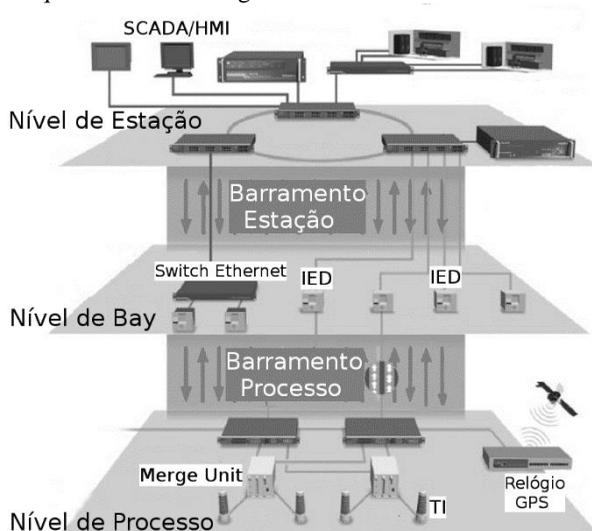
O nível mais elevado é chamado de **barramento de estação** e é utilizado para as operações de monitoramento e controle das subestações. É no barramento de estação onde acontece a comunicação entre os operadores da subestação (sistema supervisório) e os relés de proteção (Ver Figura 3).

O nível mais baixo é chamado de **barramento de processo** e foi planejado para substituir as tradicionais conexões cabeadas utilizadas entre os TI e os IED, diminuindo assim os custos de construção e manutenção de subestações (Moxa, 2012).

Coincidindo com a descrição anterior, a Figura 8 apresenta a visão da rede de comunicação proposta pela norma IEC-61850. Com a divisão da rede de comunicação em 2 níveis, aparecem 3 ambientes de automação parecidos aos níveis inferiores propostos pelo CIM. Comparando o CIM com a proposta da norma IEC-61850 pode-se ver que o nível de componente é similar ao chamado **nível de processo**, onde se encontrariam equipamentos como: seccionadores, disjuntores, TC/TV, etc.

O nível de subsistema seria o paralelo do chamado **nível de “Bay”**², onde se encontrariam os diferentes IED e equipamentos lógicos de controle e proteção. Por fim, o nível de célula teria seu equivalente no chamado de **nível de estação** que contém os equipamentos do centro de controle que executam o sistema supervisório da subestação. Dessa forma ficam definidas as características da comunicação entre entidades do mesmo nível e entre entidades de níveis diferentes do SAS.

Figura 8. Arquitetura de SAS segundo IEC-61850.



Fonte: (Moxa, 2012)

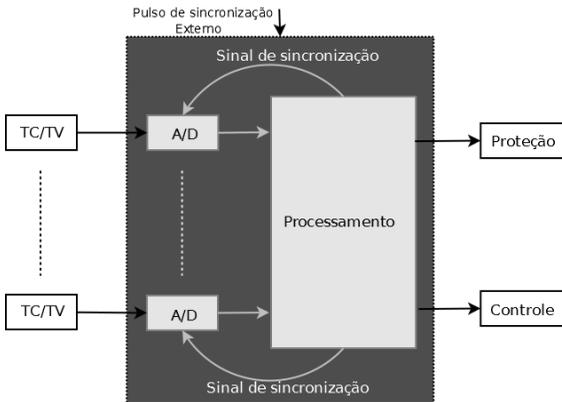
A visão do barramento de processo contempla a instalação de um IED especial chamado de **“Merge Unit”** (MU). Esses dispositivos foram definidos pela norma IEC-61850-2 (2003) como unidades físicas que possuem entradas analógicas, conectadas aos transformadores de instrumentação (TI), para produzir representações digitais (sincronizadas ponto-ponto no tempo) dos sinais de tensão e corrente. Os valores dos sinais digitais de saída são chamados de **Valores Amostrados** (*Sample Value – SV*).

Os SV são publicados através de uma rede Ethernet para assim serem utilizados por qualquer IED (relé de proteção por exemplo) que os

² Bays são definidas como cada uma das seções que formam uma subestação e que precisam ser protegidas. Estas subpartes tem uma função em comum (geração, transformação, comutação, etc.) (IEC-61850-2).

venha precisar no contexto do SAS. Na Figura 9 se apresenta o diagrama de blocos de uma MU.

Figura 9. Diagrama de blocos da MU.



Fonte: (IEC-60044, 2003)

Numa tentativa de clarificar ainda mais a visão do barramento de processo e a estrutura das mensagens que contém as SV, o grupo de usuários da UCA, formado pelos maiores fabricantes de equipamentos para o setor elétrico, publicou um complemento da Parte 9-2 da norma chamado de “*Light Edition*” (9-2-LE).

O complemento 9-2-LE é uma interpretação consolidada de alguns conceitos ambíguos encontrados na Parte 9-2 original da IEC 61850. No documento se apresentam recomendações técnicas para a implementação do barramento de processo em subestações de energia elétrica. Um caso pontual é a definição da taxa de amostragem para a digitalização dos sinais de tensão e corrente do SEP (4800 amostras por segundo para aplicações de proteção elétrica e 15360 amostras por segundo para aplicações de medição e qualidade energética) assim como o conjunto de dados que deve possuir um pacote SV (corrente das três fases mais o neutro e tensão das três fases mais o neutro) (IEC 61850-9-2LE, 2004).

Para que o barramento de processo forneça a mesma funcionalidade dos sistemas cabeados tradicionais, é necessário que os dados na rede de comunicação sejam altamente confiáveis e robustos frente à interferência eletromagnética (Kanabar,2012). Assim, alguns protocolos de comunicação, como por exemplo HSR e PRP (protocolos para topologia de redes com redundância), são recomendados pelos

mesmos fabricantes de IED (Yadav, 2010). No entanto, estes protocolos (e sua topologia subjacente) fornecem garantias desde o ponto de vista de infraestrutura, deixando de resolver questões sobre o desempenho temporal das mensagens transmitidas entre os nós da rede.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a norma IEC-61850 defina o modelo de informação e os serviços de comunicação nos três níveis da sua estrutura hierárquica. Os esforços do presente trabalho foram concentrados no estudo da comunicação entre os níveis de processos e estação, isto é, no barramento de processos. As características desta comunicação (alto volume de dados e grande número de dispositivos) e a necessidade por cumprir com requisitos temporais mais restritivos do que os estabelecidos para o barramento de estação, fazem do barramento de processos um ponto crítico no projeto e operação de sistemas de automação modernos para subestações.

3. IEC-61850: ESTRUTURA BÁSICA DE COMUNICAÇÃO PARA SUBESTAÇÕES E ALIMENTADORES

No capítulo anterior foi apresentado o contexto da norma IEC-61850 nos sistemas de comunicação utilizados em SAS. Neste capítulo se apresentam as características mais representativas desta norma, em particular aquelas relativas à proposta do barramento de processos. Com ajuda de exemplos, o modelo de informação proposto pela norma é explanado, detalhando os requisitos de comunicação que devem ser atendidos pelos diferentes dispositivos do SAS. Ao final do capítulo se apresenta uma revisão bibliográfica onde se destacam trabalhos que analisam o modelo de informação proposto e a sua aplicação no campo dos Sistemas de Automação de Subestações.

3.1 INTRODUÇÃO À NORMA IEC-61850

O estudo do documento da norma IEC 61850 permite visualizar o escopo no qual deve-se inserir o processo de criação e *modelagem de dispositivos do SAS*, o qual é um dos objetivos deste trabalho. Nesta seção se apresentam os objetivos e a composição do documento da norma.

3.1.1 Objetivos e Foco da Norma

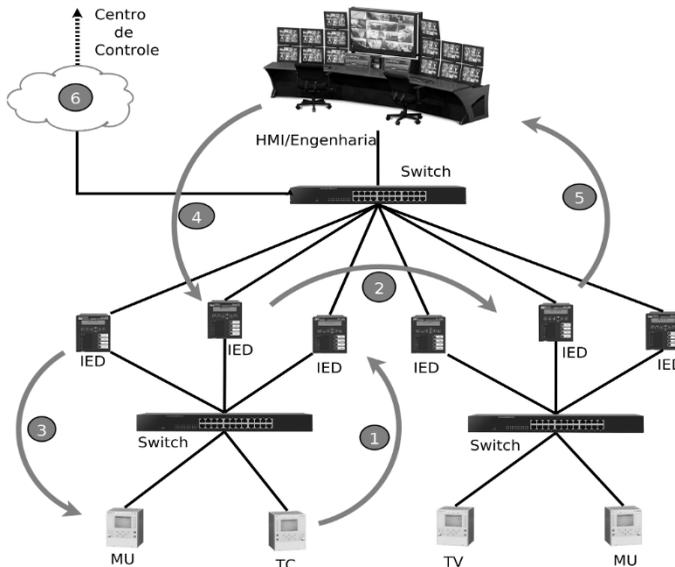
Conforme já mencionado, o principal objetivo da norma é fornecer *interoperabilidade* entre IED de diferentes fabricantes ou, mais precisamente, entre funções da subestação a serem executadas por equipamentos (Dispositivos Físicos) de diferentes fabricantes (IEC-61850-5, 2003).

A norma cita os aspectos da interoperabilidade que buscam ser atendidos:

- **Sintaxe.** Os dispositivos devem ser conectados numa infraestrutura de rede utilizando um protocolo padrão.
- **Semântica.** Os dispositivos devem entender a informação fornecida por outros dispositivos.
- **Função Distribuída.** Os dispositivos devem executar juntos uma função caso necessário.

As interfaces de comunicação do sistema de comunicação descrito pela norma IEC-61850, são apresentadas na Figura 10. Note-se que nesta figura são utilizados dispositivos nos três níveis hierárquico do SAS (ver Figura 8).

Figura 10. Visão do sistema de comunicação segundo IEC-61850.



Fonte: (IEC-61850-7, 2003)

Como apresentado na topologia de rede da Figura 10, a norma IEC 61850 busca dar suporte às funções de automação em subestações por meio de:

- Troca de SV desde os TC/TV (1)
- Troca rápida de dados de I/O para proteção e controle (2)
- Processamento de sinais de controle e chaveamento (3)
- Configuração do sistema e processos de engenharia (4)
- Supervisão e monitoramento (5)
- Comunicação com o centro de controle (6)
- Sincronização temporal, etc.

Da Figura 10 também podem-se apreciar algumas características da norma que garantem a obtenção da interoperabilidade em SAS como:

- Permitir, através da comunicação, que qualquer função possa ser executada por qualquer dispositivo sem significar que todos os dispositivos tenham que suportar todas as funções.
- Descrever as funções dos SAS e o seu comportamento sob o ponto de vista de comunicação (visão abstrata).

Descrição que é feita de forma independente de uma implementação em particular, isso é sem mencionar protocolos.

- Especificar todos os atributos dos dados trocados entre dispositivos de tal forma que as mensagens sejam entendidas sem ambiguidades pelo receptor.
- A norma define o tempo de transferência total aceitável para a transmissão de dados. Estabelece também que estes tempos devem ser garantidos para qualquer situação.

Apesar da interoperabilidade ser requisito para a **intercambiabilidade**³ é importante salientar que este conceito está fora do escopo da IEC-61850 por comprometer a inovação e competência entre fornecedores (Mackiewicz, 2006).

3.1.2 Composição Geral do Documento da Norma

O documento redigido pela Comissão Eletrotécnica Internacional está organizado de tal forma que a norma IEC-61850 não precisaria de um remanejamento total dos seus conceitos caso apareçam mudanças no campo das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) ou nas regulamentações dos sistemas de energia elétrica. Assim, a norma tem como propriedade principal a estabilidade a longo prazo dos seus conceitos. Esta propriedade é chamada de “*à prova de futuro*” (Holback, 2007).

O documento está dividido em dez partes, descritas de forma sucinta a seguir.

As **quatro primeiras partes** discutem temas relacionados com os aspectos gerais do sistema de comunicação.

Terminologia utilizada e requisitos gerais (elétricos, ambientais, de infraestrutura e gestão de projetos) são os temas tratados nestas primeiras partes da norma.

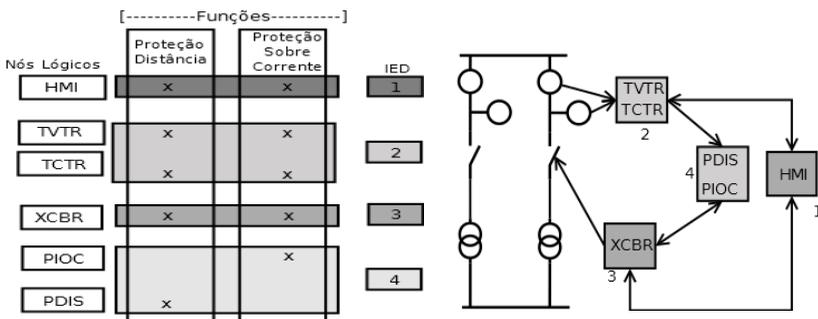
Algumas definições encontradas na Parte 2 (Glossário), são importantes para a contextualização dos conceitos apresentados nas outras partes da norma e foram colocados no **Anexo A** do presente trabalho.

³ A intercambiabilidade é definida como a possibilidade de substituir um dispositivo por um outro, utilizando as mesmas interfaces de comunicação e, como mínimo, fornecendo as mesmas funcionalidades do anterior sem impactar o resto do sistema (IEC-61850-2, 2003)

A **quinta parte** introduz a maioria dos conceitos discutidos nas outras partes da norma. Nela se trata a forma de dividir e categorizar as funções da subestação utilizando o conceito de Nós Lógicos (*Logical Nodes* - LN), o qual é a pedra fundamental da norma. Os requisitos de desempenho das mensagens utilizadas para trocar informações entre equipamentos do SAS também são apresentados. No total, são definidos 7 tipos de mensagens e 6 classes de desempenho. São apresentadas também duas formas para estudar o desempenho de sistemas de comunicação: utilizando PICOMS⁴ e utilizando **simulações de redes LAN**.

Na Figura 11 se descrevem os conceitos da Parte 5 do documento da norma (divisão de funções em LN e sua associação com equipamentos da subestação) (IEC-61850-5, 2003).

Figura 11. Decomposição de funções em LN.



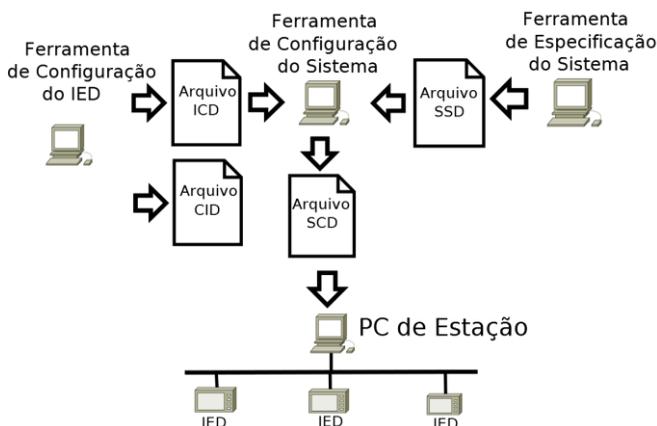
Fonte: (IEC-61850-5, 2003)

No lado esquerdo da figura se apresentam duas funções de proteção elétrica para subestação (Proteção à distância e Proteção de sobre corrente) que foram divididas em funções mais simples chamados de Nós Lógicos: Interface Homem Máquina (HMI), medição de tensão (TVTR), medição de corrente (TCTR), Disjuntor (XCBR), cálculo de sobre corrente (PIOC) e cálculo de impedância da linha (PDIS). Estes LN são implementados por diversos IED que se comunicam entre si através de um barramento de comunicação. No lado direito da figura se apresenta a associação de cada LN com a sua parte correspondente do SAS o qual está representado em forma de diagrama unifilar.

⁴ PICOMS é o acrônimo de “*Pices of information for communication*”. Conceito introduzidos pelo CIGRE WG34.03 que é utilizado para descrever os dados, tipos, desempenho e conexão lógica das operações de comunicação.

Na **sexta parte** se discute o processo de engenharia de configuração do SAS através de uma linguagem própria da norma chamada SCL (*System Configuration Language*) a qual é baseada no padrão XML. O esquema de configuração proposto oferece uma descrição formal tanto do sistema elétrico (diagrama unifilar da subestação) quanto do sistema de comunicação (topologia da LAN e propriedades dos IED). Com a SCL se padroniza a forma de apresentar informações desde/para as diferentes ferramentas de apoio utilizadas no planejamento e operação de subestações. Na Figura 12 apresenta-se o processo de configuração proposto pela norma (IEC 61850-6, 2003).

Figura 12. Visão de configuração proposta pela norma.



Fonte: (IEC-61850-6, 2003)

O processo de configuração se dá através da transferência de arquivos escritos seguindo esquemas XML (*Descrição de Configuração da Subestação – SCD, Descrição das capacidades do IED – ICD, Descrição de Configuração do IED – CID, Descrição da Especificação da Subestação – SSD*) e transmitidos na rede de comunicação utilizando os serviços definidos nas outras partes da norma IEC-61850 (IEC-61850-6, 2003).

A **sétima parte** pode ser considerada o coração da norma. Ela é subdividida em quatro partes e em cada uma delas descreve-se, com grande detalhe, um aspecto específico do sistema de comunicação da subestação.

Na **Parte 7-1** se introduzem: os princípios de comunicação e os modelos de informação propostos pela norma (IEC-61850-7-1, 2003).

Na **Parte 7-2** são detalhados os serviços de comunicação (por exemplo: controle, relatório, leitura, escritura, etc.) utilizados para a troca de informações geradas/consumidas pelas funções da subestação. Em outras palavras, a Parte 7-2 define como trocar informação no sistema de comunicação.

Os serviços apresentados na Parte 7-2 da norma são conhecidos como Interfaces Abstratas de Serviços de Comunicação (*Abstract Communication Service Interface* - ACSI) pois são descritos independentemente do protocolo de comunicação escolhido para implementá-los (IEC-61850-7-2, 2003). Adicionalmente, são definidos tipos básicos de dados (*int, long, float, etc.*) assim como algumas classes de objetos fundamentais para o modelo de informação proposto (por exemplo a classe *Server, DATA, Logical Device* e *Logical Node*).

A **Parte 7-3**, explora o paradigma de modelagem orientada a objetos para definir classes abstratas utilizadas para construir outras classes mais complexas que contêm informação específica de um Nó Lógico (LN). No contexto da norma, estas classes abstratas são conhecidas como CDC – *Common Data Classes*. As classes definidas nesta subparte são apresentadas em forma de tabelas, cujos campos descrevem o nome da classe, os atributos da classe, os serviços de comunicação que suportam (*Functional Constraint* - FC), as condições de presença para cada atributo (Obrigatório - M ou Opcional - O), entre outras informações. Em resumo, a Parte 7-3 define qual é a informação básica comum que é contida nos LN (IEC-61850-7-3, 2003).

A **Parte 7-4**, é a concretização dos conceitos apresentados nas partes anteriores. Nesta padronizam-se os nomes e os atributos de pelo menos 90 Nós Lógicos que representam as funções mais comuns executadas no SAS. Estes LN são definidos através do paradigma de modelagem orientada a objetos e também são apresentados em forma de tabelas, cujos campos descrevem os seus atributos (dados), o tipo de CDC ao qual pertencem esses atributos e a sua condição de presença. Em conclusão, na Parte 7-4 se define o que é modelado e o que pode ser transferido ou comunicado no contexto do SAS (IEC-61850-7-4, 2003).

Com o modelo de comunicação bem definido, a norma faz foco na associação⁵ desse modelo com protocolos de comunicação normalmente utilizados no âmbito das TIC.

⁵ No contexto da norma IEC-61850 o termo mapeamento é utilizado em vez do termo associação para designar o processo de utilizar protocolos de comunicação bem estabelecidos (desde o ponto de vista tecnológico) para suportar as tarefas de comunicação.

Dado que a norma define o modelo de informação e os serviços de comunicação de forma abstrata, estes podem ser associados a qualquer protocolo de comunicação. No entanto, devido ao objetivo da interoperabilidade, é importante definir protocolos concretos para estabelecer a comunicação entre os IED. Na oitava parte e na nona parte da norma são definidos os protocolos de comunicação para a transmissão de informações no SAS.

A **oitava parte** descreve como mapear no protocolo MMS (*Manufacturing Message Specification*) os serviços de comunicação que utilizam uma pilha de comunicação de sete camadas. Serviços de gerenciamento e configuração do sistema são associados neste protocolo. Adicionalmente, na oitava parte se exhibe o protocolo GOOSE/GSSE (*Generic Object Oriented Substation Event*), como alternativa para comunicação rápida de informações sobre o estado do sistema. Este protocolo utiliza uma pilha de comunicação reduzida de três camadas.

Por sua vez, a **nona parte** (subdividida em duas partes) descreve protocolos baseados no padrão Ethernet para a transmissão de valores digitais de grandezas elétricas (SV), utilizados no barramento de processo.

O processo de associação definido tanto na Parte 8 como na Parte 9 é chamado de Mapeamento Específico de Serviços de Comunicação (*Specific Communication Service Mapping - SCSM*) e serve como exemplo para eventuais associações que desejem ser implementadas.

Na Figura 13 apresentam-se as pilhas de comunicação utilizadas pelos SCSM definidos na norma. Note-se a similaridade desta associação com a proposta MAP/EPA.

Finalmente a **decima parte** descreve os testes a serem feitos para determinar se um equipamento é compatível ou não com a norma.

Na Figura 14 se apresenta uma proposta de ordem de leitura das diferentes Partes da norma, de forma a ter um maior entendimento dos seus conceitos (IEC-61850-5, 2003).

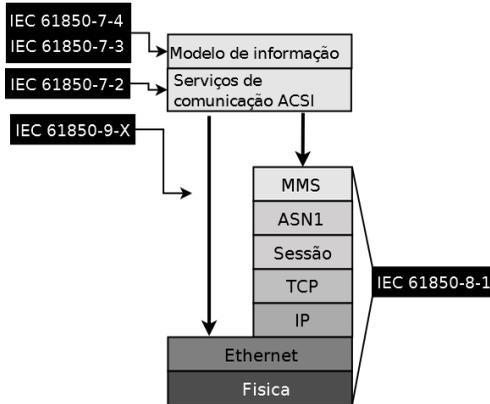
3.2 MODELAGEM NA NORMA IEC 61850

Na seção anterior foi visto que por conta da estrutura do seu documento, a IEC-61850 é uma norma a prova de futuro (Sidhu, 2006).

A estrutura do documento também obedece à necessidade de explanar cada uma das etapas da modelagem da informação proposta para atingir a interoperabilidade nos SAS. Nesta seção, inicialmente se apresenta esse modelo de informação seguindo a ordem do seu documento, na sequência apresentam-se os serviços de comunicação que

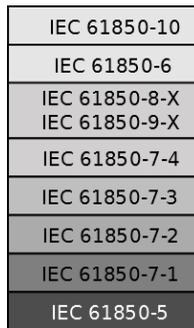
dão suporte à transmissão dessas informações e por fim, se apresentam os diferentes requisitos temporais das mensagens especificados pela IEC-61850.

Figura 13. Pilhas de comunicação propostas pela norma.



Fonte: (IEC-61850-7-1, 2003)

Figura 14. Ordem de leitura das partes da norma.



Fonte: (IEC-61850-5, 2003)

3.2.1 Modelo de Informação

Como apresentado no capítulo inicial, a norma IEC 61850 decompõe as funções do SAS (proteção, medição, interface homem máquina, etc.) em entidades chamadas de Nós Lógicos (LN). Os LN

possuem mecanismos de comunicação por meio dos quais disponibilizam informações que são utilizadas na operação de outras funções do SAS (IEC-61850-2, 2003). Pode-se afirmar então que os LN representam unicamente aspectos das funções do SAS que são de interesse para a comunicação de informações. No documento da norma, esta propriedade é chamada de *virtualização* (IEC-61850-7-1, 2003).

Cerca de 90 funções do SAS (as mais comuns) são virtualizadas por LN (IEC-61850-5, 2003) e são agrupados em treze (13) famílias segundo o seu domínio de aplicação. No Quadro 3 apresentam-se as famílias de funções do SAS junto com a quantidade de LN que pertencem a cada uma delas. Note-se o foco dado às funções de proteção (28 Nós Lógicos), isso se deve ao esforço histórico do setor elétrico por contar com uma operação segura e confiável do SEP (Netto, 2012).

O modelo de informação proposto pela norma IEC 61850 utiliza o paradigma de modelagem orientada a objetos para virtualizar, as diversas funções do SAS. Nesse modelo, os LN estão contidos numa hierarquia de classes apresentada na Figura 15 (IEC-61850-7-2, 2003). No lado direito da figura se apresenta o diagrama UML das classes proposta pela norma, já no lado esquerdo se apresenta um IED desde a perspectiva da modelagem feita pela IEC-61850. A seguir, a partir da Figura 15, serão apresentados alguns conceitos importantes para o entendimento da norma IEC-61850.

Na Figura 15 aparecem os termos *Servidor* e *Dispositivo Lógico* – LD. O primeiro desses termos é utilizado como sinónimo de IED (na norma, o termo *Dispositivo Físico* ou *Physical Device* – PHD comparte o mesmo significado). Por outro lado, o termo *Dispositivo Lógico* (LD), tal e como explicado no capítulo inicial, é a união de vários LN. Os LD facilitam a *autodescrição*⁶ das configurações e capacidades dos IED no SAS (Mackiewicz, 2006) (IEC-61850-2, 2003).

É importante destacar que na definição de qualquer Dispositivo Lógico (LD) existem dois Nós Lógicos indispensáveis, eles são o *LLNO* e *LPHD*. O primeiro contém informações relacionada ao LD (quantidade de LN, serviços de comunicação suportados pelo LD, etc). Já o segundo contém informações relacionadas ao Dispositivo Físico (PHD), dessa forma todos os LPHD de todos os LD que estão no mesmo Dispositivo Físico, têm a mesma informação.

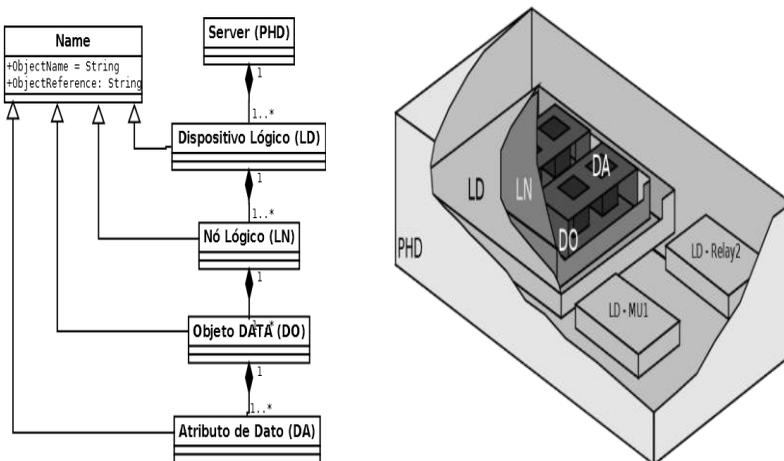
⁶ A autodescrição é definida pela norma como a propriedade que tem os dispositivos do sistema para acessar informações sobre a configuração de outros dispositivos do sistema. Para isso a informação tem que ser representada de forma padrão e tem que ser acessível a través de comunicação (IEC-61850-2, 2003).

Quadro 3. Famílias de LN.

Família de Nós Lógico	Indicador do Grupo	Número de LN
Controle Automático	A	4
Controle Supervisório	C	5
Funções Genéricas de Referência	G	3
Interface e Arquivo	I	4
Sistema	L	3
Medição	M	8
Funções Proteção	P	28
Funções Relativas à Proteção	R	10
Sensores	S	4
Transformadores de Instrumentação	T	2
Switchgear	X	2
Transformadores de Potência	Y	4
Outras Funções	Z	15
<i>Total</i>		92

Fonte: (IEC 61850-7-1, 2003)

Figura 15. Modelagem orientada a objetos utilizada pela IEC-61850.



Fonte: (Reason, 2014)

Seguindo a Figura 15, observa-se que os LN estão compostos por objetos da classe **Dados** (DATA – DO) que, por sua vez, possuem objetos da classe **atributos** (DataAttribute - DA). Ao final, os objetos da classe

atributos (DA) são os que armazenam os valores das informações das aplicações modeladas pelos LN.

No processo de virtualização, diversas funções do SAS (LN) podem utilizar o mesmo grupo de atributos (objetos DA) para representar as suas informações. Por exemplo, a função de medição trifásica de corrente (TCTR) pode utilizar o mesmo conjunto de atributos utilizado pela função de medição trifásica de tensão (TVTR) dado que ambas as funções precisam representar informações analógicas e organizá-las por fase (magnitude e ângulo da tensão/corrente das fases a, b, c e neutro). Assim, a IEC-61850 cria grupos de atributos chamados de *Classes de Dados Comuns* (CDC) que são utilizados no contexto de diferentes LN (IEC-61850-7-1, 2003).

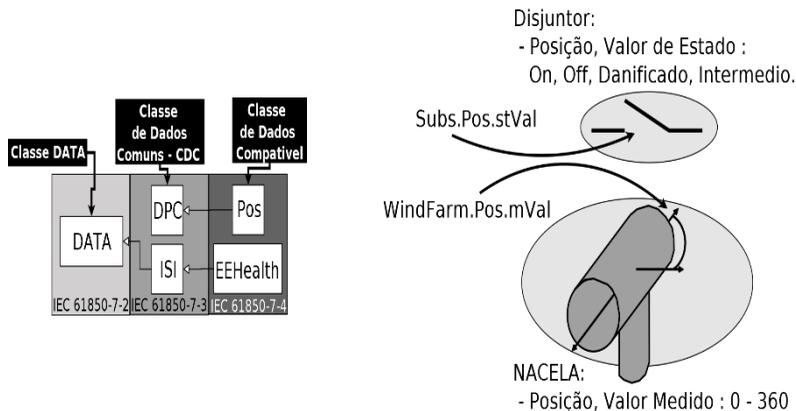
De forma geral, os objetos da classe DO são do tipo CDC, isso quer dizer que a definição de um objeto da classe DO não precisa listar todos os seus atributos, só precisa referenciar o tipo de CDC ao qual pertence para saber quais são os atributos que o compõem. As CDC também são um meio útil para manter consistente a definição de atributos (IEC-61850-7-3, 2003).

Complementando o visto na seção anterior com o apresentado nesta seção, pode-se dizer que a norma IEC-61850, a partir das classes abstratas LN, DO, DA e CDC (definidas na parte 7-2 e 7-3 da norma), deriva classes concretas que têm nomes e atributos padronizados, definindo a semântica das informações das aplicações modeladas do SAS. Estas classes especializadas são chamadas de *classes compatíveis* e estão especificadas na Parte 7-4 da IEC-61850.

No lado esquerdo da Figura 16 apresenta-se a relação entre as classe abstratas DO, CDC e estas *classes compatíveis*. Nesse exemplo, define-se a *classe compatível Pos*, a qual modela informação de posição de elementos de equipamentos do SAS (como contatos de disjuntores por exemplo). Já no lado direito da Figura 16 apresenta-se um exemplo onde dois LN distintos utilizam a *classe compatível* de dados *Pos* para representar a informação de posição das suas respectivas partes móveis. Na parte superior desse exemplo, a classe *Pos* é utilizada para representar informação de posição do contato de um disjuntor (LN XCBR), já na parte inferior do exemplo, a mesma classe *Pos* é utilizada para representar a posição de uma nacela de aero-gerador (LN WNAC). Note-se então que a semântica dos dados está determinada pelo contexto da aplicação.

Em termos de modelagem orientada a objetos, esse exemplo representa a aplicação do conceito de polimorfismo por parte da norma IEC-61850 (IEC-61850-7-1, 2003).

Figura 16. Exemplo do modelo de informação da norma.



Fonte: (IEC-61850-7-2, 2003)

Na Figura 17 se apresenta graficamente outro exemplo concreto da relação entre as classes LN, DA, DO e CDC. Nessa figura se apresenta o modelo de informação aplicado à virtualização das funções dos “*circuit breakers*”. Variáveis de controle, monitoramento, configuração, entre outras, são modeladas seguindo a proposta da norma. Nesta mesma figura é apresentado o formato padrão utilizado para identificar textualmente os dados contidos no modelo de informação.

Para concluir a discussão sobre o modelo de informação é descrito a seguir o conceito de conjuntos de dados ou *datasets*. Este modelo permite ao projetista do SAS agrupar objetos DA, pertencentes a diferentes classes compatíveis DO (ou seja permite criar conjuntos de atributos). Esse agrupamento é chamado de *datasets*, os quais são o conteúdo básico para criar relatórios de operação (*logging*).

Da mesma forma que acontece nos LD agrupando LN, o agrupamento de atributos nos *datasets* deve obedecer algumas restrições, chamadas de **restrições funcionais** (*Functional Constraint – FC*) que determinam os serviços de comunicação que podem ser aplicados para acessar a informação contida neles (IEC-61850-7-2, 2003).

A norma IEC 61850 fornece dois modelos de associações de IED: associação bidirecional (*Two Party Application Association - TPAA*) e associação por difusão (*Multicast*). O modelo TPAA também é conhecido como associação Cliente – Servidor; já o modelo *Multicast* é conhecido como associação Publicador – Subscritor.

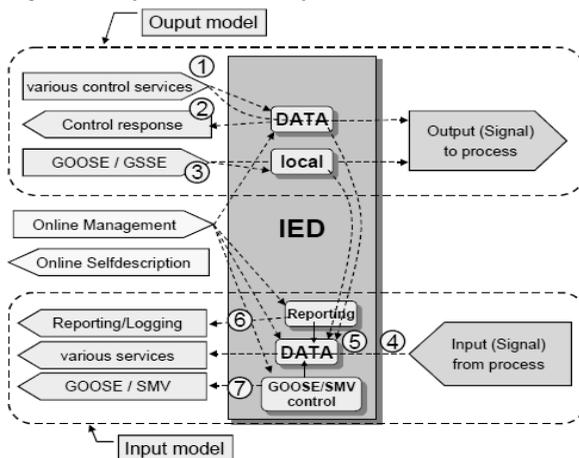
A TPAA deve ser empregada para a troca bidirecional de informações que precisem de serviços orientados a conexão (como por exemplo serviços de supervisão, configuração, etc.). Por outro lado, a associação por *Multicast* deve ser utilizada para a troca unidirecional de informações entre uma única fonte (publicador) e muitos destinos (subscritores).

Com os modelos de associação explicados, é possível descrever com mais clareza os serviços de comunicação. Os serviços (Figura 18) são organizados nas seguintes categorias: Modelo de saídas, Modelo de entradas e Modelo para gestão online de IED e auto descrição.

Os serviços do tipo saídas (Controle e GOOSE/GSSE) devem provocar um impacto nas funções da subestação, por exemplo podem produzir um sinal de saída para o processo através de uma interface física do IED, ou podem mudar o valor do estado de equipamentos da subestação. Por outro lado os serviços de tipo entrada (Relatório/Log, GOOSE e SV) permitem a transferência de informação desde o processo diretamente para o sistema de comunicação. É possível utilizar o mesmo tipo de serviço de entrada para comunicar informações obtidas de dentro do IED (eventos). Por fim, existem serviços que podem ser utilizados para gerir remotamente o IED, por exemplo: para definir *datasets* ou para transferir arquivos de configuração.

Da Figura 18 note-se que o serviço chamado Evento Genérico Orientado a Objetos de Subestação (*Generic Object Oriented Substation Event - GOOSE*) faz parte tanto dos serviços do tipo entrada quanto dos serviços do tipo saída, já que ele está intimamente relacionado com funções de monitoramento e controle executadas nos equipamentos que fazem parte do barramento de processos. Por outro lado, o serviço de valores amostrados (*Sample Measure Values - SMV*) faz parte dos serviços do tipo entrada, pois leva representações digitalizadas dos sinais de tensão e corrente monitorados por um IED para outros dispositivos do SAS. O serviço SMV e o serviço GOOSE são os serviços mais utilizados para as funções de comunicação necessárias no barramento de processo.

Figura 18. Alguns serviços de comunicação da IEC-61850.



Fonte: (IEC-6185-7-1, 2003)

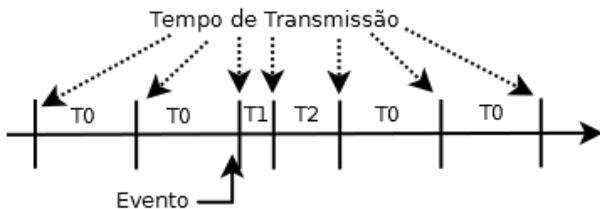
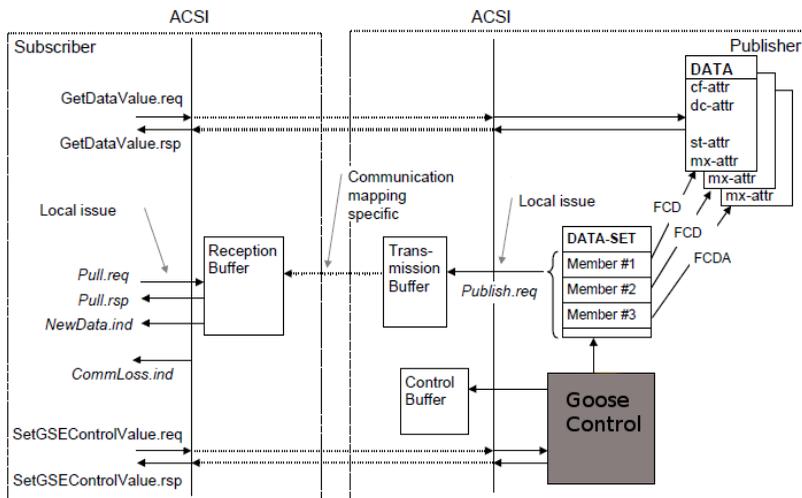
O modelo de serviço GOOSE fornece a possibilidade de uma distribuição rápida e confiável de dados tanto de entrada como de saída. Esse modelo permite a transmissão simultânea de informações sobre eventos que acontecem na subestação através do mecanismo de comunicação de difusão *Multicast/Broadcast*.

A norma IEC-61850, além do modelo GOOSE, especifica o modelo GSSE (*Generic Substation State Event*) para o propósito da transmissão de informação genérica sobre eventos da subestação. A diferença entre estes dois serviços consiste em que o modelo GOOSE pode ser utilizado para transmitir informação organizada na forma de *datasets*, enquanto o modelo GSSE é utilizado para transmitir informação unicamente na forma de cadeias de bits. O GSSE é um dos aportes remanescentes da UCA 2.0 na IEC-61850 (IEC-61850-7-2, 2003).

Na parte superior da Figura 19, apresenta-se o diagrama de blocos da comunicação entre dois IED utilizando o serviço GOOSE/GSSE. Note-se a presença de uma entidade chamada de *bloco de controle GOOSE*, a qual é a encarregada de coordenar todo o procedimento de comunicação desde o lado do transmissor (IEC-61850-8-1, 2003).

O serviço de comunicação GOOSE ganha um incremento na sua confiabilidade ao transmitir periodicamente informações para manter a associação entre as entidades que monitoram a aplicação (função do SAS). Essa característica é apresentada na parte inferior da Figura 19.

Figura 19. Modelo de serviço GOOSE/GSSE.



T0 = Período de transmissão em condições estáveis.
T1 = Menor período de transmissão depois do evento
T2 = Período variável entre T1 e T0.

Fonte: (IEC-61850-7-2, 2003) (IEC-61850-8-1, 2003)

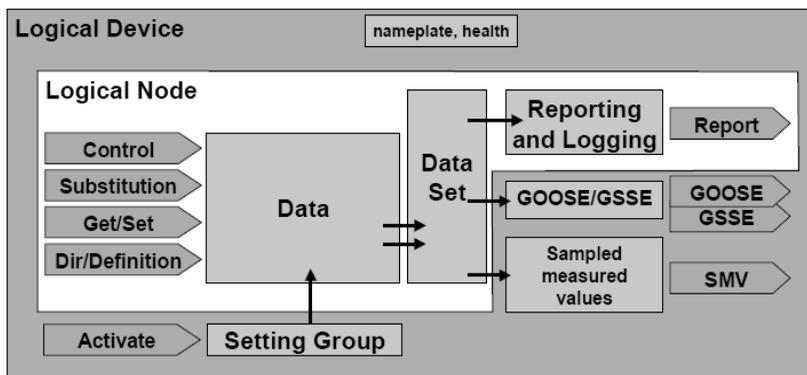
Cada mensagem na sequência de transmissão possui um atributo chamado de *Time allowed To Live* (TTL-tempo permitido para viver) que informa ao receptor o tempo máximo que deve aguardar para receber a próxima mensagem. Na ocorrência de um evento, este tempo é reduzido e gradativamente restituído ao seu valor inicial com cada mensagem transmitida (ver Figura 19). Caso uma mensagem não chegue no tempo especificado pelo TTL, o receptor deve assumir que a conexão foi interrompida.

O parâmetro *Time allowed To Live*, junto com outro parâmetro chamado de número de sequência (*seqNum*) evita que o receptor entenda a mensagem como uma mensagem duplicada (IEC-61850-8-1, 2003).

Por outro lado, o serviço de comunicação SMV providencia a transmissão de valores amostrados (SV) de forma organizada e controlada no tempo. Ao igual do que o serviço GOOSE, o serviço SMV está baseado no modelo de associação *Multicast* e permite a transmissão de informações organizadas na forma de *datasets*. Da mesma forma que ocorre com o serviço GOOSE, os IED que suportam o serviço de comunicação SMV devem possuir uma entidade chamada de *bloco de controle SMV* para gerir todas as operações de comunicação. A grande diferença entre o serviço GOOSE e o SMV é que neste último as mensagens não contêm a mesma informação em transmissões consecutivas. Outra diferença entre estes dois serviços é que no caso do SMV a norma especifica que o produtor deve transmitir as mensagens com uma taxa de amostragem fixa e a informação contida nelas não é genérica e sim valores de tensão e corrente (IEC-61850-9-2, 2003).

Para concluir, na Figura 20 apresenta-se a visão de um IED sob o ponto de vista dos serviços de comunicação, complementando a visão do IED desde o modelo de informação apresentado na Figura 15.

Figura 20. Visão completa do IED segundo IEC-61850.



Fonte: (IEC-61850-7-1, 2003)

3.2.3 Requisitos temporais da comunicação

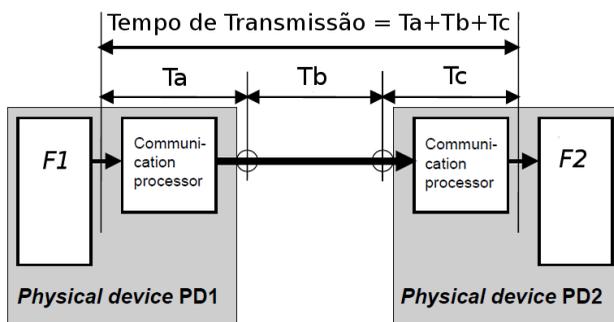
Até agora têm-se apresentado a visão da norma IEC-61850 sobre a informação que deve ser transmitida e a forma em que esta é de fato transmitida no SAS. Como foi visto na seção anterior, existem alguns

serviços de comunicação que exigem um comportamento temporal bem particular, como é o caso dos serviços GOOSE, GSSE e SMV.

Assim, a norma IEC-61850 completa o processo de modelagem da informação especificando os requisitos temporais que, sob o ponto de vista da aplicação (operações de proteção, controle, monitoramento, etc.), devem ter as mensagens transmitidas entre Nós Lógicos.

Na Figura 21 apresenta-se o conceito de tempo de transmissão segundo a norma IEC-61850.

Figura 21. Definição de tempo de transmissão.



Fonte: (IEC-61850-5, 2003)

Como visto na figura, o cálculo do tempo de transmissão inicia desde o momento em que o transmissor coloca o conteúdo dos dados na sua fila de transmissão (T_a) até o momento em que o receptor extrai os dados da sua fila de recepção (T_c), passando pelo canal de comunicação (T_b) (IEC-61850-5, 2003).

Para suportar os diversos requisitos temporais de uma subestação, a norma IEC-61850 define alguns tipos de mensagens. Basicamente existem dois grupos de aplicações que permitem a definição dos tipos de mensagens: o grupo formado por *aplicações de controle e proteção* (P1, P2 e P3) e o grupo formado por *aplicações de medição e estimação de qualidade de energia* (M1, M2 e M3). Dependendo do contexto da aplicação, os tipos de mensagens são separados em várias classes de desempenho.

O Quadro 4 resume as classes de desempenho especificadas pela norma enquanto o Quadro 5 apresenta o tipo de mensagens contido em cada uma dessas classes.

Do Quadro 5 observa-se que o sexto tipo de mensagem (sincronização) não está determinado por um requisito temporal mas por um requisito de precisão. A última coluna faz referência às interfaces de comunicação da Figura 10, mostrando claramente que os requisitos de desempenho exigidos para o barramento de processos são mais exigentes do que aqueles especificados para as mensagens que transitam no barramento de estação.

Os tipos de mensagens **1A**, **1B** e **4** são de grande interesse para o desenvolvimento do presente trabalho por se tratarem de mensagens que normalmente trafegariam no barramento de processo do SAS (IEC-61850-5, 2003).

Quadro 4. Classes de desempenho.

<i>Classe</i>	<i>Característica</i>	<i>Resolução por amostra digital (bits)</i>	<i>Taxa de amostragem (amostras/s)</i>	<i>Aplicação</i>
P1	Tempo de transmissão = 10ms	13	480	Dados de Bay de distribuição secundária
P2	Tempo de transmissão = 3ms	16	960	Dados de Bay de transmissão
P3	Tempo de transmissão = 3ms	18	1920	Dados de Bay de transmissão com sincrofasores
M1	Medição até 5° armônico	14	1500	Medição de qualidade de energia em área Residencial
M2	Medição até 13° armônico	16	4000	Medição de qualidade de energia em área Industrial
M3	Medição até 40° armônico	18	12000	Medição de qualidade de energia com sincrofasores

Fonte: (IEC-61850-5, 2003)

Quadro 5 - Tipo de mensagem e classe de desempenho.

<i>Tipo de mensagem</i>	<i>Classe de desempenho</i>	<i>Requisito Temporal</i>	<i>Interface/Aplicação</i>
<i>1A - Mensagens Rápidas, Trip</i>	P1	Tempo de transmissão $\leq 10\text{ms}$	Interface 3 e 2: Comutação de disjuntores, “Trip”, estado de disjuntores, etc.
	P2/P3	Tempo de transmissão $\leq 3\text{ms}$	
<i>1B - Mensagens Rápidas, Outras</i>	P1	Tempo de transmissão $\leq 100\text{ms}$	
	P2/P3	Tempo de transmissão $\leq 20\text{ms}$	
<i>2 - Mensagens de Velocidade Média.</i>	M1, M2, M3	Tempo de transmissão $\leq 100\text{ms}$	Interface 1: Cálculo do RMS, etc.
<i>3 - Mensagens de Velocidade Baixa</i>	N/A	Tempo de transmissão $\leq 500\text{ms}$	Todas as Interfaces: Alarme, Medição de grandezas não Elétricas
<i>4 - Mensagens com dados não tratados, Raw</i>	Ver Quadro 4, classes de desempenho M		Interface 1 e 3: Medição digital de grandezas elétricas.
<i>5 - Mensagens para configuração</i>	N/A	Tempo de transmissão $\leq 1000\text{ms}$	Interface 2, 3, 4 e 6: Transferência de Arquivos.
<i>6 - Mensagens para sincronização de tempo</i>	P1	Diferença de Sincronia = $\pm 1\text{ms}$	Todas as Interfaces: Sincronização de IED
	P2/P3	Diferença de Sincronia = $\pm 0.1\text{ms}$	
	M1	$\pm 4 \mu\text{s}$	
	M2/M3	$\pm 1 \mu\text{s}$	
<i>7 - Mensagens de Comando com Controle de Acesso</i>	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)

3.3 PERFIS DE COMUNICAÇÃO NA NORMA IEC 61850

Nesta seção é apresentada a associação da modelagem abstrata proposta pela norma com protocolos de comunicação bem estabelecidos no ambiente técnico das TIC. No contexto da IEC-61850, essa associação é chamada de SCSM (*Specific Communication Service Mapping*) (Netto, 2012).

3.3.1 Protocolos de Comunicação Utilizados na Norma IEC 61850

Para atingir o seu objetivo de interoperabilidade, além de definir o modelo de informação e os serviços de comunicação, a norma IEC-61850 especifica os protocolos utilizados em cada etapa da comunicação. A norma IEC-61850 utiliza o modelo de referência OSI (RM-OSI) como base para o processo de padronização do sistema de comunicação do SAS (IEC-61850-8-1, 2003).

A norma divide a pilha de comunicação do RM-OSI em dois grupos chamados de “*perfil-A*” e “*perfil-T*”. O *perfil-A* contém os protocolos referentes as três camadas superiores do RM-OSI (Aplicação, Apresentação e Sessão). Por outro lado, o *perfil-T* representa os protocolos das quatro camadas inferiores do modelo OSI (Transporte, Rede, Enlace, Física).

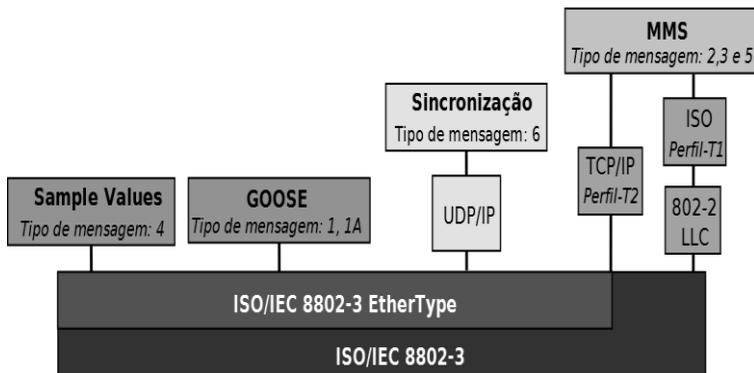
Nesse contexto, a norma define dois tipos de *perfil-A*: um orientado a conexão e outro não orientado à conexão. Juntamente, define também 3 tipos de *perfil-T*: um orientado a conexão baseado nas camadas do RM-OSI, outro não orientado a conexão baseado nas camadas do RM-OSI e mais um orientado a conexão mas baseado no modelo TC/IP (IEC-61850-8-1, 2003).

Na Figura 22 apresenta-se a forma em que os perfis de comunicação (*perfil-A* e *perfil-T*) são combinados para implementar os diferentes protocolos de comunicação descritos de forma abstrata na seção anterior. Os serviços relacionados com o modelo *cliente-servidor* são implementados utilizando o protocolo MMS e são mapeados em pilhas de comunicação que incluem tanto o *perfil-A* como o *perfil-T*. Por outro lado, os serviços de comunicação que utilizam o modelo *Publicador-Subscritor*, relacionados com o barramento de processo (GOOSE e SMV), são associados com pilhas de comunicação que unicamente apresentam o *perfil-T*, diminuindo o *overhead* e simplificando o processamento das mensagens.

Na Figura 22 também relacionam-se os protocolos de comunicação com tipos de mensagens apresentados na seção anterior, determinando

assim o protocolo encarregado de garantir as necessidades temporais de cada função da subestação.

Figura 22. Tipos de mensagens mapeados aos perfis de comunicação.



Fonte: (IEC-61850-8-1, 2003)

O Quadro 6 apresenta os protocolos escolhidos pela norma IEC-61850 para implementar as funções de comunicação em cada uma das camadas do RM-OSI. É importante salientar que, no caso particular dos serviços de comunicação relacionados com o modelo *Publicador-Subscritor*, a norma define a utilização do protocolo **IEEE 802.1q** com o objetivo de incluir mecanismos que permitam o estabelecimento de prioridades entre mensagens para garantir os requisitos temporais das aplicações (qualidade de serviço - QoS).

3.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entre os anos de 2003 e 2006, quando a norma IEC-61850 se encontrava em etapa de divulgação, foi publicada uma grande quantidade de artigos referentes aos seus conceitos, benefícios e aplicações. O estudo da norma não foi uma iniciativa exclusiva do setor industrial, também houve uma grande colaboração do setor acadêmico para aprimorar o entendimento dos seus conceitos e aproveitar melhor as novas soluções propostas por ela no campo da configuração e operação de Sistemas de Automação para Subestações.

Os trabalhos encontrados podem ser divididos em dois grupos: O primeiro sendo composto por artigos que pretendem explicar

didaticamente o conteúdo da norma, e o segundo sendo composto por artigos que apresentam críticas, modificações e aplicações da norma.

Quadro 6. Protocolos para cada camada do RM-OSI.

<i>Camada RM-OSI</i>	<i>Nome do protocolo</i>	<i>Especificação</i>	<i>Perfil de Comunicação</i>
<i>Aplicação</i>	Manufacturing Message Specification (MMS)	ISO 9506-1:2003	A
<i>Apresentação</i>	Abstract Syntax Notation (ASN.1)	ISO 8824-1:1999	A
<i>Sessão</i>	Connection Oriented Session	ISO 8326:1996	A
<i>Transporte</i>	Internet Control Message Protocol (ICMP)	RFC 792	T
	Transmission Control Protocol (TCP)	RFC 793	
<i>Rede</i>	Internet Protocol (IP)	RFC 791	T
	Ethernet Address Resolution Protocol (ARP)	RFC 826	
<i>Enlace</i>	Transmission of IP datagrams over Ethernet	RFC 894	T
	Carrier Sense Multiple Access (CSMA/CD)	ISO 8802-3:2001	
<i>Física</i>	10 Base-T/100 Base-T	ISO 8802-3:2001	T
	100 Base FX	IEC 60874-10	

Fonte: (IEC-61850-8-1, 2003) (IEC-61850-9-2, 2003)

No primeiro grupo destaca-se o trabalho de *Mackiewicz* (2006), onde se apresentam os resultados de um treinamento desenvolvido para pessoas interessadas no aprendizado da norma. Noções sobre a modelagem, a linguagem de configuração (SCL) e algumas aplicações são apresentadas. Ao final do artigo se apresentam os benefícios que a norma introduz no desenvolvimento e operação do setor elétrico.

De forma semelhante ao trabalho de *Mackiewicz, Sidhu et al.* (2005), (2008) publica um par de artigos apresentando não só os conceitos e benefícios da norma, mas também as dificuldades referentes à sua implementação em ambientes reais.

Os trabalhos apresentados por *Mohangheghi* (2009) e *Gupta* (2008) ilustram a forma de aplicar o modelo de informação da norma para representar funções do SAS, dando como exemplo o caso de um *comutador automático de “tap” de transformador*.

Empresas do setor elétrico como ABB (2010), General Electric (2009), entre outras, publicaram e continuam publicando trabalhos referentes ao ensino dos conceitos e aplicações da norma.

No segundo grupo de artigos, destaca-se a série de trabalhos apresentados por *Kostic et al.* (2007), (2005) que faz uma crítica ao documento da norma, em especial ao esquema de tabelas com que se ilustra o modelo de informação. *Kostic* propõe uma modelagem baseada na linguagem UML, facilitando não só o entendimento do modelo de informação, mas também facilitando a tarefa dos desenvolvedores na hora da sua implementação.

O artigo de *Ferreira et al* (2013) apresenta uma extensão dos conceitos da norma, em especial do processo de configuração e propõe uma nova arquitetura utilizando *web services* e computação na nuvem para esta tarefa.

Por último, aparecem diversos artigos apresentando testes de interoperabilidade tanto em laboratório quanto em ambientes reais, com o objetivo de demonstrar e validar o funcionamento de equipamentos que suportam as propostas da norma (Yang, 2013).

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a norma IEC 61850 tenha como objetivo a interoperabilidade, os diversos agentes do setor elétrico utilizam ferramentas e equipamentos que em geral não suportam os conceitos propostos nela. Na prática, a existência da norma não exclui outros protocolos que auxiliam na operação das subestações, como é o caso dos protocolos Modbus e DNP, os quais são amplamente utilizados no setor elétrico. A flexibilidade oferecida pelo padrão IEEE 802.3 (Ethernet) possibilita a coexistência destes protocolos com a norma IEC 61850.

Como visto neste capítulo, o documento da norma é bastante extenso e os seus conceitos nem sempre estão claramente explanados. A plataforma de simulação desenvolvida como parte do presente trabalho, acrescenta uma abordagem prática ao entendimento da norma em especial em processos de treinamento e capacitação.

4. MODELOS DE SIMULAÇÃO DE IED SEGUNDO A NORMA IEC 61850

Seguindo os conceitos e os formatos das mensagens definidos na norma IEC-61850, neste capítulo apresentam-se os modelos de simulação dos Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED) que fazem parte do barramento de processos do SAS.

4.1 DESCRIÇÃO DE DISPOSITIVOS DO BARRAMENTO DE PROCESSO

Como apresentado no Capítulo 2 (Figura 8 e Figura 10), a norma IEC 61850 divide as subestações de energia elétrica em três níveis (estação, *bay* e processo) e define dois barramentos de comunicação para transferir informação entre eles (barramento de processo e barramento de estação). Conseqüentemente, os equipamentos das subestações são agrupados segundo a sua localização e segundo a sua funcionalidade.

Nesse contexto, define-se que as tarefas de medição e monitoramento de sinais elétricos (corrente e tensão) são executadas por dispositivos que se encontram no nível de processos. Equipamentos como as Merge Unit (MU) e os Transformadores de Instrumentação são exemplos de equipamentos que pertencem a esse nível. Por outro lado, as tarefas de comando e proteção que, por sua vez podem precisar de informações geradas por equipamentos de monitoramento e medição, são executadas por dispositivos alocados no nível de *bay*. Relés de proteção e os Controladores de *bay*, são exemplos de equipamentos deste nível.

Nesta seção, apresenta-se uma forma diferente de agrupar os equipamentos das subestações destacando as características de comunicação de cada um deles.

4.1.1 Considerações sobre as Características de Comunicação dos Dispositivos do Barramento de Processos

Apesar da classificação de equipamentos por nível de atuação, definida pela norma, é possível classificar os equipamentos de acordo ao tipo de mensagens processados e gerados por eles. Desta forma, existem três tipos de dispositivos: aqueles que geram mensagens SMV, aqueles que geram mensagens GOOSE e aqueles que geram mensagens em outros formatos (por exemplo, MMS).

De acordo com esta taxonomia, é possível afirmar que os dispositivos que utilizam o barramento de processo pertencem, em sua maioria, a duas categorias:

- *Measurement Unit* (MU) – IED com capacidade de gerar mensagens do tipo SMV. As *Merge Units* são tomadas como dispositivos representativos deste grupo.
- *P&C* – IED com capacidade de gerar mensagens do tipo GOOSE. Dispositivos com funções de **proteção à distância** (LN PDIS), **lógica de intertravamento** (LN CILO, LN CSWI) e **comando e comutação de circuitos** (LN XCBR, LN XSWI) são elementos representativos deste grupo.

Com esta organização, equipamentos que pertencerem ao nível de processo, como seccionadores e disjuntores (modelados pelos Nós Lógicos XCBR/XSWI), são designados ao mesmo grupo (grupo P&C) que equipamentos localizados no nível de *bay*, como por exemplo relés de proteção. Dessa forma, fica claramente exposto que a classificação dos dispositivos modelados neste trabalho é feita tomando em consideração suas características de comunicação e não suas localizações dentro do SAS.

Tendo definido os dispositivos que utilizam o barramento de processo como meio para executar as suas funções, algumas considerações referentes às propriedades de comunicação destes dispositivos são assumidas com o intuito de descrever com maior precisão os seus modelos. Estas considerações são listadas na sequência:

- Os IED que possuem funções de Proteção e Comando (P&C) não contêm funções de monitoramento (MU) e vice-versa.
- Os IED que fazem parte do grupo P&C geram e processam mensagens GOOSE. Adicionalmente, estes IED não geram mensagens SMV, porém têm capacidade de processá-las cada vez que as recebem.
- Os IED que pertencem ao grupo de equipamentos para monitoramento (MU), unicamente geram mensagens do tipo SMV mas, não processam nenhum tipo de mensagem quando as recebem (nem mesmo SMV).
- Os dois tipos de IED são modelados unicamente desde o ponto de vista da comunicação, descartando assim detalhes sobre o funcionamento do seu *hardware* (i.e. frequência de operação do processador, tipo de conversor analógico digital utilizado, etc.).

- Aspectos referentes ao funcionamento dos dispositivos no SEP (lógicas de proteção, tensões ou correntes de operação, etc.), assim como funções de configuração (utilizando a linguagem SCL), não foram considerados nos modelos de simulação desenvolvidos.

4.1.2 Modelos de Simulação dos Dispositivos do Barramento de Processo

Seguindo as considerações anteriores, define-se que as mensagens que trafegam pelo barramento de processo são principalmente do tipo GOOSE e SMV. Dado que estas mensagens são mapeadas diretamente no padrão IEEE 802.3 (Figura 22), os procedimentos de geração e recepção de mensagens nos dispositivos modelados têm que ser estruturados seguindo a mesma arquitetura utilizada por estes protocolos, isso é a arquitetura RM-OSI. Consequentemente, para obter uma representação coerente com os conceitos fundamentais da norma IEC 61850, basta dotar os modelos com funções das camadas de aplicação, enlace e física.

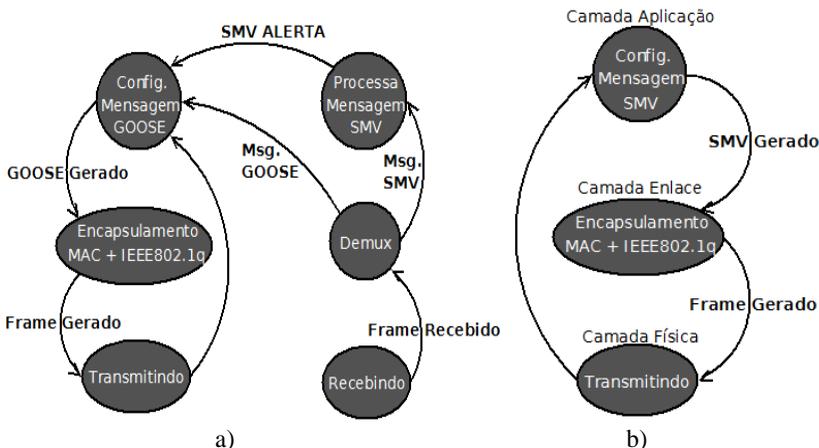
Na sequência são apresentadas as funções executadas por cada uma dessas três camadas no contexto dos dispositivos modelados neste trabalho.

- Camada de aplicação: Na fase de geração de mensagens, esta camada é a encarregada de definir os elementos (e valores) que compõem a mensagem GOOSE ou SMV. Já na recepção de mensagens, esta camada analisa o conteúdo das mensagens e determina o comportamento que deve assumir o IED modelado.
- Camada de enlace de dados: Na fase de geração de mensagens (i.e. quando os dados provêm da camada de aplicação), esta camada é a encarregada do encapsulamento das mensagens em quadros (*frames*) com o formato do padrão IEEE 802.1q. Já na etapa de recepção (i.e. quando as mensagens provêm da camada física), a camada de enlace 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 do tipo SMV ou como uma mensagem do tipo GOOSE. Esta última etapa é conhecida como *Demultiplexação* de mensagens (ou simplesmente *Demux*). A função *Demux* é utilizada principalmente pelos IED do grupo P&C.

- Camada física: Esta camada se encarrega da ligação ponto a ponto entre os IED da rede (e eventualmente entre os IED e o modelo do *Switch*). Nesta camada definem-se parâmetros de configuração da transmissão de dados, dentre os quais se destacam parâmetros de comunicação bidirecional (ou *Full Duplex*), tamanho dos buffers de recepção e transmissão, atrasos do canal de transmissão, taxa de erros de bits, etc.

A Figura 23 ilustra a máquina de estados dos modelos de simulação para os dois tipos de IED de interesse para este trabalho. No lado esquerdo da figura se apresenta o diagrama para IED do tipo P&C, já no lado direito se apresenta o diagrama correspondente ao modelo para IED do tipo MU. É importante destacar que a comunicação entre camadas do mesmo dispositivo é considerada ideal (sem limite de largura de banda, sem perda ou corrupção das mensagens, etc.).

Figura 23. Modelos dos IED do barramento de processo. a) IED P&C. b) IED MU.



Fonte: Autor.

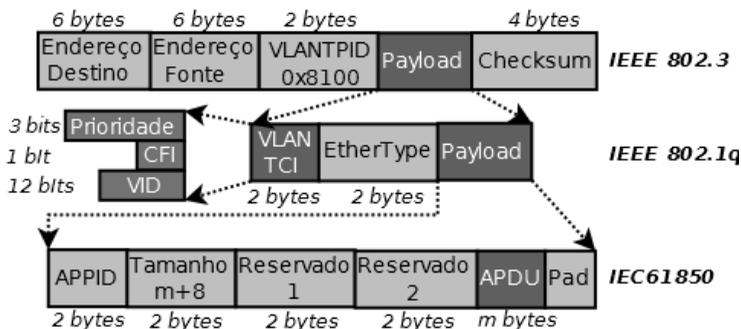
4.2 DESCRIÇÃO DAS MENSAGENS DO BARRAMENTO DE PROCESSO

Tendo identificado os tipos de mensagens que trafegam pelo barramento de processo e que estas mensagens estão estruturadas de acordo com o padrão IEEE 802.3, é necessário descrever seus formatos e a codificação utilizada para as suas transmissões.

4.2.1 Formato das mensagens IEEE 802.3 e IEEE 802.1q

A Figura 24 representa os cabeçalhos que são inseridos nas mensagens IEC-61850 (camada de aplicação) quando são encapsuladas pelos protocolos IEEE 802.3 e IEEE 802.1q (camada de enlace).

Figura 24. Cabeçalho do protocolo IEEE 802.3, IEEE 802.1q e IEC61850.



Fonte:(Kurose, 2013)

O padrão IEEE 802.1q é utilizado em conjunto com o padrão IEEE 802.3 para possibilitar a segmentação das redes locais (*Local Area Network - LAN*) em diversas sub redes chamadas de redes virtuais (*Virtual LAN - VLAN*). O objetivo é limitar o domínio de difusão das mensagens geradas com endereço de destino *broadcast* ou *Multicast*. Adicionalmente, este padrão possibilita a priorização de mensagens (com até sete níveis de prioridade) fornecendo assim um parâmetro de qualidade de serviço (QoS) (Kurose, 2013).

Na parte superior da Figura 24 são exibidos os campos do cabeçalho IEEE 802.3 (também conhecido como Ethernet II). Destaca-se a presença do campo *VLAN TPID*, cujo valor é fixo (0x8100) e indica que a mensagem encapsulada tem o formato do padrão IEEE 802.1q. Além do *VLAN TPID*, o cabeçalho IEEE 802.3 contém um campo para indicar o endereço físico do nó destinatário da mensagem e outro campo para indicar o endereço físico do nó que originou a mensagem.

Na metade desta figura também aparecem os campos do cabeçalho IEEE 802.1q. Neste cabeçalho, destaca-se o campo *EtherType* que identifica cada protocolo de comunicação de camada superior encapsulado por ele. No caso particular dos protocolos de aplicação GOOSE e SMV, este valor é de **0x88B8** e **0x88BA**, respectivamente

(IEC-61850-8-1, 2003). A presença do campo *EtherType* possibilita que a função de *Demux* seja executada na camada de enlace. Nesse mesmo cabeçalho, o campo *VLAN TCI* possui doze bits para identificar a VLAN para a qual a mensagem deve ser destinada (campo *VID*) e três bits para indicar o nível de prioridade com que a mensagem deve ser tratada pelo receptor (campo *Prioridade*)⁷.

Finalmente, na parte inferior da figura se apresentam os campos que devem possuir, de forma geral, todas as mensagens que utilizam unicamente o *perfil-T* da norma IEC 61850 (ver seção 2.3). Desta forma, as mensagens GOOSE e SMV se diferenciam entre si tanto pelo valor do campo *EtherType* quanto pelos campos de cada *APDU*. No entanto, existe um campo chamado de *APPID* que serve para identificar a aplicação que gerou a mensagem. O valor do *APPID* deve ser único para cada processo de aplicação de cada IED do SAS.

Existem algumas considerações feitas pela norma IEC 61850 referentes aos valores de alguns campos dos três cabeçalhos apresentados na Figura 24. No Quadro 7 são apresentados os valores recomendados.

Quadro 7. Valores recomendados pela norma IEC61850 para os campos dos cabeçalhos IEEE 802.3, IEEE 802.1q.

<i>Campo</i>	<i>GOOSE</i>	<i>SMV</i>
<i>Endereço destino (Multicast)</i>	01 0C CD 01 00 00 até 01 0C CD 01 01 FF	01 0C CD 04 00 00 até 01 0C CD 04 01 FF
<i>EtherType</i>	0x88B8	0x88BA
<i>APPID</i>	0x0000 até 0x3FFF	0x4000 até 0x7FFF
<i>VID</i>	0x00	
<i>PRI</i>	0x04	
<i>Reserved1 e Reserved2</i>	0x00	

Fonte: (IEC 61850-9-2, 2003)

⁷ É importante salientar que o identificador de VLAN é diferente do grupo *Multicast* ao qual uma mensagem possa pertencer. As mensagens destinadas a grupos *Multicast* são identificadas por terem valor lógico verdadeiro atribuído ao bit menos significativo do byte mais significativo do endereço físico de destino (Kurose, 2013).

4.2.2 Formato das mensagens GOOSE

Quadro 8. Campos do PDU GOOSE.

Nome do Campo	Tipo do Campo	Descrição
<i>gocbRef</i>	String	Referência do bloco de controle Goose.
<i>timeAllowedtoLive</i>	Inteiro	Tempo máximo que o receptor deve aguardar pela próxima mensagem.
<i>dataSet</i>	String	Referência do <i>dataset</i> que contém os dados.
<i>goID</i>	String	Referência opcional da aplicação.
<i>T</i>	Tempo em UTC	Tempo em que o campo <i>stNum</i> foi alterado.
<i>stNum</i>	Inteiro	Contador que incrementa cada vez que uma mudança nas variáveis monitoradas é detectada.
<i>sqNum</i>	Inteiro	Contador que incrementa cada vez que uma mensagem GOOSE é gerada e transmitida.
<i>Test</i>	Booleano	Quando verdadeiro, a mensagem não deve ser considerada para efeitos de operação do sistema.
<i>confRev</i>	Inteiro	Número de mudanças feitas na configuração do DataSet.
<i>ndsCom</i>	Booleano	Indica que o bloco de controle GOOSE precisa de ser configurado.
<i>numDataSetEntries</i>	Inteiro	Quantidade de variáveis monitoradas na mensagem.
<i>allData</i>	Construído	Valor atual das variáveis monitoradas na mensagem

Fonte: (IEC 61850-8-1, 2003)

No Quadro 8 apresentam-se os campos obrigatórios e opcionais definidos pela norma IEC 61850 para o APDU do protocolo GOOSE. Destaca-se a presença do campo “*timeAllowedToLive*” (ver seção 3.2.2), e do campo “*allData*”. Este último contém as informações a serem transmitidas utilizando o serviço de comunicação GOOSE. Como exposto no capítulo anterior, as informações transmitidas por mensagens GOOSE são informações genéricas referentes a eventos que acontecem no SAS (por exemplo, mudanças na posição dos contatos dos seccionadores, requisições de acionamento de contatos, etc.). Outro campo importante é o campo “*t*” que possui informação do tempo em que a mensagem GOOSE foi gerada.

De forma geral, essas informações são codificadas seguindo o padrão ASN.1/BER, descrito no **Anexo B** do presente trabalho. Nesse anexo, apresentam-se exemplos particulares de mensagem GOOSE e SMV utilizando a mencionada codificação e extraídos da plataforma de simulação desenvolvida neste trabalho.

4.2.3 Formato das mensagens SMV

Quadro 9. Campos do PDU das mensagens SMV.

<i>Nome do Campo</i>	<i>Tipo do Campo</i>	<i>Descrição</i>
<i>noASDU</i>	Inteiro	Número de ASDU (Datasets) no APDU, 1 no caso de aplicações de proteção e 8 para medição.
<i>MSVID</i>	String	Referência ao bloco de controle SMV
<i>smpCnt</i>	Inteiro	Contador que incrementa cada vez que uma nova amostra é adquirida, deve ser reiniciado quando ocorre sinal de sincronização do relógio
<i>confRev</i>	Inteiro	Número de mudanças feitas na configuração do DataSet.
<i>smpSynch</i>	Booleano	Indica se existe uma fonte externa de sincronização de relógio
<i>sequenceofSamples</i>	Construído	Lista de valores relacionados com a definição do DataSet (nASDU).

Fonte: (IEC 61850-9-2, 2003)

No Quadro 9 se apresentam os campos obrigatórios definidos pela norma IEC 61850 para o PDU de mensagens SMV. Diferentemente do GOOSE, o SMV não tem campos obrigatórios que armazenem informação sobre o tempo em que as amostras são geradas. No entanto, a norma assume que os dispositivos do tipo MU são sincronizados com alta precisão através de mecanismos como pulsos emitidos uma vez a cada segundo (PPS) ou protocolos de rede como PTP (IEEE-1588). A norma também assume que a taxa de amostragem é fixa (4800 amostras por segundo para aplicações de proteção e 15360 amostras por segundo para aplicações de medição de energia) e desta forma os campos “*smpCnt*” e “*smpSynch*” servem para obter informação de tempo da geração das amostras. É importante destacar que o complemento 9-2LE da norma IEC-61850 define que para aplicações de proteção, cada mensagem deve incluir uma única amostra adquirida (um SDU por cada PDU). Já para aplicações de medição, cada mensagem deve incluir 8 amostras adquiridas (8 SDU por cada PDU). Note-se que apesar da taxa de

aquisição de amostras ser maior para aplicações de medição do que para aplicações de proteção, a taxa de transmissão de mensagens tem um comportamento inverso por conta do agrupamento das amostras nas aplicações de medição (4800 frames/s contra 1920 frames/s respectivamente).

Uma das grandes diferenças entre os protocolos do barramento de processo aqui expostos, é que o protocolo GOOSE contém informação de característica genérica (qualquer informação, desde que codificada em ANS.1/BER, pode ser inserida numa mensagem GOOSE), já as mensagens do protocolo SMV devem conter exclusivamente informações de tensão e corrente de cada uma das fases do sistema elétrico monitorado (fase *A*, *B*, *C* e *Neutro*). Assim, o complemento IEC-61850-9-2LE define um *dataset* chamado de *PhsMeas1*, que organiza as informações do campo “*SequenceofData*” (Quadro 9). Este *dataset* dispõe de quatro bytes por fase para armazenar o valor analógico medido (seja tensão ou corrente) com uma resolução de milésimos de volts (mV) ou milésimos de amperes (mA) dependendo do caso. Adicionalmente o *dataset PhsMeas1* dispõe de quatro bytes para indicar a qualidade do valor analógico armazenado. O Quadro 10 apresenta os campos do *dataset PhsMeas1* segundo a norma IEC 61850-9-2LE.

Quadro 10. Campos do *dataset PhsMeas1*.

Bytes	Nome do Campo	Conteúdo (8 bits)							
		0	1	2	3	4	5	6	7
0-3	Corrente FaseA	Magnitude em miliampères da corrente da fase A (inteiro 32 bits)							
4-7	Qualidade da menção de corrente da Fase A	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	derivado	bloqueado	test	fonte	Inexato	inconsistente
		old	falha	oscilatório	ref. errada	out. range	Over flwo	Validity 1	Validity 2
8-31	...Repetir estes campos para as fases B, C e Neutro nessa ordem...								
32-35	Tensão Fase A	Magnitude em decenas de milivoltios da tensão da fase A (inteiro 32 bits)							
36-39	Qualidade da menção da tensão da FaseA	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	derivado	bloqueado	test	fonte	Inexato	inconsistente
		old	falha	oscilatório	ref. errada	out. range	Over flwo	Validity 1	Validity 2
37-63	...Repetir estes campos para as fases B, C e Neutro nessa ordem...								

Fonte: (IEC-61850-9-2LE, 2004)

4.3 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

Como tem sido comentado ao longo do texto, no projeto de sistemas de automação para subestações é importante garantir que a rede de comunicação utilizada transmita mensagens entre IED, cumprindo alguns requisitos temporais. Na prática, o estudo do comportamento dessa rede de comunicação é uma tarefa árdua, pois o tempo de transmissão das mensagens tem que ser estimado entre diversos dispositivos e sob diversas condições de tráfego na rede (carga). Nesse contexto, os simuladores de rede são as ferramentas que melhor se adequam para conduzir este tipo de estudo (Nivethan, 2013).

Nesta seção se apresentam os “*frameworks*” OMNeT++ e INET, utilizados para implementar uma biblioteca que fornece todos os elementos necessários para avaliar o barramento de processo proposto pela norma IEC-61850. Essa biblioteca foi desenvolvida como parte dos objetivos propostos no presente trabalho e leva em conta todas as considerações de modelagem até aqui expostas.

4.3.1 Frameworks OMNeT++ e INET como Base para Plataforma de Simulação IEC-61850

Existe uma grande quantidade de ferramentas de simulação de redes: NS2, NS3, OPNET e OMNeT++ são alguma delas. Para este trabalho foi escolhida a ferramenta OMNeT++ por suas características de software livre, ser orientado a objetos, estar baseado numa linguagem altamente portátil e bem massificada como C++, além de estar disponível em diferentes sistemas operacionais (Windows, Linux e Mac).

O OMNeT++ não é um simulador em si, mas sim é um *framework*⁸ modular para construção e simulação de modelos seguindo o paradigma de simulação por eventos discreto (*Discrete Event Simulation – DES*). O OMNeT++ basicamente fornece infraestrutura e ferramentas que possibilita o desenvolvimento de simuladores, podendo ser utilizado em diversos domínios de aplicação (comunicação, transporte, biologia, etc.) (Varga, 2014).

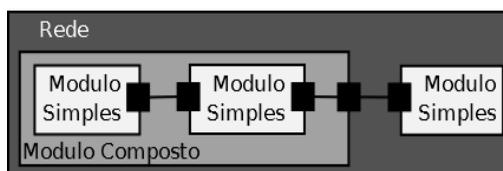
Os principais blocos funcionais do OMNeT++ são chamados de **módulos simples**. Neles ocorrem os diferentes **eventos** que determinam o comportamento da simulação. Os módulos simples possuem **portas de comunicação** as quais são utilizadas para conectá-los entre si e assim

⁸ Framework é definido como um software parcialmente completo, projetado para ser instanciado. (Buschmann, 1996).

formar módulos mais complexos chamados **módulos compostos**. Por outro lado, os eventos que acontecem nos módulos simples são representados em forma de **mensagens**, as quais podem ser transmitidas através das portas de comunicação para outros módulos ou para o mesmo módulo de origem, gerando na sequência outros eventos (Guerreiro, 2011).

Na Figura 25 e na Figura 26 descreve-se a arquitetura disponibilizada pelo OMNeT++ para desenvolver simuladores de sistemas.

Figura 25. Elementos funcionais do OMNeT++.



Fonte: (Varga, 2014).

Figura 26. Princípio de funcionamento do OMNeT++.



Fonte: (Varga, 2014).

Como visto na Figura 26, todos os eventos que acontecem no sistema são acomodados em uma pilha global. Uma entidade de software, chamada **escalador** (*scheduler*), é encarregada de extrair essas mensagens da pilha para encaminhá-las até os módulos de destino no tempo certo. Esta infraestrutura permite que o OMNeT++ seja utilizado com facilidade para a construção de simulações de sistemas representados em forma de rede, como é o caso dos sistemas de comunicação (Varga, 2014).

No OMNeT++, os módulos são definidos em arquivos com extensão **“.ned”**. Nestes arquivos se descrevem, dentre outros

componentes, a quantidade de portas de entrada e de saída dos módulos, os parâmetros de configuração, as estatísticas a serem coletadas.

O comportamento dos módulos é definido em outros arquivos que são codificados na linguagem C++ (extensão “.cc”). Funções de geração de mensagem, processamento de mensagem, execução de eventos temporizados, são exemplos de funções que podem ser executadas pelos programas codificados nestes arquivos. Finalmente, as informações armazenadas nos eventos (mensagens), são definidas em arquivos com extensão “.msg”. Os arquivos “.msg”, assim com os arquivos “.ned”, são codificados em uma linguagem particular do OMNeT++ e são os objetos visualizados no ambiente de simulação. Nestes arquivos é possível modelar os campos dos diferentes protocolos de um sistema de comunicação.

Por outro lado, INET é um *framework* desenvolvido como extensão do OMNeT++, o qual disponibiliza diversos módulos (simples e compostos) para a simulação específica de sistemas de comunicação baseados no modelo RM-OSI. Módulos como *Switches*, *Host* e diferentes meios de transmissão são disponibilizados por este *framework*. As mensagens utilizadas para a comunicação entre módulos do INET estão de acordo com alguns dos padrões mais utilizados no contexto das redes de comunicação. A lista inclui: IPv4, IPv6, TCP, SCTP, UDP PPP, Ethernet, 802.11, entre outros (INET, 2012).

No entanto, nem OMNeT++ nem INET possuem implementações de dispositivos ou mensagens para simular sistemas de automação de subestações de acordo com a norma IEC 61850. O desenvolvimento descrito na sequência, apresenta as extensões feitas neste trabalho no INET para criar uma ferramenta que viabilize este tipo de simulações.

4.3.2 Extensões feitas no INET para Suporte do Barramento de Processos IEC-61850

O *framework* INET está organizado por pastas de acordo com as camadas do RM-OSI. Mantendo essa ordem, os modelos de simulação e os protocolos de comunicação adicionados, como resultado do presente trabalho, foram concentrados nas pastas referentes às camadas *aplicação* e *enlace*. Os modelos da camada *física* não foram alterados, pois já possuem as características necessárias para a aplicação alvo.

Na sequência deste texto é apresentada a descrição de todas as extensões feitas para o desenvolvimento da plataforma de simulação⁹.

- *EtherAppGoose.ned*: Contém a definição do módulo simples para processamento/geração de mensagens GOOSE (portas, parâmetros, estatísticas, etc.) utilizado para a construção de IED do tipo P&C.
- *EtherAppGoose.cc* e *EtherAppGoose.h*: Contém a definição do comportamento do módulo *EtherAppGoose.ned*. Periodicamente gera eventos para construir mensagens no formato GOOSE e posteriormente os transmite para as entidades da camada de *enlace*. Quando um evento é recebido por este módulo, verifica-se se a mensagem é do tipo GOOSE e extrai as informações nele contidas para agir de acordo com os estados de operação representados na mensagem.
- *EtherGoose.msg*: Contém a definição dos campos das mensagens GOOSE. Cada campo da mensagem GOOSE é uma estrutura que está de acordo com a codificação ASN.1 (*Tag, Tamanho, Valor*. Anexo B) e a norma IEC-61850-8-1.
- *EtherGooseStruct.h*: Define as estruturas utilizadas nas mensagens GOOSE, assim como as constantes utilizadas na codificação ASN.1.
- *EtherAppSv.ned*, *EtherSv.msg*, *EtherSvStruct.h*: Possui uma função análoga à descrita para a modelagem do módulo gerador/processador de mensagens GOOSE, mas aplicada ao modelo gerador/processador de mensagens SMV. É utilizado tanto em IED do tipo MU (gerando SMV) quanto em IED do tipo P&C (processando SMV).
- *EtherAppSv.cc* e *EtherAppSv.h*: Definição do comportamento do módulo *EtherAppSv.ned*. Este módulo tem dois comportamentos configuráveis que não podem ser utilizados simultaneamente, estes são: comportamento como **gerador** e comportamento como **processador**. Caso o módulo seja configurado como “gerador”, periodicamente lança um evento (na pilha global de eventos) para construir e transmitir mensagens no formato SMV. Nesta mesma configuração, o módulo descarta qualquer mensagem recebida (sendo coerente com o explicado na **seção 4.1.1**). Quando configurado como “processador”, o módulo não gera nenhuma mensagem, mas na recepção de mensagens do tipo SMV, o

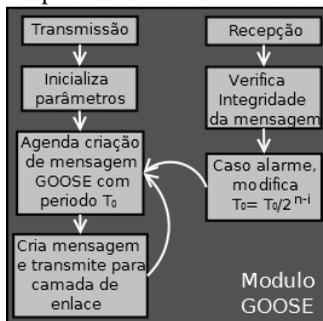
⁹ Alguns códigos originais do INET foram modificados para suportar mensagens de acordo com o padrão IEEE 802.1q, grupos *Multicast* e tratamento de prioridades no modelo do *Switch*.

módulo verifica e extrai as informações nele contidas. Nesta mesma configuração, caso a mensagem contenha valores de tensão/corrente considerados “atípicos” para a operação da subestação, o módulo avisa internamente ao módulo *P&C* da existência de uma falha no sistema. Para isto, é necessário que o módulo *EtherAppSv.ned* esteja inserido num módulo composto junto com um módulo do tipo *EtherAppGoose.ned*.

- *EtherEncapExt.cc*, *EtherEncapExt.h* e *EtherEncapExt.ned*: É um módulo que permite encapsular/descapsular tanto mensagens SMV quanto GOOSE. É baseado no módulo *EtherEncap* original do INET e foi projetado para executar a tarefa *Mux/Demux* da camada de enlace.

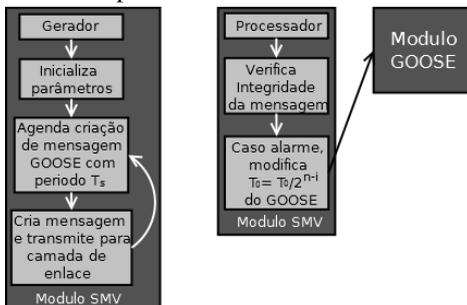
Na Figura 27 e na Figura 28 são apresentados os diagramas do comportamento tanto para o módulo GOOSE (*EtherAppGoose*) quanto para o módulo SMV (*EtherAppSv*), respectivamente.

Figura 27. Diagrama do comportamento do módulo GOOSE.



Fonte: Autor.

Figura 28 Diagrama do comportamento do módulo SMV.



Fonte: Autor

No Quadro 11 são apresentados os parâmetros de configuração e estatísticas que podem ser coletadas dos módulos *EtherAppGoose* e *EtherAppSv*.

Quadro 11. Parâmetros e estatísticas dos módulos GOOSE e SV.

Módulo	Estatísticas	Descrição dos Parâmetros de Configuráveis
GOOSE	Quantidade de mensagens recebidas	Endereço de destino da mensagem. Suporta endereço tipo <i>Multicast/Broadcast</i> .
		Periodo de geração de mensagens GOOSE.
	Quantidade de mensagens transmitidas	Tipo de IED de P&C (pode agir como IED de: Proteção, Intertravamento e Comando).
		Configuração de todos os campos da mensagem GOOSE (Quadro 8).
	end-to-end delay	Valores do campo AppID para diferenciar GOOSE provindos de aplicações de proteção, intertravamento ou comando (Figura 24).
	Configuração dos campos do cabeçalho IEEE 802.1q (Figura 24).	
SMV	Quantidade de mensagens recebidas	Endereço de destino da mensagem. Suporta endereço tipo <i>Multicast/Broadcast</i> .
		Caminho absoluto ou relativo do módulo do tipo P&C que recebe notificações de eventos no sistema. Caso não seja especificado, o módulo é considerado gerador.
	Quantidade de mensagens transmitidas	Define tempo de geração de mensagens SMV quando gerador.
		Configuração do tempo de geração de amostra de tensão e corrente quando configurado como gerador.
	end-to-end delay	Configuração de todos os campos da mensagem SMV (Quadro 9).
	Configuração dos campos do cabeçalho IEEE 802.1q (Figura 24).	

Fonte: Autor

4.3.3 Modelo de Simulação do Switch

Embora esteja fora do escopo da norma IEC-61850, a definição do comportamento de dispositivos de comutação de pacotes, como *Switches*, é essencial no projeto de redes de comunicação que buscam um desempenho temporal determinístico (Stemmer, 2010). Além disso, o emprego de topologias tipo estrela faz com que eventualmente os

Switches das redes possam receber todo o tráfego de uma rede. Nesse contexto, no presente trabalho foi desenvolvido um modelo de simulação de *Switch* de acordo com as exigências dos protocolos especificados pela norma, em especial pelos protocolos IEEE 802.3 e IEEE 802.1q. No modelo, foi incluída também a implementação de políticas de priorização de mensagem para suportar as classes de desempenho especificadas na norma (Quadro 5).

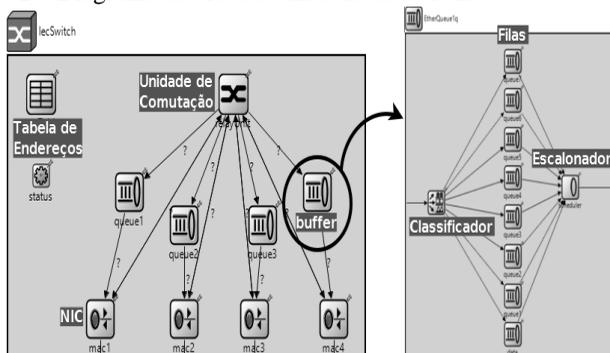
A operação do modelo de simulação do *switch* desenvolvido para este trabalho está baseada no método “*Store and Forward*”. Neste método de operação, o *Switch* deve aguardar pela recepção completa das mensagens antes de redirecioná-las/processá-las através da interface de comunicação apropriada (Netto, 2012). O modelo do *switch*, implementado em OMNeT++/INET, contém três elementos principais: As **placas de interface de rede** (ou *NIC – Network Interface Card*), a **unidade de comutação** (*Switch Fabric*) e as **filas de saída** (ou *buffer*). Neste modelo, existe uma *NIC* e oito *buffers* de saída (um para cada nível de prioridade do padrão IEEE 802.1q) em cada uma das portas disponíveis para conexão de equipamentos.

Quando uma mensagem é recebida em alguma das portas (*NIC*) do *switch*, esta é direcionada para a *unidade de comutação* com o objetivo de determinar por qual porta deve ser retransmitida para chegar até o seu destino. Na sequência, a mensagem é encaminhada para um módulo simples chamado de **classificador** (contido em cada uma das portas do *switch*), o qual coloca a mensagem em uma das oito *filas de saída* dependendo da sua prioridade. Finalmente, uma entidade chamada de *escalador* verifica a disponibilidade de mensagens em cada fila de saída e as processa com ordem de prioridade. Este algoritmo de priorização de mensagens é descrito na Figura 30, já a arquitetura do modelo de simulação do *switch* é apresentada na Figura 29.

O modelo de simulação do *switch* não implementa protocolos de registro automático de VLAN (*Multiple Registration Protocol - MRP*), consequentemente, para utilizar o recurso de restrição de domínio de *multicast/broadcast* através do cabeçalho do protocolo IEEE 802.1q, é necessário escrever um arquivo de configuração, o qual é carregado em tempo de execução no módulo simples “*tabela de endereço*”. Esse arquivo tem informações sobre: o endereço físico, a VLAN a qual pertence e a porta de comunicação onde cada IED está conectado. Caso o recurso de restrição de domínio de difusão não seja utilizado, o modelo do *switch* tratará indistintamente tanto as mensagens *multicast* (mesmo com cabeçalho IEEE 802.1q) quanto as mensagens *broadcast*. Neste caso (e no caso de mensagens com endereços de destino do tipo *Unicast*), o

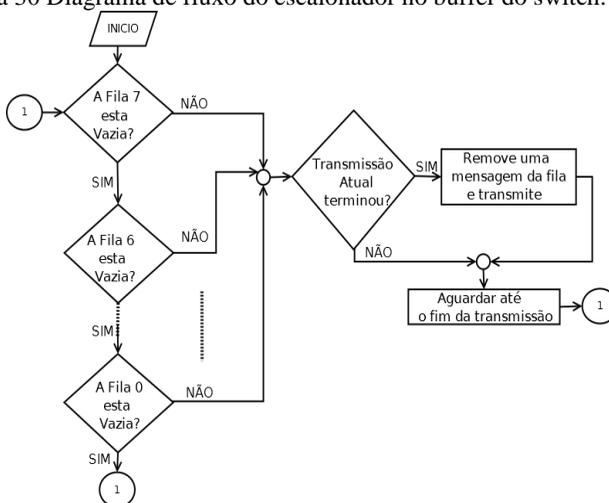
modelo de simulação do switch não precisa do arquivo de configuração e o módulo simples “*tabela de endereço*” é ajustado automaticamente a cada mensagem recebida.

Figura 29. Diagrama de bloco do modelo do switch.



Fonte: Autor.

Figura 30 Diagrama de fluxo do escalonador no buffer do switch.



Fonte: Autor

4.6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Não existe uma grande quantidade de trabalhos acadêmicos referentes ao tema de modelos de simulação de IED e simulação de sistemas de automação para subestações seguindo a norma IEC 61850.

Dos trabalhos encontrados, a maioria foca seus estudos no desempenho das redes de comunicação para subestações. Porém, as suas abordagens e os marcos ferramentais desses trabalhos diferem da abordagem utilizada nesta dissertação. Na sequência, se discutem os trabalhos acadêmicos mais relevantes.

Juarez *et al.* (2012) apresenta o desenvolvimento de extensões feitas no OMNeT++ e no *framework* INETMANET para suportar simulações de redes de comunicação baseadas na norma IEC 61850. Se apresentam os modelos dos dispositivos utilizados e o desenvolvimento de um *scheduler* para que OMNeT++ gerencie mensagens providas de redes externas ao ambiente de simulação. Apesar do trabalho de Juarez ter objetivos muito parecidos aos especificados no presente trabalho, a abordagem para a modelagem dos dispositivos são consideravelmente diferentes. No trabalho de Juarez não é possível determinar se os dispositivos modelados têm capacidade de codificar e decodificar mensagens segundo a IEC 61850 (por exemplo, os tamanhos das mensagens utilizadas por Juarez não estão em conformidade com os tamanhos validos das mensagens GOOSE ou SMV). Por outro lado, para fins de validação dos modelos, os autores apresentam resultados de simulação no contexto de um estudo de caso considerado típico da operação de subestações. Estes resultados são comparados com resultados obtidos em outros trabalhos sobre IEC 61850, especialmente com os achados por Sidhu *et al.* (2006).

Golshani *et al.* (2014) utilizou o trabalho do Juarez et al. (2012) como base para desenvolver modelos de simulação de IED no OMNeT++/INET. A descrição da modelagem de dispositivos feita pelos autores é mais detalhada. Da mesma forma que acontece no trabalho de Juarez et al. (2012), modelos de dispositivos P&C e MU são apresentados e adiciona a modelagem de um dispositivo conhecido como Unidade de Medição Fasorial (*Phasor Measurement Unit* - PMU). Os modelos de dispositivos apresentados nesse artigo possuem diferenças na forma de tratar as mensagens GOOSE, SMV e MMS. Os modelos, por exemplo têm camadas de aplicação separadas para tratar mensagens GOOSE/SMV e MMS e uma única camada de enlace. Já os modelos apresentados por Juarez et al. (2012) utilizam uma única camada de aplicação e as mensagens passam por camadas intermediarias separadas. É importante salientar que no final do trabalho, os autores reconhecem que não são utilizados os formatos adequados nas mensagens da camada de aplicação (GOOSE/SMV) e que a validação dos modelos é feita considerando unicamente o tamanho das mensagens e a frequência com que estes são transmitidos na rede.

Montazeri *et al.* (2013) utiliza Matlab para modelar os equipamentos de alta potência numa subestação (transformadores, linhas de transmissão, TC/TV, etc.). Por outro lado, o SAS é modelado utilizando OMNeT++. Um *scheduler*, muito parecido com o desenvolvido em Juarez *et al.* (2012), é desenvolvido para estabelecer comunicação entre Matlab e OMNeT++. O texto desse artigo unicamente apresenta modelos de dispositivos P&C, portanto mensagens SMV não são modeladas. A estrutura interna dos dispositivos modelados é diferente da utilizada dos trabalhos citados. Montazeri *et al.* (2013) utiliza uma camada intermediária, acima da camada de enlace, para tratar separadamente as mensagens GOOSE e as mensagens MMS. Além disso, não apresenta concretamente uma estrutura de mensagens segundo IEC 61850. Apesar de não mostrar resultados de simulação, esse artigo propõe um estudo de caso de uma subestação com 11 *bays* e cada *bay* contendo 2 IED (*um Bay Controller Unit – BCU e um Bay Protection Unit – BPU*), sendo este um estudo mais complexo do que o apresentado por Juárez *et al.* (2012).

Sidhu *et al.* (2006), (2007) e (2008) publicaram uma série de artigos onde apresenta a modelagem de dispositivos do SAS utilizando a ferramenta OPNET. Nestes artigos se exploram diferentes arquiteturas de redes, diferentes larguras de banda para o canal de transmissão e diferentes técnicas de escalonamento de mensagens nas filas de transmissão dos IED. Se apresentam resultados de simulação que comprovam que os SAS projetados atendem os requisitos temporais definidos pela norma IEC 61850.

Kanabar (2011) utiliza os modelos de Sidhu *et al.* (2006) para estudar o desempenho e a confiabilidade do barramento de processo seguindo a norma IEC 61850. Neste trabalho apresenta-se o efeito que têm o fato de uma mensagens SMV não chegar até o seu destino (perda de mensagem SMV). Em especial, são analisados os efeitos destas perdas em aplicações para relés de proteção e propõe-se uma solução computacional para diminuí-los.

Nivethan (2013) estende o trabalho feito por Sidhu *et al.* (2006) e adiciona aos modelos em OPNET, codificação e decodificação de mensagens GOOSE/SMV seguindo a norma IEC 61850.

Kruger (2013) e Konka (2011) fazem uma análise detalhada da estrutura das mensagens GOOSE e SMV, respectivamente. Os dois trabalhos apresentam esforços referentes à criação de geradores de mensagens para serem utilizados em conjunto com equipamentos reais. O gerador de mensagens GOOSE apresentado no Kruger (2013) foi desenvolvido com ajuda do software *IEDScout* da empresa *OMICRON*;

já o gerador de mensagens SMV apresentado por *Konka* (2011), foi desenvolvido no simulador NS3.

Zhao (2012) apresenta o desenvolvimento de uma interface de software que tem como objetivo ser utilizada no hardware de MU comerciais. Nesse documento é analisada (da mesma forma que o trabalho em *Konka* (2011)) a estrutura do protocolo SMV.

Pereira *et al.* (2013) apresentam resultados de pesquisas feitas pela empresa *conprove* (fabricante brasileiro de equipamentos para o setor elétrico) sobre o desempenho de mensagens SMV seguindo a norma IEC 61850-9-2. Além de apresentar uma análise detalhada da mensagem SMV, apresentam-se resultados referentes à utilização de 10 MU em um barramento de comunicação com largura de banda de 100 Mbps, concluindo que é possível utilizar esta tecnologia em aplicações de proteção elétrica.

No Quadro 12 apresenta-se um comparativo entre os trabalhos encontrados na literatura e o trabalho descrito no presente documento. Destaca-se o desenvolvimento de um modelo para *switch*, a configuração de um estudo de caso considerado realista e a utilização de ferramentas analíticas para estudar o comportamento temporal do barramento de processos IEC 61850. Estes dois últimos tópicos, serão abordados no seguinte capítulo.

Quadro 12. Comparativo da revisão bibliográfica com o presente trabalho

Autor	Plataforma	Análise Temporal	Modelos			Set-up Real	Protocolos		
			MU	P&C	Switch		Goose	S V	M S
<i>Sidhu</i>	OPNET	Não	✓	✓		Não	✓	✓	✓
<i>Juárez</i>	OMNET	Não	✓	✓		Não	✓	✓	✓
<i>Golshani</i>	OMNET	Não	✓	✓		Não	✓	✓	✓
<i>Nivethan</i>	OPNET	Não	✓	✓		Sim	✓	✓	
De La Hoz	OMNET	Sim	✓	✓	✓	Sim	✓	✓	

Fonte: Autor.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentou-se uma classificação dos dispositivos do barramento de processo a fim de obter suas representações sob o ponto de vista da comunicação. Nesse sentido, é importante salientar que, uma vez iniciado o processo de simulação no OMNeT++, os parâmetros de configuração dos modelos desenvolvidos (Quadro 11) ficam invariáveis,

com isso a rede mantém o mesmo tipo de mensagens durante toda a simulação e a dinâmica do sistema simulado é limitada às mudanças que possam acontecer na informação contida nestas mensagens.

Tanto a Parte 9-2 como a Parte 8-1 da norma IEC-61850 apresentam tabelas chamadas de Declaração de Conformidade da Implementação do Protocolo (PICS – *Protocol Implementation Conformance Statement*) com as quais os fabricantes documentam as capacidades de comunicação de cada dispositivo fornecido. Considerando que os modelos não implementam a pilha de comunicação MMS (ver Seção 4.1.1, Seção 4.1.2 e Figura 23), no Quadro 13 e no Quadro 14 apresentam-se as tabelas PICS dos modelos expostos neste capítulo.

Finalmente, apesar de não terem sido implementados os serviços de configuração, é possível gerar arquivos *CID* ou *ICD* para cada dispositivo inserido no ambiente simulado. Isso pode ser feito a partir dos valores configurados nos parâmetros dos modelos em conjunto com ferramentas SCL externas (como por exemplo o software *IEDModeler*).

Quadro 13. PICS modelo MU.

<i>Abreviatura</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Subscritor</i>	<i>Publicador</i>
<i>A1</i>	Cli/Ser Perfil-A	NÃO	NÃO
<i>A2</i>	SV Perfil-A	SIM	SIM
<i>T1</i>	TCP/IP Perfil-T	NÃO	NÃO
<i>T2</i>	SV Perfil-T	SIM	SIM
<i>SendMSVMessage</i>			SIM

Fonte: Autor

Quadro 14. PICS modelo P&C.

<i>Abreviatura</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Subscritor</i>	<i>Publicador</i>
<i>A1</i>	Cli/Ser Perfil-A	NÃO	NÃO
<i>A2</i>	GOOSE Perfil-A	SIM	SIM
<i>T1</i>	TCP/IP Perfil-T	NÃO	NÃO
<i>T3</i>	GOOSE Perfil-T	SIM	SIM
<i>T5</i>	Sinc. Tempo Perfil-T	NÃO	NÃO
<i>GOOSE Services</i>		SIM	SIM
<i>SendGooseMessage</i>			SIM
<i>GOOSE Control Block (GoCB)</i>			SIM

Fonte: Autor

5. ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TEMPORAIS DO BARRAMENTO DE PROCESSO IEC 61850

Neste capítulo apresenta-se um cenário típico da operação de subestações. Este estudo de caso serve para avaliar o ambiente de simulação desenvolvido neste trabalho. A partir desse estudo de caso, apresenta-se a utilização de ferramentas matemáticas para estudar o comportamento temporal do barramento de processos IEC 61850.

5.1 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Tendo apresentado os modelados de simulação desenvolvidos e os respectivos protocolos de comunicação, é preciso especificar o contexto no qual estes modelos serão inseridos a fim de validar o seu comportamento e as suas características sob o ponto de vista da comunicação. A abordagem apresentada na norma IEC 61850-5 foi utilizada neste trabalho para definir o estudo de caso descrito na sequência.

5.1.1 Especificações e considerações do estudo de caso

Devido à grande quantidade de arquiteturas e tipos de subestações, é difícil determinar qual delas representa um maior desafio para o cumprimento dos requisitos temporais definidos pela norma IEC 61850. No entanto, para efeitos da validação do funcionamento dos modelos de simulação, qualquer uma destas arquiteturas pode ser utilizada (IEC-61850-5, 2003).

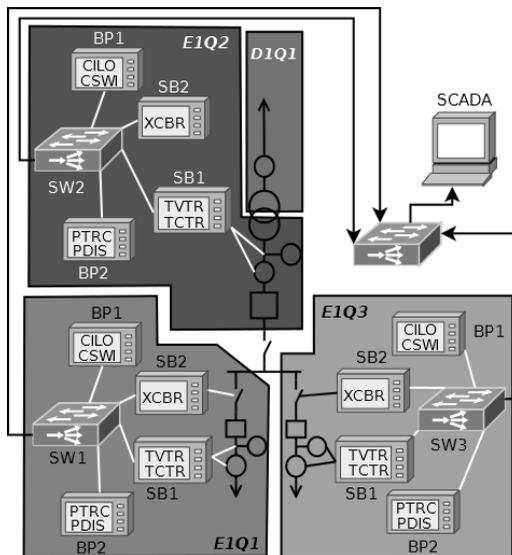
Neste trabalho, foram analisadas duas configurações de subestação conhecidas como T1-1 e D2-1. Estas configurações são tipicamente utilizadas para subestações de transformação de níveis de tensão de 220kV para 132kV. O critério de escolha foi a simplicidade em termos de quantidade de circuitos alimentadores (Ramirez, 1991). Outro motivo para a escolha destas duas configurações é o fato de serem utilizadas na maioria da literatura citada no capítulo anterior, assim é possível estabelecer comparações entre resultados. Por outro lado, as funções do SAS foram selecionadas independentemente da sua existência em sistemas de automação e proteção reais.

Para avaliar o comportamento dos dispositivos modelados neste trabalho, foram analisadas as mensagens que trafegam pelo barramento de processo sob o pior caso de operação das subestações escolhidas. As mensagens do estudo de caso são definidas para atender a maior classe de

desempenho especificada pela norma (classe 1A do Quadro 5). Neste contexto, o conjunto SAS/subestação deve passar pelos seguintes quatro estados:

- *Seguro*: Neste estado, as mensagens que trafegam pelo barramento de processos (tanto GOOSE quanto SMV) têm uma frequência fixa e carregam informações do sistema em estado estável (sinal senoidal para SMV e estado dos contatos dos relés, etc. para GOOSE).
- *Alerta*: Neste estado as mensagens que trafegam pelo barramento de processos ainda têm uma frequência fixa. No entanto, a informação carregada pelas mensagens SMV indica a presença de valores de corrente/tensão considerados de “*emergência*”, representando a ocorrência de um evento na subestação.
- *Emergência*: Neste estado, as mensagens GOOSE não têm mais a mesma frequência inicial, devido à detecção de um evento na subestação. Esta frequência é alterada seguindo o comportamento explicado na Figura 19.
- *Pós-Falta*: O sistema retorna no seu estado estável mas com novos valores no estado dos dispositivos.

Figura 31. Diagrama do cenário T1-1.

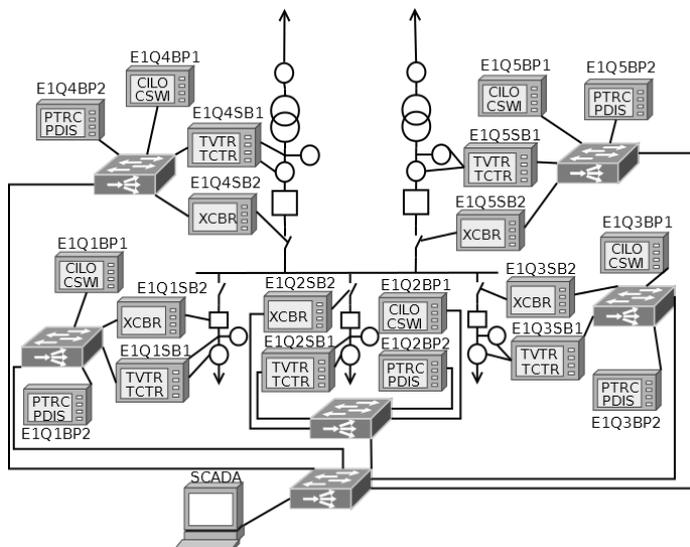


Fonte: Autor.

Na Figura 31 e na Figura 32 se apresentam os dois cenários estudados neste trabalho. Tanto os diagramas unifilares quanto a designação de funções, dispositivos físicos e LN das subestações são apresentadas nestas figuras.

A nomenclatura utilizada para designar os nomes dos dispositivos do SAS e as partes da subestação estão de acordo com a norma IEC 61346¹⁰. Em cada *bay* (*EIQ1*, *EIQ2*, *EIQ3* e *DIQ1*), os dispositivos de nome **SBI** representam dispositivos do grupo *MU*. Por outro lado, os dispositivos **BPI**, **BP2** e **SB2** (lógica de intertravamento, proteção e comando respectivamente) representam equipamentos do grupo *P&C*. Os nomes dentro de cada dispositivo indicam os Nós Lógicos designados neles. Note-se que nos dois cenários foi selecionada uma topologia em estrela para interconectar os dispositivos da rede de comunicação do SAS. Em caso de necessidade, esta topologia pode ser substituída por outras topologias como, por exemplo, topologias em anel, topologias redundantes, etc.

Figura 32. Diagrama dos cenários D2-1.



Fonte: Autor.

¹⁰ IEC 61346, Industrial systems, installations and equipment and industrial products – Structuring principles and reference designations

5.1.2 Descrição dos eventos do estudo de caso

Para validar o funcionamento dos modelos de simulação desenvolvidos neste trabalho, foram definidos alguns eventos a serem analisados durante as simulações dos cenários T1-1 e D2-1. Estes eventos permitem estabelecer uma relação de comunicação entre os dispositivos do SAS, assim como permitem obter uma estimativa do tráfego na rede de comunicação em condições próprias da operação de uma subestação.

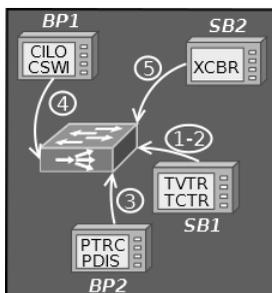
Para o cenário da subestação T1-1, são definidos os seguintes eventos (Figura 33):

1. Em condições de operação segura, os IED com nome **SBI** (i.e. aqueles do tipo **MU**) transmitem valores digitalizados de tensão e corrente utilizando mensagens de acordo com o protocolo SMV definido na Parte 9-2 da IEC 61850 (associação tipo *multicast*).
2. Uma falha é gerada no “bay” **E1Q1** e o Nó Logico PDIS (contido no IED **BP2**) recebe uma mensagem da *Merging Unit (SBI)* com valores de corrente e tensão considerado de “emergência”.
3. Um comando solicitando a abertura do disjuntor do “bay” **E1Q1** é encaminhado desde o LN PDIS para o LN CSWI (este último contido no IED **BPI**). A informação é transmitida utilizando mensagens GOOSE e seguindo as definições que se encontram na Parte 8-1 da norma IEC 61850.
4. Na sequência, uma outra mensagem GOOSE é transmitida desde o LN CSWI para o LN XCBR (do IED **SB2**) cuja função é a de efetuar a abertura/fechamento do disjuntor do “bay”. Como visto anteriormente, pode-se dizer que o LN XCBR é a virtualização do equipamento que possui o contato do sistema de proteção.
5. Uma vez efetuada a operação de abertura do contato, uma nova mensagem GOOSE é gerada pelo LN XCBR e dirigida ao LN CSWI para notificar a mudança no estado do contato. Esta mensagem pode ser transmitida em modo *broadcast*.

Na Figura 33 apresenta-se a sequência de eventos listados anteriormente para o cenário da subestação T1-1.

Apesar da subestação D2-1 também permitir o estudo das redes de comunicação em SAS, neste trabalho foi escolhida a subestação T1-1 como estudo de caso principal, pois esta possui as condições suficientes e desejáveis para descrever a operação de subestações. Mesmo assim, na sequência serão descritos os eventos para o caso da subestação em configuração D2-1 (Figura 32), tentando simular uma situação de rejeição de carga por falha num dos *bays* de geração (E1Q4):

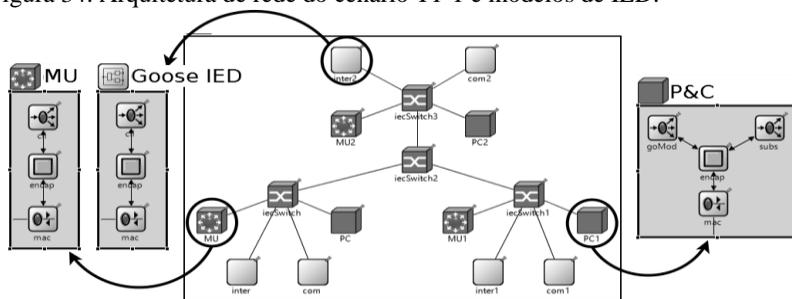
Figura 33. Sequência de eventos no cenário T1-1.



Fonte: Autor

1. Em condições de operação segura, os LN TCTR/TVTR (*MU*) transmitem via SMV os valores de tensão e corrente do “bay”. Estas mensagens são recebidas pelos respectivos LN de proteção e controle.
2. Uma falha acontece no secundário (lado de baixa tensão) do transformador do “bay” *EIQ4* e é detectada pelo dispositivo de proteção *EIQ4BP2* por meio da recepção de valores de tensão e de corrente considerados de emergência.
3. Logo depois de perceber a falha, este dispositivo encaminha uma mensagem GOOSE para que os LN de controle CSWI/CILO (*EIQ4BP1*) comandem a abertura do disjuntor virtualizado pelo LN XCBR (*EIQ4SB2*). Isto é, quando o comando GOOSE do PTRC/PDIS é recebido pelo CSWI/CILO, este último repassa uma mensagem GOOSE para o XCBR, que finalmente executa o comando (abre o contato).
4. O LN XCBR retorna uma mensagem GOOSE (que pode ser *broadcast*) notificando a mudança no estado.
5. Com a notificação da execução do comando, o dispositivo de controle CSWI/CILO no “bay” do secundário do transformador encaminha uma mensagem GOOSE para o LN CSWI/CILO do “bay” *Q2* indicando que o disjuntor dessa carga precisa ser aberto.
6. O LN CSWI/CILO do *EIQ2BP1* recebe a mensagem e gera uma nova mensagem GOOSE encaminhada para o LN XCBR *EIQ2B2*, o qual finalmente abre o contato do disjuntor.
7. Uma vez que o comando é executado, o LN XCBR do bay *Q2* retorna uma mensagem GOOSE para o LN CSWI/CILO indicando a execução da mensagem. Finalmente, o sistema retorna ao estado estável.

Figura 34. Arquitetura de rede do cenário T1-1 e modelos de IED.



Fonte: Autor

Note-se que os eventos para os dois cenários descritos estão definidos para um *bay* específico. No entanto, estes eventos podem ser reproduzidos em qualquer um ou em todos os *bays* da subestação.

Na Figura 34, se apresenta a rede de comunicação do cenário T1-1 destacando a estrutura interna dos modelos de simulação (módulos compostos) que representam cada IED do SAS (Figura 23).

5.2 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TEMPORAIS DO BARRAMENTO DE PROCESSO IEC 61850

Nesta seção se apresenta uma análise dos sistemas de automação para subestações baseados na norma IEC 61850 sob o ponto de vista das suas propriedades temporais (análise de escalabilidade tempo real).

5.2.1 Definições e Conceitos

Os sistemas computacionais de tempo real são aqueles caracterizados por executar processos (tarefas) com restrições temporais bem definidas, as quais têm que ser atendidas para conseguir o comportamento desejado no sistema (Farines et al, 2000).

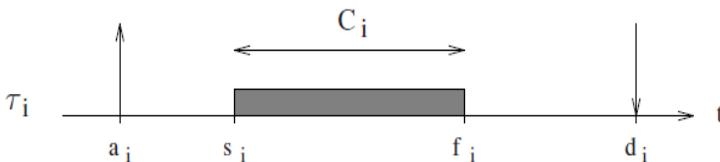
Quando estes processos competem por recursos (CPU, memória, arquivos, etc.) pode existir superposição no seu tempo de execução, comprometendo assim o correto funcionamento do sistema. Isso pode ser evitado ordenando a execução das tarefas de acordo com um critério predefinido e conhecido como **política de escalonamento**. Os estudos de **escalabilidade** buscam demonstrar que uma determinada política de escalonamento consegue organizar as tarefas de tal forma que o atendimento das restrições temporais de cada uma delas é garantido (Buttazzo, 2011).

De forma geral, as tarefas de um sistema de tempo real podem ser caracterizadas pelos seguintes parâmetros:

- *Tempo de chegada* (a_i) – É o tempo em que a tarefa está pronta para ser executada, na literatura também é conhecido como tempo de liberação.
- *Tempo de computação* (C_i) – É o tempo necessário para que a tarefa seja executada sem interrupção.
- *Prazo de entrega* (*Deadline* – D_i) – É o tempo antes do qual a tarefa deve ser completada.
- *Tempo de resposta no pior caso* (R_i) – É a diferença entre o tempo em que a tarefa é completada e o tempo de chegada ($R_i = f_i - a_i$)

Na Figura 35 apresenta-se o modelo de tarefa de sistemas em tempo real destacando os parâmetros definidos anteriormente.

Figura 35. Modelo de tarefa de sistema de tempo real.



Fonte: (Buttazzo, 2011)

Segundo o seu comportamento, as tarefas que o sistema executa podem ser classificadas em (Farines et al, 2000):

- *Periódicas* – Quando as liberações do processamento dela ocorrem regularmente a cada intervalo de tempo chamado de período (T_i).
- *Aperiódicas ou Assíncronas* – Quando a liberação do seu processamento responde a eventos internos ou externos, definindo assim uma característica aleatória.
- *Esporádicas* – Correspondem a um subconjunto das tarefas aperiódicas. Apresentam como característica principal a restrição de um intervalo de tempo mínimo entre duas liberações consecutivas.

Com as definições anteriores, é possível se fazer uma analogia entre as tarefas executadas por sistemas computacionais e as mensagens que trafegam pelo barramento de processos IEC 61850 (tanto GOOSE quanto SMV). É importante salientar que o recurso compartilhado no caso

das redes de comunicação é o meio de transmissão (ou a fila de transmissão dos *Switches*, no caso de redes comutadas).

Iniciando com as mensagens SMV, estas podem ser modeladas como tarefas periódicas, dado que a sua taxa de transmissão é fixa (são ativadas com período fixo, T_s). Por outro lado, as mensagens GOOSE, dependendo do estado de operação do sistema de potência (seguro, alerta ou emergência), podem ser consideradas tarefas esporádicas, pois estas são transmitidas com período variável e com um tempo mínimo entre duas transmissões consecutivas (este tempo é especificado pelo parâmetro *TTL*).

Tendo classificado o tipo de tarefas existentes no sistema, é possível definir seus atributos:

- O *tempo de chegada* (a_i) é associado ao tempo em que a mensagem está pronta para ser transmitida. Ou seja, é o tempo em que a mensagem é colocada no buffer de transmissão do módulo emissor (seja IED ou *Switch*).
- O *tempo de computação* (C_i) é associado ao maior tempo necessário para transmitir uma dada mensagem m . É chamado também de tempo de transmissão e calcula-se com a relação *Tamanho da mensagem(bits)/Largura de Banda(bps)*.
- O *Deadline* (D_i), no caso das mensagens SMV, é igual ao período com que as mensagens são transmitidas. Já no caso das mensagens GOOSE o D_i depende do estado de operação sistema. Em estado “seguro” o D_m é igual ao período da mensagem (indicado no campo *TTL*), mas em estado “emergência”, o D_m será igual ao mínimo entre o *TTL* e a restrição de tempo definida pela classe de mensagens 1A, isso é $\min(TTL, 3ms)$ (Quadro 5).
- O *tempo de resposta no pior caso* (R_i) é associado com o maior tempo necessário para uma mensagem chegar até o seu destinatário, medido desde o tempo de liberação (Figura 21).

Em geral pode existir uma variação no tempo utilizado para colocar as mensagens na fila de transmissão dos dispositivos da rede (tanto *Switches* quanto IED). Esta variação é chamada de *jitter* (J_i) e é definida como a diferença entre o menor e o maior tempo utilizado para colocar uma mensagem no *buffer* de transmissão. O *jitter* é um parâmetro importante para a correta medição do R_i (Tindell, 1994).

No geral, o barramento de processos IEC 61850 pode ser considerado um sistemas não *preemptivo*. Ou seja, quando uma mensagem inicia sua transmissão, esta ocupa o canal até o final da

transmissão sem poder ser suspensa ou abortada. Assim, o termo B_i , conhecido como *bloqueio*, representa o tempo que uma mensagem m é retida no buffer de transmissão por causa de uma mensagem n (de menor prioridade) estar ocupando o canal. Por outro lado, o termo τ_{bit} é utilizado para representar o tempo necessário para transmitir um bit da mensagem no canal de comunicação. No caso de uma rede com largura de banda de 100 Mbps, o valor de τ_{bit} é 10 nanosegundos.

5.2.2 Análise temporal do caso de estudo T1-1

Nesta seção, apresenta-se o caso de estudo T1-1 sob o ponto de vista de sistema de tempo real. É importante lembrar que neste caso de estudo não existe transmissão de dados entre diferentes *bays* e, portanto, a análise a seguir é referente ao tráfego de qualquer um dos *bays* da arquitetura T1-1 (Figura 33).

No Quadro 15 apresentam-se as características gerais e configurações utilizadas na rede de comunicação do caso de estudo.

Quadro 15. Caracterização da rede do caso de estudo T1-1.

Parâmetro	Valor
<i>Quantidade de Bay</i>	3
<i>Quantidade de MU por Bay</i>	1
<i>Quantidade de P&C por Bay</i>	3
<i>Largura de Banda dos Canais (Mbps)</i>	100
<i>Tamanho Mensagem GOOSE (bytes)</i>	161 (está dentro dos valores típicos das mensagens GOOSE)
<i>Período Mensagem GOOSE (ms)</i>	<i>Operação segura:</i> 992 <i>Operação emergência (pior caso):</i> 31
<i>Carga máxima da Rede por cada dispositivo P&C (Mbps)</i>	<i>Operação segura:</i> 0,001298 <i>Operação emergência (pior caso):</i> 0,041488
<i>Tamanho Mensagem SMV (bytes)</i>	162 (está dentro dos valores típicos das mensagens SMV)
<i>Período Mensagem SMV (ms)</i>	0,208333 (4800 frames/s)
<i>Carga máxima da Rede por cada MU (Mbps)</i>	6,22
<i>Topologia da Rede</i>	Estrela

Fonte: Autor.

Após definir as características gerais da rede de comunicação, é importante definir os parâmetros individuais das mensagens que por ela

trafegam. Portanto no Quadro 16 se apresentam os parâmetros das mensagens de um *bay* da subestação T1-1 quando o sistema passa do estado de operação “alerta” para o estado de operação em “emergência” (pior cenário de operação). As primeiras colunas desse quadro fazem referência aos eventos ilustrados na Figura 33. É importante salientar que o protocolo *Ethernet* especifica um tempo conhecido como *Inter Frame Gap (IFG)* durante o qual o canal deve ficar livre depois de uma mensagem ser transmitida. Assim, o tempo de computação C_m deve incluir o IFG, cujo valor é igual ao tempo necessário para transmitir 96 bits no canal de comunicação. Para um tempo de bit (τ_{bit}) de 10 ns o *IFG* é igual a 960 ns. Pode-se observar no Quadro 16 que a utilização total do sistema, definida como $U_{Total} = \sum C_i/T_i$ (para todo i pertencendo ao conjunto de tarefas) é baixa (próximo de 7%), deixando uma ampla margem para expansão do sistema. Esta expansão, por exemplo, pode ser atingida através da diminuição do período das mensagens ou do aumento da quantidade de informação transmitida por cada mensagem, seja, aumentando o seu tamanho ou aumentando a quantidade de dispositivos da rede.

Quadro 16. Parâmetros das mensagens do sistema T1-1.

<i>Mensagem entre IED</i>			T_i (us)	D_i (us)	C_i (us)	J_i (us)	Utilização
De	Para	Evento					
<i>MU</i>	Proteção	(1-2)	208,333	208,333	13,87	1	6,22%
<i>Proteção</i>	Intertravamento	(3)	31000	3000	13,79	1	0,042%
<i>Intertravamento</i>	Comando	(4)	31000	3000	13,79	1	0,042%
<i>Comando</i>	Intertravamento	(5)	31000	3000	13,79	1	0,042%

Fonte: Autor.

De acordo com Davis *et al.* (2007), a Equação (1) permite estimar o tempo de resposta (R_m) das mensagens de um sistema sem preempção, assumindo que existe uma definição de prioridades fixa na execução das tarefas.

$$R_i = \max_{q=0 \dots Q_m-1} R_i(q) \quad (1)$$

Onde:

$$R_i(q) = J_i + w_i(q) - qT_i + C_i \quad (1.a)$$

$$Q = \left\lceil \frac{t_i + J_i}{T_i} \right\rceil \quad (1.b)$$

$$t_i = B_i + \sum_{\forall j \in hp(m) \cup m} \left\lceil \frac{t_j + J_j}{T_j} \right\rceil C_j \quad (1.c)$$

$$w_i(q) = B_i + qC_i + \sum_{\forall j \in hp(m)} \left\lceil \frac{w_i + J_j + \tau_{bit}}{T_j} \right\rceil C_j \quad (1. d)$$

Nas partes 1.b e 1.c da Equação 1, o termo t_i representa a janela de tempo em que são transmitidas, de forma contínua, mensagens de prioridade superior ou igual a da mensagem de interesse (i). Este termo é conhecido como *período ocupado de nível i* ou *i -busy-period*. Pela definição anterior e pela natureza de sistema sem preempção, em determinados casos, para determinar o pior tempo de resposta é necessário analisar várias instâncias da mesma mensagem dentro do *busy-period*. Essas instâncias (representadas pelo termo q) formam um conjunto finito delimitado pelo valor da variável Q (Equação 1.b).

Na parte 1.d da Equação 1, o termo w_i representa o atraso que sofre uma tarefa i antes de iniciar a sua execução, neste termo inclui-se a **interferência** que causam tarefas de maior prioridade (representado pelo limite $hp(m)$ do somatório) e o **bloqueio** (B_i) causado por tarefas de menor prioridade que detém o barramento de comunicação antes da tarefa i ter sido liberada.

Para o cálculo tanto do termo t_i quanto do termo w_i , considera-se que estes são monotonicamente crescentes e portanto as suas equações podem ser resolvidas de forma iterativa, até a sua convergência. No procedimento proposto por Davis *et al.* (2007), assume-se $B_i + qC_i$ como valor inicial de w_i e C_i como valor inicial para t_i .

Em conclusão, esta análise torna possível, além de permitir uma formulação matemática para o cálculo do tempo de resposta das mensagens, utilizar ferramentas analíticas para o estudo do comportamento temporal das redes de comunicação IEC-61850. Na sequência, apresenta-se a forma em que esta ferramenta analítica é utilizada para estudar o comportamento temporal da rede de comunicação T1-1.

5.2.3 Política de Escalonamento das Mensagens em T1-1

As políticas de escalonamento atribuem prioridades às tarefas seguindo um critério específico. Tipicamente para o modelo de tarefa utilizado neste trabalho (tarefas com tempo de computação conhecido e deadline menor ao período da tarefa) a política de escalonamento consiste em atribuir prioridades maiores para tarefas que têm menor *deadline* relativo. Esta abordagem é conhecida como *Deadline Monotonic* (DM) (Buttazzo, 2011).

Neste contexto, e de acordo com o pior cenário de operação do caso de estudo T1-1 (Quadro 16 e Figura 33), as mensagens transmitidas por dispositivos do tipo *MU* devem receber maior prioridade de processamento do que aquelas transmitidas por dispositivos do tipo *P&C*.

Segundo o padrão IEEE 802.1q, existem sete níveis de prioridade, onde 1 indica a menor prioridade possível e 7 a máxima prioridade. Assim, seguindo a política de escalonamento *DM*, foi selecionada:

- A prioridade 7 para as mensagens SMV (*tarefa T₇*).
- A prioridade 6 para as mensagens GOOSE produzidas por dispositivos de proteção (*tarefa T₆*).
- A prioridade 5 para mensagens GOOSE produzidas por dispositivos de intertravamento (*tarefa T₅*).
- A prioridade 4 para mensagens GOOSE produzidas por dispositivos de comando (*tarefa T₄*).
- Possíveis mensagens que aparecem na rede, na forma de tráfego de fundo, têm atribuídas o nível de prioridade 3 (por exemplo MMS gerados pelo sistema supervisório) (*tarefa T₃*).

De acordo com os dados do Quadro 16, na sequência se apresenta a utilização da Equação (1) para verificar a escalonabilidade das mensagens do caso de estudo T1-1 *sob o ponto de vista das portas do switch*, desta forma o tempo de resposta calculado é o tempo gasto por uma mensagem desde a chegada no *switch* até a chegada no seu destino. É importante salientar que, pela definição do modelo de sistema sem preempção, uma mensagem só pode ser bloqueada ($B_m \neq 0$) uma única vez. A análise temporal apresentada na sequência, é feita para todas as tarefas do sistema, lembrando que, desconsiderando o tráfego de fundo, T_4 é a tarefa de menor prioridade do sistema. Ao demonstrar que o conjunto de tarefas é escalonável (ou seja, todas as mensagens conseguem ser retransmitidas até o seu destino antes de cumprir o seu *deadline*), conclui-se que o sistema cumpre com os requisitos temporais definidos pela norma IEC 61850.

É importante salientar que, dado que o modelo das tarefas impede que uma tarefa sofra bloqueio dela mesma, a tarefa de menor prioridade tem valor de bloqueio zero ($B_{T_4} = 0$).

Inicialmente será calculado o tamanho do *i-busy-period* (t_i), na sequencias será calculada a quantidade de instancias (Q_i) que devem ser analisadas dentro de t_i e finalmente será calculado R_i .

- Cálculo de t_i e Q para a tarefa T_7 .

Considerando o tempo de computação da tarefa T_7 como o valor inicial de t_{T7} , tem-se que:

$$t_{T7}^0 = 13,87 \mu\text{s};$$

Dado que T_7 é a tarefa de maior prioridade, o somatório do termo t_{T7} é igual a 0 e portanto o **7-busy-period** $t_{T7}^0 = t_{T7}^+ = 13,87 \mu\text{s}$;

Com este resultado temos que:

$$Q_{T7} = \left\lceil \frac{t_{T7} + J_{T7}}{T_{T7}} \right\rceil = \left\lceil \frac{13,87 + 1}{208,333} \right\rceil = 1$$

Basta analisar uma única instancia de T_7 dentro do 7-busy period.

- Cálculo de t_i e Q para a tarefa T_6 .

Considerando o tempo de computação da tarefa T_6 como o valor inicial de t_{T6} e o tempo de computação da tarefa T_4 como o valor do bloqueio (B_{T6}), tem-se que:

$$t_{T6}^0 = 13,79 \mu\text{s};$$

Assim:

$$t_{T6}^{0+} = B_{T6} + \left\lceil \frac{t_{T6}^{0+} + J_{T7}}{T_{T7}} \right\rceil C_{T7} = 13,79 + \left\lceil \frac{13,79 + 1}{208,333} \right\rceil 13,87 = 27,66 \mu\text{s}$$

Dado que $t_{T6}^{0+} \neq t_{T6}^0$ as iterações devem continuar com $t_{T6}^1 = t_{T6}^{0+}$. Assim:

$$t_{T6}^{1+} = B_{T6} + \left\lceil \frac{t_{T6}^1 + J_{T7}}{T_{T7}} \right\rceil C_{T7} = 13,79 + \left\lceil \frac{27,66 + 1}{208,333} \right\rceil 13,87 = 27,66 \mu\text{s}$$

Dado que $t_{T6}^{1+} = t_{T6}^1$ o **6-busy-period** é **27,66 μs** .

Com este resultado temos que:

$$Q_{T6} = \left\lceil \frac{t_{T6} + J_{T6}}{T_{T6}} \right\rceil = \left\lceil \frac{27,66 + 1}{31000} \right\rceil = 1$$

Basta analisar uma única instancia de T_6 dentro do 6-busy period.

- Cálculo de t_i e Q para a tarefa T_5 .

Considerando o tempo de computação da tarefa T_5 como o valor inicial de t_{T5} e o tempo de computação da tarefa T_4 como o valor do bloqueio (B_{T5}), tem-se que:

$$t_{T5}^0 = 13,79 \mu\text{s};$$

Assim:

$$\begin{aligned}
t_{T5}^{0+} &= B_{T5} + \left\lfloor \frac{t_{T5}^{0+} + J_{T7}}{T_{T7}} \right\rfloor C_{T7} + \left\lfloor \frac{t_{T5}^{0+} + J_{T6}}{T_{T6}} \right\rfloor C_{T6} \\
&= 13,79 + \left\lfloor \frac{13,79 + 1}{208,333} \right\rfloor 13,87 + \left\lfloor \frac{13,79 + 1}{31000} \right\rfloor 13,79 \\
&= 41,45 \mu\text{s}
\end{aligned}$$

Dado que $t_{T5}^{0+} \neq t_{T5}^0$ as iterações devem continuar com $t_{T5}^1 = t_{T5}^{0+}$. Assim:

$$\begin{aligned}
t_{T5}^{1+} &= B_{T5} + \left\lfloor \frac{t_{T5}^1 + J_{T7}}{T_{T7}} \right\rfloor C_{T7} + \left\lfloor \frac{t_{T5}^1 + J_{T6}}{T_{T6}} \right\rfloor C_{T6} \\
&= 13,79 + \left\lfloor \frac{41,45 + 1}{208,333} \right\rfloor 13,87 + \left\lfloor \frac{41,45 + 1}{31000} \right\rfloor 13,79 \\
&= 41,45 \mu\text{s}
\end{aligned}$$

Dado que $t_{T5}^{1+} = t_{T5}^1$ o 5-busy-period é **41,45 μs** .

Com este resultado temos que:

$$Q_{T5} = \left\lfloor \frac{t_{T5} + J_{T5}}{T_{T5}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{41,45 + 1}{31000} \right\rfloor = 1$$

Basta analisar uma única instancia de T7 dentro do 5-busy period.

- Cálculo de t_i e Q para a tarefa T_4 .

Considerando o tempo de computação da tarefa T_4 como o valor inicial de t_{T4} e que o valor do bloqueio (B_{T4}) é 0, tem-se que:

$$t_{T4}^0 = 13,79 \mu\text{s};$$

Assim:

$$\begin{aligned}
t_{T4}^{0+} &= B_{T4} + \left\lfloor \frac{t_{T4}^0 + J_{T7}}{T_{T7}} \right\rfloor C_{T7} + \left\lfloor \frac{t_{T4}^0 + J_{T6}}{T_{T6}} \right\rfloor C_{T6} + \left\lfloor \frac{t_{T4}^0 + J_{T5}}{T_{T5}} \right\rfloor C_{T5} \\
&= 0 + \left\lfloor \frac{13,79 + 1}{31000} \right\rfloor 13,79 + \left\lfloor \frac{13,79 + 1}{208,333} \right\rfloor 13,87 \\
&\quad + \left\lfloor \frac{13,79 + 1}{31000} \right\rfloor 13,79 = 41,45 \mu\text{s}
\end{aligned}$$

Dado que $t_{T4}^{0+} \neq t_{T4}^0$ as iterações devem continuar com $t_{T4}^1 = t_{T4}^{0+}$. Assim:

$$\begin{aligned}
t_{T4}^{1+} &= B_{T4} + \left\lfloor \frac{t_{T4}^1 + J_{T7}}{T_{T7}} \right\rfloor C_{T7} + \left\lfloor \frac{t_{T4}^1 + J_{T6}}{T_{T6}} \right\rfloor C_{T6} + \left\lfloor \frac{t_{T4}^1 + J_{T5}}{T_{T5}} \right\rfloor C_{T5} \\
&= 0 + \left\lfloor \frac{41,45 + 1}{31000} \right\rfloor 13,79 + \left\lfloor \frac{41,45 + 1}{208,333} \right\rfloor 13,87 \\
&\quad + \left\lfloor \frac{41,45 + 1}{31000} \right\rfloor 13,79 = 41,45 \mu\text{s}
\end{aligned}$$

Dado que $t_{T4}^{1+} = t_{T4}^1$ o 4-busy-period é **41,45 μs** .

Com este resultado temos que:

$$Q_{T4} = \left\lfloor \frac{t_{T4} + J_{T4}}{T_{T4}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{41,45 + 1}{31000} \right\rfloor = 1$$

Basta analisar uma única instancia de T7 dentro do 4-busy period.

Dos resultados anteriores note-se que todos os t_i são bem menores do que o período (T_i) e portanto todos os Q_i são iguais a 1. Isso significa uma simplificação na Equação (1), já que o parâmetro q sempre vai ter valor de 0. Reescrevendo a Equação (1) tem-se:

$$R_m = J_m + w_m + C_m \quad (2)$$

$$w_m = B_m + \sum_{\forall j \in hp(m)} \left\lceil \frac{w_m + J_j + \tau_{bit}}{T_j} \right\rceil C_j$$

O somatório da Equação (2) segue sendo monotonicamente crescente e assim pode ser resolvido de forma iterativa até a convergência do seu valor final. Como uma otimização ao procedimento de estimação do tempo de resposta, o valor inicial do parâmetro w_m é considerado $\sum C_i$ (para todo i pertencendo ao conjunto de tarefas de maior prioridade). Na sequência se apresenta o cálculo do tempo de resposta utilizando a Equação (2).

I. Para a tarefa T_7 (mensagem gerada pelo IED MU SB1).

Assumindo R_{T7} inicialmente como C_{T7} e considerando o tempo de bloqueio como o tempo de computação da tarefa T_6 ($B_{T4} = C_{T4} = 13,79 \mu s$), temos:

$R_{T7}^0 = 13,87 \mu s$; Lembrando que por C_{T7} ser a tarefa de maior prioridade não sofre por interferência só sofre por bloqueio:

$$w_{T7}^0 = 13,87 \mu s;$$

$$R_{T7}^{0+} = 13,87 \mu s + 13,79 \mu s = 27,66 \mu s;$$

O tempo de resposta não convergiu $R_{T7}^{0+} \neq R_{T7}^0$, portanto precisa-se de uma segunda iteração. Agora assumindo:

$$R_{T7}^{0+} = R_{T7}^1 = 27,66 \mu s;$$

$$w_{T7}^1 = 13,87 \mu s;$$

$$R_{T7}^{1+} = 13,87 \mu s + 13,79 \mu s = 27,66 \mu s;$$

*Como $R_{T7}^{1+} = R_{T7}^1$, conclui-se então que o tempo de resposta convergiu e o seu valor é **27,66 μs** , tempo que é menor que o deadline (D_{T6}) de 208,33 μs .*

II. Para a tarefa T_6 (mensagem gerada pelo IED proteção à distância BP2).

Assumindo R_{T6} inicialmente como $C_{T6} + C_{T7}$ e considerando o tempo de bloqueio como o tempo de computação da tarefa T_5 ($B_{T4} = C_{T4} = 13,79 \mu s$), temos:

$R_{T6}^0 = 27,66 \mu\text{s}$; Portanto:

$$w_{T6}^0 = 13,79 + \left\lceil \frac{27,65+1+0,01}{208,333} \right\rceil 12,87 = 27,66 \mu\text{s};$$

$$R_{T6}^{0+} = 13,79 \mu\text{s} + 27,66 \mu\text{s} = 41,45 \mu\text{s};$$

O tempo de resposta não convergiu $R_{T6}^{0+} \neq R_{T6}^0$, portanto precisa-se uma segunda iteração. Agora assumindo:

$$R_{T6}^{0+} = R_{T6}^1 = 41,45 \mu\text{s};$$

$$w_{T6}^1 = 13,79 + \left\lceil \frac{41,45+1+0,01}{208,333} \right\rceil 13,87 = 27,66 \mu\text{s};$$

$$R_{T6}^{1+} = 13,79 \mu\text{s} + 27,66 \mu\text{s} = 41,45 \mu\text{s};$$

Como $R_{T6}^{1+} = R_{T6}^1$, conclui-se então que o tempo de resposta convergiu e o seu valor é **41,45 μs** , tempo que é menor que o deadline (D_{T6}) de 3000 μs .

III. Para a tarefa T_5 (mensagem gerada pelo IED intertravamento BP1).

Assumindo R_{T5} inicialmente como $C_{T5} + C_{T6} + C_{T7}$ e considerando o tempo de bloqueio como o tempo de computação da tarefa T_4 ($B_{T4} = C_{T4} = 13,79 \mu\text{s}$), temos:

$R_{T5}^0 = 41,45 \mu\text{s}$; Portanto:

$$w_{T5}^0 = 13,79 + \left\lceil \frac{41,45+1+0,01}{208,333} \right\rceil 13,87 + \left\lceil \frac{41,45+1+0,01}{31000} \right\rceil 13,79 = 41,45 \mu\text{s};$$

$$R_{T5}^{0+} = 13,79 \mu\text{s} + 41,45 \mu\text{s} = 55,24 \mu\text{s};$$

O tempo de resposta não convergiu $R_{T5}^{0+} \neq R_{T5}^0$, portanto precisa-se uma segunda iteração. Agora assumindo:

$$R_{T5}^{0+} = R_{T5}^1 = 55,24 \mu\text{s};$$

$$w_{T5}^1 = 13,79 + \left\lceil \frac{55,24+1+0,01}{208,333} \right\rceil 13,87 + \left\lceil \frac{55,24+1+0,01}{31000} \right\rceil 13,79 = 41,45 \mu\text{s};$$

$$R_{T5}^{1+} = 13,79 \mu\text{s} + 41,45 \mu\text{s} = 55,24 \mu\text{s};$$

Como $R_{T5}^{1+} = R_{T5}^1$, conclui-se então que o tempo de resposta convergiu e o seu valor é **55,24 μs** , tempo que é menor que o deadline (D_{T5}) de 3000 μs .

IV. Para a tarefa T_4 (mensagem gerada pelo IED comando SB2).

Assumindo R_{T4} inicialmente como $C_{T4} + C_{T5} + C_{T6} + C_{T7}$, temos:

$R_{T4}^0 = 55,24 \mu\text{s}$; Portanto:

$$w_{T4}^0 = \left\lceil \frac{55,24+1+0,01}{208,333} \right\rceil 13,87 + 2 * \left(\left\lceil \frac{55,24+1+0,01}{31000} \right\rceil 13,79 \right) = 41,45 \mu\text{s};$$

$$R_{T4}^{0+} = 13,79 \mu\text{s} + 41,45 \mu\text{s} = 55,24 \mu\text{s};$$

Como $R_{T4}^{0+} = R_{T4}^0$, conclui-se então que o tempo de resposta convergiu e o seu valor é **55,24 μs** , tempo que é menor que o deadline (D_{T4}) de 3000 μs .

Dos cálculos anteriores, conclui-se que o conjunto de tarefas é **escalonável segundo a política DM**.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a análise temporal de uma rede de comunicação que integra os principais dispositivos do SAS. Com respeito a este último tópico, é importante salientar que o tempo de resposta calculado corresponde ao tempo que o *switch* gastaria ao transmitir uma mensagem (incluindo o IFG) na pior situação de operação possível. Não é objetivo deste trabalho estudar a melhor política de escalonamento a ser utilizada no sistema. O pretendido é mostrar a aplicabilidade deste tipo de ferramenta no estudo do desempenho da comunicação em subestações.

Considerando as grandes folgas existentes no sistema (tempos de resposta muito menores que os *deadline*), alguém poderia argumentar que a análise de escalonabilidade apresentada é desnecessária. No entanto, o ferramental matemático agregado com essa análise permite, por exemplo, verificar quantas tarefas (mensagens) um determinado sistema (neste caso a subestação T1-1) pode suportar. Ou seja, com essas técnicas é possível se verificar a **escalabilidade** dos SAS.

Apesar do modelo apresentado na Seção 5.2 ser válido para determinar o tempo de resposta no pior caso, este é pessimista por considerar que as mensagens GOOSE são transmitidas sempre com o menor período possível.

Por outro lado, nesta abordagem se aprecia como os detalhes sobre a estrutura de dados das mensagens GOOSE e SV (Quadro 8 e Quadro 9) pode ser abstraída da modelagem de dispositivos na hora de estudar o comportamento temporal da rede de comunicação do SAS, bastando definir o tamanho da mensagem, a sua frequência e o seu *deadline*. Porém, vale a pena manter o nível de detalhe nos modelos de simulação apresentados no capítulo 4 dado que a plataforma desenvolvida pode ser utilizada em processos de capacitação e treinamento, fornecendo aos usuários uma aproximação maior aos conceitos fundamentais da norma IEC 61850.

6. DESENVOLVIMENTO DE TESTES E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, visando demonstrar a validade dos modelos de simulação apresentados no Capítulo 4, analisam-se resultados de simulações executadas na plataforma desenvolvida a partir do *framework* OMNeT++/INET. Inicialmente, são apresentados resultados que demonstram a correta implementação dos protocolos GOOSE e SMV. Na sequência, estuda-se o desempenho da rede de comunicação descrita para o caso de estudo T1-1. Os resultados são comparados com a análise teórica apresentada no capítulo anterior. Finalmente, buscando uma maior aproximação aos conceitos da norma, apresenta-se o trabalho desenvolvido com dispositivos reais.

6.1 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO

Para que seja possível afirmar que um dispositivo possui conformidade com os conceitos definidos na norma IEC-61850, este deve passar por uma série de testes especificados na sua Parte 10 (Capítulo 3). Neste contexto, os IED submetidos aos testes, são chamados de *DUT* (*Device Under Test*). Os objetivos destes testes podem ser divididos em duas categorias:

- Testes de conformidade para requisitos *estáticos* – comprometidos com a revisão do correto comportamento dos protocolos de comunicação e a utilização correta dos seus cabeçalhos.
- Testes de conformidade para requisitos *dinâmicos* – comprometidos com verificar o cumprimento dos requisitos temporais (em especial o tempo de resposta dos DUT) quando os protocolos de comunicação são utilizados numa situação de operação particular.

Dependendo das capacidades e serviços implementados no DUT, documentados nas tabelas PICS (Quadro 13 e Quadro 14), é possível selecionar o conjunto de testes apropriados para verificar ou estimar o cumprimento dos requisitos dinâmicos e estáticos. Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos das simulações executadas em OMNeT++ para verificar o comportamento de cada um dos modelos desenvolvidos (MU e P&C). As simulações foram feitas utilizando os

testes descritos no Quadro 17 e a rede de comunicação de um único *bay* do caso de estudo T1-1 (Figura 33).

Quadro 17. Testes aplicados para conformidade de requisitos estáticos.

<i>DUT</i>	<i>Caso do Teste</i>	<i>Descrição do Teste</i>
<i>P&C (Gerador)</i>	<i>Goo3</i>	Verificar se as mensagens GOOSE são publicadas periodicamente, se o valor do <i>sqNum</i> é incrementado com cada transmissão e se o valor de <i>stNum</i> não muda.
	<i>Goo4</i>	Verificar se o valor inicial do <i>sqNum</i> e do <i>stNum</i> tem valor inicial um (1).
	<i>Goo5</i>	Forçar uma mudança no <i>Dataset</i> e verificar se as mensagens GOOSE são publicadas de acordo com o configurado (IEC-61850-8-1). Verificar se o valor <i>stNum</i> incrementa.
<i>P&C (Processador)</i>	<i>GsePs1</i>	Transmitir uma mensagem GOOSE com um novo valor no <i>Dataset</i> e verificar se o valor recebido é consistente.
<i>MU (Gerador/Processador)</i>	<i>Sv1</i>	Gerar mensagens SMV e verificar se os valores recebidos e transmitidos são consistentes.

Fonte: (IEC-61850-10, 2005).

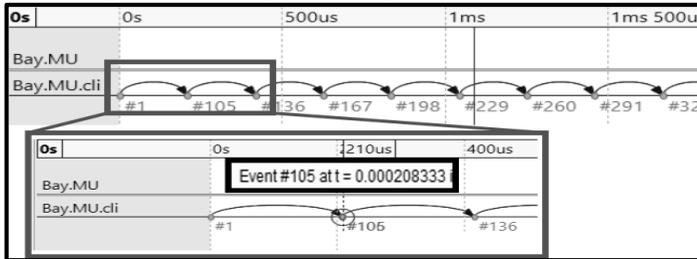
6.1.1 Comportamento estático do dispositivo MU

Dos testes descritos na norma IEC-61850-10, unicamente o teste *Sv1* se aplica ao modelo *MU* desenvolvido neste trabalho. O principal objetivo deste teste é verificar se a taxa de transmissão das mensagens SMV permanece constante e se o formato da mensagem está em conformidade com o especificado na norma IEC-61850-9-2.

Dado que a aplicação simulada é uma aplicação de proteção, o modelo foi configurado para transmitir 4800 frames por segundo e com cada frame contendo um único ASDU (Quadro 7, Quadro 9 e Quadro 10). Na Figura 36, apresenta-se o comportamento temporal do dispositivo *MU* e na Figura 37 é apresentado o formato da mensagem SMV recebida pelo dispositivo *P&C*. É importante salientar que os valores dos sinais de tensão e corrente (carregados no *Dataset* da mensagem) são gerados ponto por ponto e não têm relação com valores normalmente obtidos da

operação de uma subestação. Isto não afeta a validade do modelo pois sob o ponto de vista da comunicação, o aspecto importante é a carga (medida em mensagens por segundo) que o dispositivo *MU* gera na rede (Juarez, 2012).

Figura 36. Comportamento temporal do dispositivo *MU*.



Module	Name	Value
Bay.MU.mac	frames/sec sent	4799.9788800929
Bay.MU.cli	sentPk:count	9601.0

Fonte: Autor.

Figura 37. Formato da mensagem SMV transmitida no OMNeT++.

4000 81 8000 0 60 82 75 100 1 1	A2 82 6E 30 6C 80 18	hectorSampleValueTest3T1-1 82 2 1223	83 4 1 85 1 0 87 40
noASDU		MsvId	smvCnt
2334 0 0 2334 0 0 2334 0 0 2334 0 0 Tensões			
28013 0 0 28013 0 0 28013 0 0 28013 0 0 Correntes			

Fonte: Autor.

Cada ponto no eixo horizontal da Figura 36 (tempo em microssegundos) representa uma mensagem transmitida pelo dispositivo *MU*. Na parte inferior desta figura apresentam-se alguns dados importantes gerados pelo OMNeT++ como resultado da simulação (4799.9 *frames por segundo* e 9601.0 *frames transmitidos*). É importante salientar que o tempo de simulação foi de 2 segundos, o qual é suficiente para verificar o comportamento *estático* do modelo.

Pelos resultados obtidos das simulações, pode-se concluir que o modelo consegue impor uma carga constante na rede e não é afetado por eventos que acontecem nela. Além disso, a taxa de transmissão verificada

na parte inferior da Figura 36 é coerente com os 4800 frames por segundo exigidos na norma para mensagens SMV em aplicações de proteção e controle de subestações. Dessa forma, o modelo aprovou o teste *Sv1*, cumprindo então os requisitos estáticos definidos na norma IEC 61850-9-2LE/2004.

6.1.2 Comportamento estático do Dispositivo P&C

Seguindo os testes definidos no Quadro 17, simulações foram executadas para verificar o comportamento estático dos dispositivos P&C e das suas mensagens GOOSE. O comportamento das mensagens GOOSE em presença de eventos do sistema elétrico é a principal característica a ser avaliada (Figura 19).

O modelo foi configurado para transmitir, em estado de operação segura, uma mensagem a cada 992 milissegundos (teste *Go03*). Este período (TTL) foi escolhido convenientemente para retornar ao seu valor original após 5 mensagens desde a detecção do evento (Figura 27).

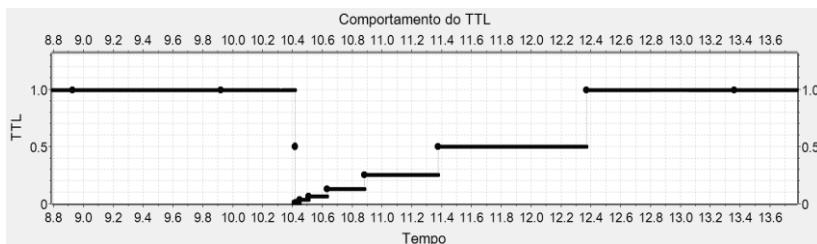
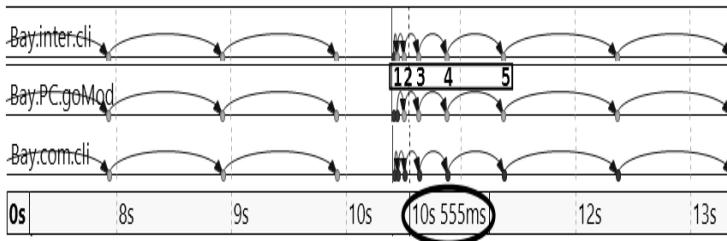
Para executar o teste *Go05*, o modelo do dispositivo P&C foi configurado para mudar de estado de operação (de seguro para emergência) depois de 50000 mensagens SMV recebidas, sem levar em consideração os valores de corrente e tensão armazenadas na mensagem. É importante salientar que isso foi feito unicamente para propósitos do teste (forçar um evento), já que os dispositivos P&C só devem mudar de estado de operação quando receberem valores atípicos das grandezas elétricas fundamentais.

O tempo de simulação para este teste foi de 30 segundos. A Figura 38 ilustra o comportamento estático do dispositivo P&C. Na parte superior, apresenta-se o momento em que os 3 dispositivos P&C da simulação geram as suas mensagens GOOSE e na parte inferior é ilustrado o comportamento do parâmetro TTL (a diferença de tempo entre mensagens GOOSE consecutivas) de um dos dispositivos. Pode-se observar que a diminuição do TTL (aumento da frequência) ocorre quando se observa um evento no SAS (após decorrido aproximadamente 10.5 segundos).

Na Figura 39 observam-se três mensagens GOOSE de um mesmo equipamento. As duas primeiras mensagens foram transmitidas no início da simulação (antes do evento) e a última foi transmitida imediatamente após o evento. Note-se que os valores de *stNum* e *sqNum* estão de acordo com o estabelecido em *Go04* e *Go05*.

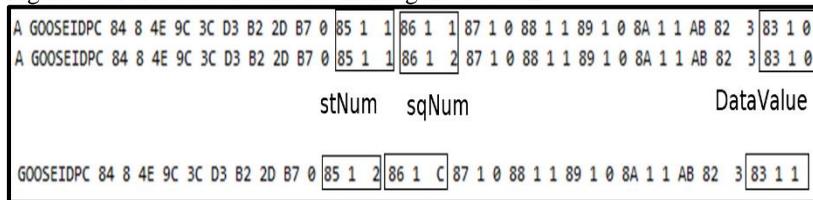
Pelo exposto, pode-se concluir que, levando em conta as características do modelo de simulação, a implementação do protocolo de comunicação GOOSE atende os requisitos estáticos da norma IEC-61850.

Figura 38. Comportamento do dispositivo P&C.



Fonte: Autor.

Figura 39. Parte da estrutura das mensagens GOOSE.

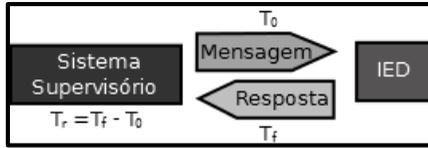


Fonte: Autor.

6.1.4 Comportamento Dinâmico dos IED

Para avaliar o comportamento dinâmico de um dispositivo, a norma define o teste ilustrado na Figura 40. O objetivo deste teste é estimar o tempo de processamento gasto por um dispositivo para reagir depois de receber um estímulo (que pode ser uma mensagem de emergência ou um sinal elétrico de entrada em alguma das suas portas).

Figura 40. Avaliação do comportamento dinâmico definido pela norma IEC 61850.

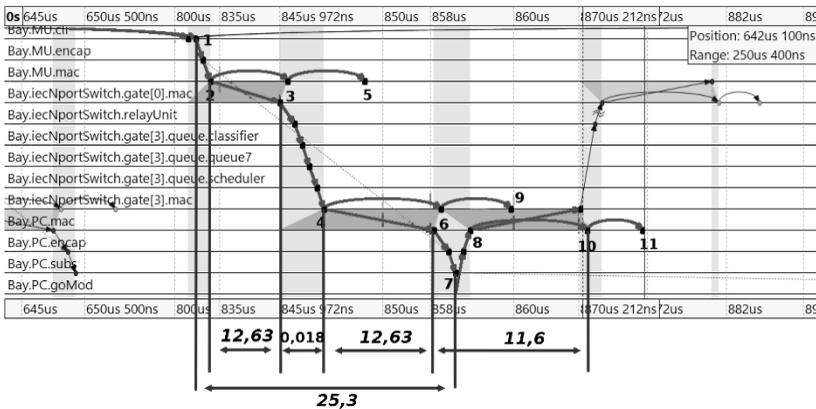


Fonte: (IEC-61850-10, 2005)

O teste foi aplicado ao dispositivo de proteção à distância (**BP2** da Figura 33) com o intuito de obter o tempo que transcorre desde o momento em que uma mensagem SMV (com valores atípicos de tensão e corrente) é recebida, até o momento em que uma mensagem GOOSE é gerada como resposta ao evento.

O resultado do teste (apresentado na Figura 41) corresponde a contribuição do DUT ao tempo total de transferência da mensagem, tal e como definido na Figura 21 (porções T_a e T_c).

Figura 41. Tempo de resposta do IED modelado.



Fonte: Autor

No diagrama de tempo da Figura 41, os pontos de cor preta representam eventos que acontecem nos módulos simples que compõem o modelo do DUT. A ordem de precedência dos eventos está indicada por setas. Os eventos importantes na simulação estão marcados com números e são explicados na sequência.

- **Evento 1:** Mensagem SMV (com valores atípicos de corrente) é gerada pela camada de aplicação do dispositivo MU (módulo simples MU.cli).
- **Evento 2:** O dispositivo MU inicia a transmissão da mensagem SMV na sua camada de enlace (módulo simples MU.mac).
- **Evento 3:** A mensagem é recebida por completo na camada de enlace da porta *switch* (porta 0). O tempo de transmissão, sem incluir IFG foi de **12,63 μ s**.
- **Evento 4:** A mensagem SMV é processada pelo *switch* e redirecionada para a porta de saída do dispositivo P&C (porta 3). Inicia-se a transmissão da mensagem SMV. O **tempo de processamento** do *switch* foi de **18ns**.
- **Evento 5:** Término do tempo IFG da transmissão do dispositivo MU. O tempo de transmissão, incluindo o IFG (desde o *Evento 2* até este evento) foi de **13,3 μ s**. Teoricamente, este seria o menor valor que poderia assumir o período das mensagens SMV.
- **Evento 6:** Término da retransmissão desde o *switch* até o dispositivo P&C. A mensagem SMV é recebida pela camada de enlace do nó destino (módulo simples PC.mac). O **tempo de resposta do switch** (medido desde o *Evento 3* até este evento) foi de **12,64 μ s** sem incluir IFG. Incluindo o IFG (*Evento 9*) o tempo de retransmissão total foi de **13,3 μ s**.
- **Evento 7:** A camada de aplicação do dispositivo P&C (módulo simples PC.subs) processa a mensagem com valores de corrente atípicos. Consequentemente, gera uma mensagem GOOSE para notificar a ocorrência de um evento no sistema.
- **Evento 8:** A camada de enlace do dispositivo P&C inicia transmissão da mensagem GOOSE. Tempo de processamento do dispositivo P&C foi de **18ns**.
- **Evento 10 e Evento 11:** Final da transmissão da mensagem GOOSE e fim do período IFG respectivamente. O **período de resposta do DUT** (desde o evento 6 até o evento 10) foi de **11,6 μ s** sem incluir IFG e de **12,4 μ s** incluindo-o.

Quando avaliado durante todo o tempo de simulação (30s), o tempo médio de transmissão para uma mensagem SMV chegar desde o IED MU até o IED de proteção (tempo médio entre eventos 1 e 7) foi de **25.3 μ s** e o tempo médio de resposta do DUT (tempo entre eventos 6 e 10) foi de **10 μ s**. A norma estabelece que o tempo de resposta do DUT deve ser menor ou igual do que quarenta por cento (40%) do requisito temporal especificado pela norma para a mensagem estudada. Para o caso da mensagem GOOSE, cujo requisito temporal é 3ms, o tempo de resposta obtido por simulação permite afirmar que o comportamento dinâmico dos dispositivos está em conformidade com os parâmetros da norma. Assumindo que todos os IED modelados têm aproximadamente o mesmo tempo de resposta, conclui-se que os modelos de simulação atendem os requisitos dinâmicos da norma IEC-61850.

Comparando o valor do tempo de transmissão obtido na simulação com o calculado analiticamente (isso é, o tempo que gasta uma mensagem em ir desde um nó até o *switch* e vice-versa, C_m do Quadro 16), conclui-se que estes valores são próximos. Para o caso das mensagens SMV, os valores foram **13,87 μ s** e **13,2 μ s** (valores teórico e simulado, respectivamente). A pequena diferença entre eles (aproximadamente 4,8%) pode ser atribuída aos pessimismo do modelo teórico que, por exemplo, considera sempre o máximo *jitter* possível na operação dos dispositivos. Essa coincidência entre os valores teóricos e simulados é outro forte indicio do atendimento dos requisitos dinâmicos por parte dos modelos de simulação desenvolvidos.

6.1.3 Comportamento do *Switch*

O estudo do comportamento estático do *switch* (o qual está fora do escopo da norma IEC-61850) foi dividido nas partes listadas a seguir:

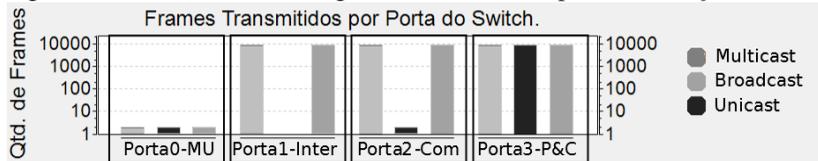
- Estudo do roteamento de mensagens com diferentes tipos de endereço de destino (*Unicast*, *Multicast* e *Broadcast*).
- Estudo do tratamento de mensagens destinadas a VLAN diferentes.
- Estudo do tratamento de mensagens com diferentes níveis de prioridade (802.1q).

Apesar das mensagens GOOSE/SMV precisarem destas funcionalidades simultaneamente, separar a análise do modelo do *switch* nestas três categorias facilita o seu entendimento.

Na simulação, os dispositivos MU, intertravamento, comando e de proteção à distância, foram conectados nas portas 0, 1, 2 e 3 do *switch*

respectivamente. É importante destacar que esta configuração foi utilizada em todas as simulações executadas neste trabalho.

Figura 42. Tratamento de mensagens com diferentes tipos de endereços.



Fonte: Autor

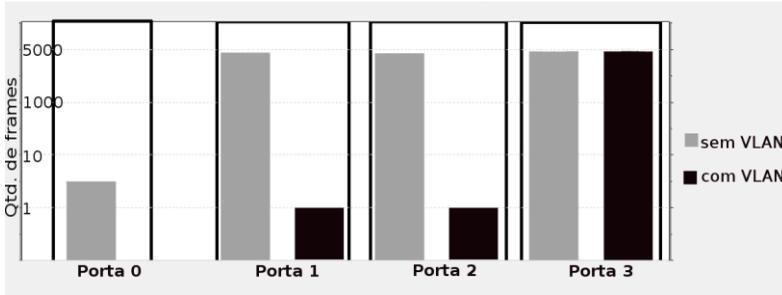
Em redes que utilizam comutação de pacotes, há uma **retransmissão** cada vez que o *switch* repassa uma mensagem para uma porta diferente da sua porta de origem. A Figura 42 ilustra a quantidade de mensagens retransmitidas pelo *switch* em cada uma das suas portas no contexto do primeiro teste (mensagens com diferentes tipos de endereço de destino). Note-se na Figura 42 que a porta 0 é a porta com menor quantidade de retransmissões. Isto ocorre por ela ser a porta onde maior quantidade de mensagens são recebidas (dispositivo MU conectado na porta 0 transmitindo 4800 Frames/s), demonstrando que o algoritmo de comutação de mensagens funciona de acordo com o previsto.

O *switch* tem o mesmo comportamento tanto para mensagens do tipo *Broadcast* quanto para mensagens do tipo *Multicast* (barras de cor cinza). Isto é coerente com as considerações feitas na **Seção 4.3.3**, onde se estabelece que, quando não é utilizado o recurso de marcação de VLAN, as mensagens *Multicast* e *Broadcast* são tratadas de forma igual (Kurose, 2013). Por outro lado, é evidente que no último caso (endereço *Unicast*), o dispositivo MU foi configurado para comunicar-se unicamente com o dispositivo de proteção à distância (conectado na porta 3). Portanto, as mensagens SMV foram retransmitidas unicamente na porta do nó destino (barra de cor preta). Do exposto, pode-se concluir que o modelo do *switch* tem um comportamento satisfatório no tratamento de mensagens com diferentes tipos de endereço. Para este teste o tempo de simulação foi de 2 segundos.

Na sequência, foi executada a simulação correspondente ao segundo teste (utilização do recurso de limitação de domínio de *broadcast* através de marcação por VLAN). Para este teste, o dispositivo *MU* e o dispositivo de proteção à distância foram agrupados na *VLAN 1* (SB1, e BP2 da Figura 33). Adicionalmente, todos os dispositivos do tipo *P&C* foram agrupados na *VLAN 2* (SB2, BP1 e BP2 da Figura 33). Na Figura 43 apresenta-se a quantidade de mensagens retransmitidas por cada porta

do *switch* utilizando o recurso VLAN. É importante salientar que as mensagens foram criadas com endereço de destino *Multicast*, sem marcação de prioridade e o tempo de simulação foi mantido em 2 segundos.

Figura 43. Tratamento de mensagens com marcação de VLAN.



Fonte: Autor

Note-se que o comportamento das mensagens sem o recurso de VLAN (barras de cor cinza) é igual do que o apresentado na Figura 42, onde as mensagens *Multicast* geradas na porta 0 (MU) são retransmitidas nas outras portas, fazendo com que todos os dispositivos da rede tivessem que processar essas mensagens. Por outro lado, no caso das mensagens com marcação de VLAN (barras de cor preta), as mensagens *Multicast* geradas pelo dispositivo MU, unicamente foram recebidas pelo dispositivo de proteção, conectado na porta 3, enquanto o tráfego gerado pelos dispositivos P&C foi recebido unicamente por dispositivos conectados nas portas 1, 2 e 3 (intertravamento, comando e proteção à distância, respectivamente).

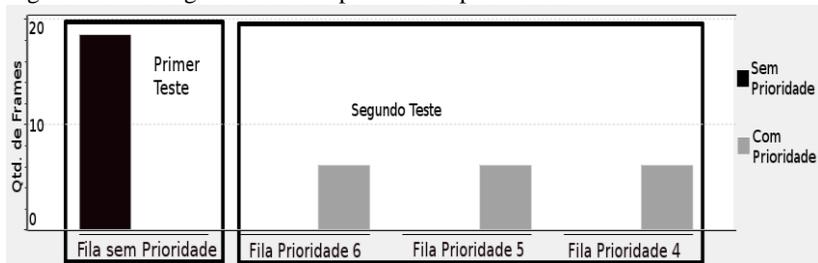
Sob o ponto de vista da aplicação e do desempenho da rede, a utilização de VLAN é vantajosa quando existe na rede um dispositivo com alta taxa de transmissão (como é caso do dispositivo MU), dado que os outros nós da rede unicamente devem processar as informações que são relevantes para a sua operação. Demonstra-se então que o modelo do *switch* suporta o recurso de marcação VLAN.

Finalmente, a Figura 44 ilustra os resultados das simulações referentes ao último teste, tratamento de mensagens com marcação de prioridade. Para este teste, foram realizadas duas etapas: inicialmente todos os dispositivos da rede transmitiram mensagens sem marcação de prioridade e posteriormente cada um deles utilizou um valor de prioridade fixo e diferente (MU-7, Proteção-6, Intertravamento-5 e Comando-4). Todas as mensagens utilizaram endereçamento do tipo *Multicast* mas não

utilizaram recurso de *VLAN*. Nessas condições, escolheu-se analisar unicamente o *buffer* de saída da porta 0 por duas razões: a primeira é que a porta 0 retransmite muito menos mensagens do que as outras portas (não retransmite mensagens de MU, 4800 frames/s). A outra razão é que na segunda etapa do teste, esta porta recebe mensagens com prioridade 6, 5 e 4 possibilitando observar claramente o modelo do *switch* sob condições adequadas para o estudo do seu comportamento estático.

É importante salientar que, tanto as prioridades atribuídas neste teste quanto o agrupamento em *VLAN* feito no teste anterior, foram mantidos ao longo do trabalho quando as simulações utilizaram o recurso de comunicação IEEE 802.1q.

Figura 44. Mensagens recebidas por filas de prioridade.



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 44, a quantidade de mensagens processadas por cada um dos *buffers* de saída da porta 0 do switch.

Dado que todos os nós P&C têm a mesma frequência de transmissão, as filas de prioridade 6, 5 e 4 recebem a mesma quantidade de mensagens quando o teste entrou na sua segunda etapa. Com este resultado demonstra-se que o modelo do switch suporta mensagens com marcação 802.1q. Adicionalmente pode-se afirmar que os modelos do classificador e do escalonador do *switch* funcionam de acordo com o esperado.

Até agora, unicamente foi apresentado o *comportamento estático* do *switch*. Para efetuar o estudo do *comportamento dinâmico* do switch, é necessário analisar alguns parâmetros intrínsecos do modelo que são fonte de latência das mensagens da rede. Estes parâmetros são descritos na sequência:

- **Canal de transmissão (L_{wt}):** Os sinais elétricos viajam nos cabos de par trançado (utilizado como meio de transmissão nas redes de comunicação) com uma velocidade de aproximadamente dois terços a velocidade da luz no vácuo. No caso das subestações,

onde os IED estão separados algumas centenas de metros, a latência causada pelo canal de transmissão é menor do que um microssegundo ($0.5\mu\text{s}$) (Moore, 2010).

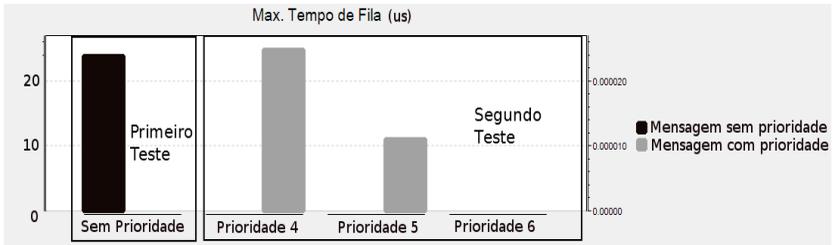
- **Funcionamento *Store and Forward* (L_{sf}):** O fato do *switch* ter que aguardar pela recepção completa das mensagens antes de iniciar qualquer processamento introduz um fator de latência no sistema em geral. Este fator pode ser definido como o tempo necessário para o *switch* transmitir uma mensagem até a sua interface de rede. Pode ser calculado pela relação entre o tamanho do frame e a taxa de transmissão de bits da rede (Moore, 2010). Para o sistema simulado (taxa de bits de 100 Mbps e um tamanho máximo da mensagem 150 Bytes) a latência máxima por *Store and Forward* é:

$$L_{sf} = \frac{\text{Tamanho de Frame}}{\text{Taxa de bits}} = \frac{159 \cdot 8}{10^8} = 12.72 (\mu\text{s}) \quad (3)$$

O L_{sf} tem o mesmo valor do que o tempo de computação (C_m) sem incluir o IFG.

- **Tempo de Fila (L_q):** Como explicado na **Seção 4.5.1**, atrasos na transmissão de mensagens também podem-se dar tanto por interferência quanto por bloqueio. O fator de latência L_q (chamado de tempo de fila ou tempo de *buffer*) é incluído no comportamento dinâmico do modelo do *switch* para representar estes dois fenômenos. Na Figura 45 se ilustra o tempo máximo que uma mensagem aguardou nas filas de prioridade ***antes de ser transmitida***. O cenário de simulação foi o mesmo utilizado para avaliar o comportamento estático do *switch* perante mensagens com marcação de prioridade 802.1q (mensagens *Multicast*, sem marcação de *VLAN* e análise feita na porta 0 do *switch*, Figura 44). É importante salientar que os valores da Figura 45 representam os valores nos piores casos do cenário simulado, ou seja, quando os *buffers* de saída 6, 5 e 4 da porta 0 tinham mensagens prontas para serem transmitidas no mesmo instante. Note-se que a fila de prioridade 6 (a de maior prioridade no caso) foi atendida imediatamente; já as filas de prioridade 5 e 4 demoraram um pouco mais para serem atendidas (**10.88 μs** e **24.6 μs** respectivamente). A estimação do fator L_q pode ser feita utilizando a Equação (2) considerando que o tempo da computação da tarefa que está sendo analisada não entra no cálculo.

Figura 45. Máximo tempo de fila na porta zero do switch.



Module	Name	Value	
Bay.iecnportSwitch.gate[0].queue.data	queueingTime:histogram:max	2.3679999E-5	Primeiro Teste
Bay.iecnportSwitch.gate[0].queue.queue4	queueingTime:histogram:max	2.4639999E-5	Segundo Teste
Bay.iecnportSwitch.gate[0].queue.queue5	queueingTime:histogram:max	1.088E-5	
Bay.iecnportSwitch.gate[0].queue.queue6	queueingTime:histogram:max	0.0	

Fonte: Autor

Na parte inferior da Figura 45 apresentam-se os valores dos tempos de *buffer* obtidos na simulação.

Note-se que o máximo tempo de *buffer* no cenário sem marcação de prioridade (barra de cor preta) foi muito parecido com o tempo que a mensagem com menor prioridade teve que aguardar no caso com marcação IEEE 802.1q (barra de cor cinza). Porém, no caso de mensagens sem prioridade, não existe uma indicação que permita conhecer se a mensagem com pior tempo de espera foi uma mensagem de maior interesse para o sistema do que aquela que foi processada primeiro.

Por outro lado, é importante salientar que o fator L_q do *buffer* que trata mensagens com prioridade 4 é coerente com o tempo de resposta calculado na análise teórica para a tarefa T_4 . Lembrando que, no pior caso do cenário simulado, a mensagem do dispositivo MU não é contemplada (C_{MU} de $13,87\mu s$) e que o tempo de *buffer* é calculado até antes de iniciar a transmissão da mensagem (não contempla o tempo de execução da própria tarefa, $12,79\mu s$), o valor obtido da análise teórica seria então de $27,58\mu s$ ($55,24\mu s - 13,87\mu s - 13,79\mu s$). Este resultado é muito próximo do resultado da simulação.

Nesta análise do comportamento dinâmico do *switch*, o tempo de processamento gasto pela unidade de comutação não foi considerado como fonte de latência, já que este tempo é desprezível quando comparado com as outras fontes de atraso na comunicação.

Com os resultados apresentados nesta seção, fica demonstrado que tanto o comportamento estático quanto o comportamento dinâmico do

modelo do *switch* suportam as aplicações de redes e comunicação em SAS segundo as características de comunicação especificada pela norma IEC-61850.

6.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Os requisitos de desempenho, apresentados no Quadro 4 e no Quadro 5, devem ser respeitados a fim de garantir tanto a interoperabilidade de dispositivos quanto o correto funcionamento das aplicações do SAS. Ao longo deste trabalho, tem-se apresentado os recursos de comunicação oferecidos pela norma IEC-61850 para viabilizar tais requisitos (principalmente: endereço de destino *Multicast*, *IEEE 802.1q* e marcação *VLAN*).

Nesta seção, os efeitos dos recursos de comunicação supracitados sobre os requisitos temporais da norma, são avaliados através de resultados de simulações executadas com os modelos desenvolvidos neste trabalho no contexto dos casos de estudo T1-1 e D2-1.

É importante salientar que a norma define o “*tempo de transmissão fim a fim*” (*EtE*) como o principal índice de desempenho de uma rede de comunicação para SAS, portanto o seu cálculo é o ponto inicial do estudo descrito a seguir.

6.2.1 Desempenho da Rede no Caso de estudo T1-1

A Figura 46 ilustra a arquitetura de rede utilizada para estudar o desempenho da comunicação no caso de estudo T1-1.

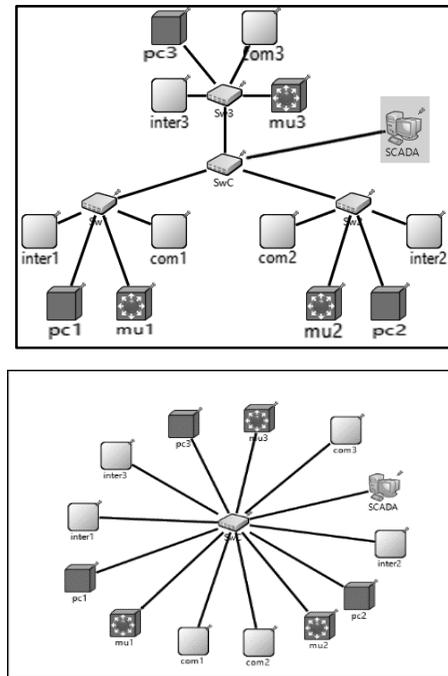
Com o objetivo de verificar quais recursos de comunicação são determinantes para o cumprimento dos requisitos temporais especificados pela norma IEC-61850, foram executadas simulações variando os seguintes parâmetros de comunicação:

- Tipo de endereço destino (*Unicast* e *Multicast*).
- Valores de prioridade das mensagem (*IEEE 802.1q*).
- Utilização do recurso de *VLAN*.

Algumas configurações mantidas constantes foram:

- Taxa de transmissão de MU (4800 frames por segundo)
- Tamanho da mensagem SMV (150 bytes).
- Período de transmissão de P&C (980 milissegundos)
- Tamanho médio da mensagem GOOSE (140 bytes).
- Largura de banda dos canais de transmissão (100Mbps).

Figura 46. Arquitetura da rede de comunicação para o caso de estudo T1-1.



Fonte: Autor.

Conforme observa-se na parte superior da Figura 46, a arquitetura de rede T1-1 utiliza um *switch* por cada *bay* e um *switch* central para interligar esses *bays* com o barramento de estação. Neste caso de estudo, a comunicação se dá principalmente entre dispositivos do mesmo *bay* (comunicação *intra-bay*), assim as mensagens precisam de, no máximo, um único *switch* antes de alcançar o seu destino final. Além da arquitetura descrita anteriormente, Sidhu (2006) propôs uma variação do estudo de caso utilizando uma arquitetura de rede reduzida, onde o *switch* central é o único *switch* do sistema e é utilizado para comunicar todos os dispositivos do SAS. Esta arquitetura, chamada de arquitetura econômica, é apresentada na parte inferior da Figura 46. Os mesmos testes executados na arquitetura original, foram aplicados nesta arquitetura econômica.

É importante salientar que, quando necessários, tanto os endereços *Multicast* quanto os identificadores de VLAN, foram configurados como únicos em cada *bay* do SAS. Assim, apesar de ter a possibilidade de reutilizar os endereços *Multicast* em *bays* diferentes, isto não foi

aproveitado com o intuito de ter maior controle das configurações do sistema.

No Quadro 18 se apresentam os valores obtidos do índice de desempenho *EtE* quando os IED de um *bay* do cenário T1-1 (Figura 33) foram configurados para transmitir mensagens com **endereço de destino do tipo Unicast, sem marcação de VLAN e variando a presença de marcação de prioridade**. É importante salientar que, devido a não utilização do recurso de marcação de *VLAN*, as tabelas de endereço dos *switches* inicialmente não tinham registros (tabela vazia), pelo qual o sistema passa por uma etapa de estabilização (*warm up time*). Durante esta etapa, os *switches* tratam todas as mensagens *Unicast* da mesma forma que tratariam mensagens do tipo *broadcast*. Ao final deste período, as tabelas ARP (*Address Resolver Protocol*) possuem um registro que relaciona a porta do *switch* e o endereço físico do dispositivo conectado nela. Pelo exposto, neste primeiro teste, as simulações consideraram válidos unicamente os valores de *EtE* das mensagens recebidas posterior ao *warm up time* (100 μ s). No quadro, as abreviaturas *pc*, *inter* e *com* fazem referência aos dispositivos de *proteção à distância*, *intertravamento* e *comando* (*BP2*, *BP1* e *SB2*) respectivamente. O tempo de simulação foi de 100 segundos.

Quadro 18. Tempo de transmissão fim a fim do primeiro teste.

<i>Mensagem Recebida pelo IED (Fonte-Destino-Prioridade)</i>	Tempo de Transmissão Fim a Fim (<i>EtE</i>)			
	Com Marcação de prioridade (μ s)		Sem prioridade (μ s)	
	Média	Max	Média	Max
<i>MU-pc-7</i>	25,4	25,4	25,4	25,4
<i>Com-inter-4</i> <i>pc-inter-6</i>	25,2	36,48	25,2	36,48
<i>inter-Com-5</i>	24,9	24,9	24,9	24,9

Fonte: Autor.

Conforme pode ser visto no Quadro 18, quando é utilizado endereço destino *Unicast* no caso de estudo T1-1, a inclusão do recurso de marcação de prioridade (IEEE 802.1q) não afeta o valor do índice de desempenho *EtE*, ou seja, o máximo *EtE* é igual com e sem marcação de prioridade IEEE802.1q.

Apesar da norma definir unicamente o índice *EtE* para estudar o desempenho das redes do SAS, no presente trabalho também é considerado o tempo de fila (L_q) como um índice importante para analisar o desempenho da rede, em especial o desempenho do *switch*. No Quadro 19, apresentam-se os valores do L_q obtidos da simulação. Note-se que unicamente o dispositivo de intertravamento (*BPI* da Figura 33) apresenta um valor de L_q diferente de 0, isto ocorre por ser o único dispositivo que recebe mensagens de duas fontes diferentes (comando e proteção à distância). Neste contexto, as mensagens das duas fontes, eventualmente, têm que compartilhar o meio de transmissão, gerando latências por interferência ou por bloqueio.

Quadro 19. Tempo de Fila do primeiro teste (mensagens *Unicast*).

Porta do switch (ID Conectado)	Tempo de Fila							
	Com Marcação de prioridade (µs)				Sem prioridade (µs)			
	Prioridade da Mensagem Recebida (Lq Médio/ Lq Máximo)						Média	Max
	7	6	5	4				
3 (<i>pc</i>)	0	0					0	0
2 (<i>com</i>)			0	0			0	0
1 (<i>inter</i>)		0	0		2,8	11,52	1,4	11,52
0 (<i>MU</i>)								

Fonte: Autor

Observa-se pelo Quadro 19 que o tempo de fila (tanto máximo como médio) das mensagens com prioridade 6 (geradas pelo IED de proteção à distância – *pc*) é zero, indicando que estas mensagens foram atendidas imediatamente, enquanto as mensagens de prioridade 4 (geradas pelo IED de comando – *com*) sofreram por interferência. No caso de utilizar mensagens sem o recurso de marcação de prioridade, o tempo de fila médio foi menor do que o tempo de fila das mensagens de prioridade 4. No entanto, quando não existe marcação de prioridade não é possível determinar se a mensagem que foi processada primeiro pelo *switch* é a de maior interesse para a aplicação do SAS. Por fim, note-se que não existem dados, nem do tempo *EtE* nem do tempo de fila, para o dispositivo *MU* pois este não recebe mensagens de nenhuma das fontes.

Para um segundo teste, os IED foram configurados para transmitirem mensagens **com endereço de destino do tipo Multicast variando a presença da marcação de prioridade e utilizando o recurso de marcação de VLAN**. Neste segundo cenário não existe *warm up time* devido ao fato que as tabelas ARP são configuradas antes da simulação iniciar. O agrupamento dos IED em redes virtuais foi igual ao

utilizado na seção 5.1.3 com os IED *MU* e de *proteção à distância* na *VLAN1* e *todos os dispositivos do tipo P&C* na *VLAN2*. Adicionalmente, quando utilizado o recurso de marcação de prioridade, os dispositivos assumiram os mesmos valores de prioridades do teste com endereço *Unicast* (7 – *MU*, 6 – *proteção*, 5 – *intertravamento* e 4 – *comando*).

O tempo *EtE* e o tempo de fila, obtidos como resultado da simulação, são descritos no Quadro 20 e no Quadro 21, respectivamente. O tempo de simulação foi mantido em 100 segundos.

Por conta da segmentação da rede em redes virtuais e da utilização de mensagens com endereço de destino *Multicast*, cada dispositivo do tipo P&C processa mensagens GOOSE de duas fontes diferentes com exceção do dispositivo de proteção à distância (*pc*), que por pertencer a duas *VLAN*, além das mensagens GOOSE, também tem que processar mensagens SMV do dispositivo *MU*.

Note-se que os valores médios *EtE* do segundo teste são próximos dos valores médios do primeiro teste (Quadro 18), evidenciando que na maioria das transmissões do segundo teste não ocorreram quaisquer interferências ou bloqueios.

Do Quadro 20 percebe-se que, quando **não** foi utilizado o recurso de marcação de prioridade, em determinados momentos a porta 3 do *switch* processou mensagens GOOSE (transmitidas na *VALN2*) antes do que mensagens SMV (transmitidas na *VALN1*). Assim, configura-se uma “inversão de prioridade” no processamento das mensagens, dado que, segundo a política de escalonamento DM, as mensagens SMV são mais importantes para o SAS do que as mensagens GOOSE. É importante salientar que isto não acontece quando o recurso de marcação de prioridade é utilizado.

Na Figura 47, ilustra-se o momento em que ocorre a inversão de prioridades na porta 3 do *switch*, isto é, quando não é utilizado o recurso de QoS disponibilizado pelo cabeçalho IEEE 802.1q. Os eventos mais relevantes estão marcados com números e serão explicados na sequência. É importante salientar que na Figura 47, não é apresentado o momento em que a mensagem SMV é transmitida desde o dispositivo *MU* até o *switch*, mas assume-se que isso aconteceu aproximadamente 12 μ s (tempo de transmissão das mensagens) antes do que os eventos da figura.

Com a Figura 47, fica demonstrado que quando não é utilizado o recurso de marcação de prioridades, mensagens consideradas críticas para o sistema (como o caso das mensagens SMV) podem ser relegadas por outras mensagens menos importantes. Por conta desta inversão de prioridades, acontece o máximo *EtE* das mensagens SMV (51,12 μ s) e o maior tempo de fila de toda a simulação (24,72 μ s).

Quadro 20. Tempo de transmissão fim a fim do segundo teste.

<i>Porta do switch (IED conectado/VLAN)</i>	<i>Tempo de Transmissão Fim a Fim (EtE)</i>			
	<i>Com Marcação de prioridade (μs)</i>		<i>Sem prioridade (μs)</i>	
	<i>Média</i>	<i>Max</i>	<i>Média</i>	<i>Max</i>
<i>0 (MU/VLAN1)</i>	NA	NA	NA	NA
<i>1 (Inter/VLAN2)</i>	24,21	36,47	29,9	36,47
<i>2 (Com/VLAN2)</i>	24,67	36,95	24,67	36,95
<i>3 (PC/VLAN1)</i>	25,44	37,67	25,44	51,12
<i>3 (PC/VLAN2)</i>	26,94	51,12	26,77	43,9

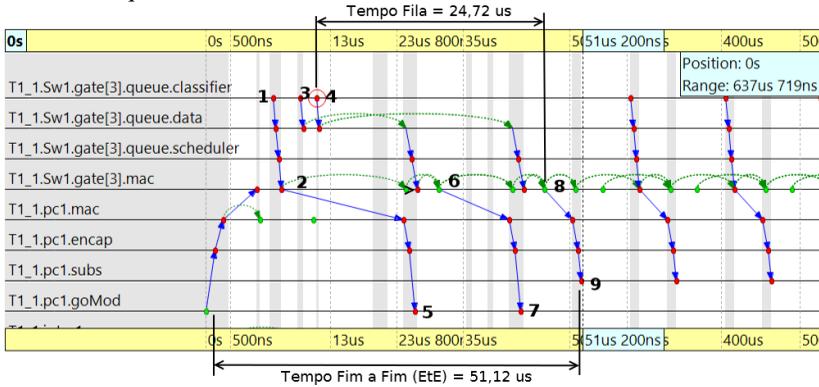
Fonte: Autor.

Quadro 21. Tempo de fila do segundo teste.

<i>Porta do switch (IED conectado/VLAN)</i>	<i>Tempo de Fila</i>									
	<i>Com Marcação de prioridade (μs)</i>						<i>Sem prioridade (μs)</i>			
	<i>Prioridade da Mensagem Recebida (Lq Médio/ Lq Máximo)</i>						<i>Média</i>	<i>Max</i>		
	<i>7</i>		<i>6</i>		<i>5</i>				<i>4</i>	
<i>0 (MU/VLAN1)</i>										
<i>1 (Inter/VLAN2)</i>			0	0			0,83	11,52	0,42	11,52
<i>2 (Com/VLAN2)</i>			0	0	0,8	11,04			0,4	11,04
<i>3 (PC/VLAN1) (PC/VLAN2)</i>	2×10^{-4}	11,28			1,4	24,72	0,58	25,2	8×10^{-4}	24,72

Fonte: Autor.

Figura 47. Inversão de prioridade e máximo EtE das mensagens SMV sem IEEE 802.1q.



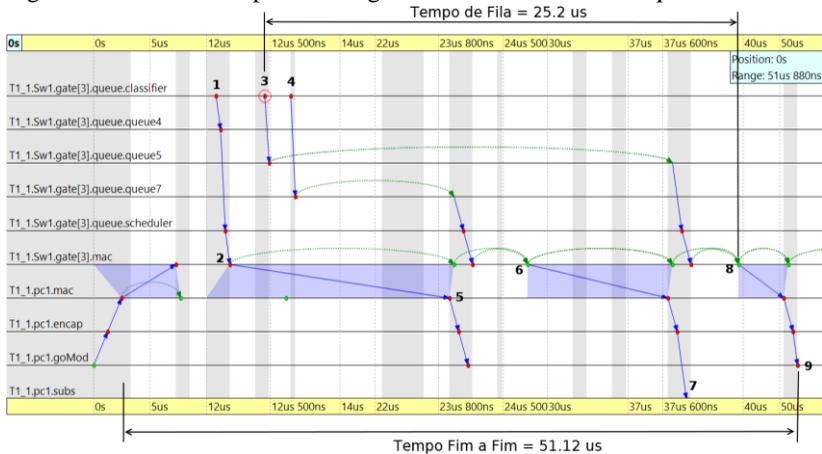
Fonte: Autor.

- **Evento 1:** Chegada da mensagem GOOSE gerada pelo dispositivo de intertravamento (*inter*) ao buffer de saída da porta 3 do *switch*.
- **Evento 2:** Início da retransmissão da mensagem do IED *pc* na porta 3 do *switch*.
- **Evento 3:** Chegada da mensagem GOOSE gerada pelo dispositivo de comando (*com*). Dado que a mensagem do IED *inter* já está ocupando o canal, a mensagem do IED *com*, fica aguardando na fila de saída.
- **Evento 4:** Chegada da mensagem SMV gerada pelo dispositivo MU. Dado que a mensagem do IED *inter* já está ocupando o canal, a mensagem do IED *MU*, fica aguardando na fila de saída.
- **Evento 5:** Término da retransmissão da mensagem do IED *inter*. O tempo fim a fim (*EtE*) desta mensagem foi aproximadamente 23.8 μ s.
- **Evento 6:** Início da retransmissão da mensagem do IED *com*. Por conta de não utilizar marcação de prioridade a mensagem do IED *MU* fica aguardando na fila de saída.
- **Evento 7:** Término da retransmissão da mensagem do IED *com*.
- **Evento 8:** Início da retransmissão da mensagem do IED *MU* e término do tempo de fila (24,72 μ s).
- **Evento 9:** Término da retransmissão da mensagem do IED *MU*. O tempo fim a fim (*EtE*) desta mensagem foi aproximadamente 51.12 μ s.

Mostra-se então que uma das vantagens na utilização do recurso de comunicação IEEE 802.1q é a eliminação da inversão de prioridade. Note-se da Figura 47 que essa anomalia existe por causa da estratégia FIFO utilizada para tratar mensagens sem marcação de prioridade.

Na Figura 48, apresenta-se a sequência de eventos que geram o máximo *EtE* para mensagens SMV no cenário com marcação de prioridade (**37,67 μ s**). Comparando com a Figura 47, é possível se observar que neste não existe inversão de prioridade mas existe atraso por bloqueio na entrega da mensagem. O anterior se evidencia também no tempo de fila máximo (**11,28 μ s**) que é bem próximo ao tempo de transmissão de uma mensagem.

Figura 48. Máximo *EtE* para mensagens SMV com IEEE 802.1q.



Fonte: Autor

- **Evento 1:** Chegada da mensagem GOOSE de prioridade 4 gerada pelo dispositivo de comando (*com*) ao buffer de saída da porta 3 do *switch*.
- **Evento 2:** Início da retransmissão da mensagem do IED *com* na porta 3 do *switch*.
- **Evento 3:** Chegada da mensagem GOOSE de prioridade 5 gerada pelo dispositivo de intertravamento (*inter*). Dado que a mensagem do IED *com* já está ocupando o canal, a mensagem do IED *inter* fica aguardando na fila de saída sofrendo atraso por bloqueio.
- **Evento 4:** Chegada da mensagem SMV de prioridade 7 gerada pelo dispositivo MU. Dado que a mensagem do IED *inter* já está

ocupando o canal, a mensagem do IED *MU* fica aguardando na fila de saída sofrendo atraso por bloqueio.

- **Evento 5:** Término da retransmissão da mensagem do IED *com*. O tempo fim a fim (*EtE*) desta mensagem foi aproximadamente 23.8 μ s.
- **Evento 6:** Início da retransmissão da mensagem SMV do IED *MU*. Por ser menos prioritária, a mensagem do IED *inter* fica aguardando na fila de saída embora tenha chegado antes da mensagem SMV. Isto evidencia a não inversão de prioridade no sistema quando a marcação de prioridade é utilizada. A mensagem do IED *inter* sofre então atraso por interferência.
- **Evento 7:** Término da retransmissão da mensagem do IED *MU*.
- **Evento 8:** Início da retransmissão da mensagem do IED *inter* e término do seu tempo de fila (25,72 μ s).
- **Evento 9:** Término da retransmissão da mensagem do IED *inter*. O tempo fim a fim (*EtE*) desta mensagem foi aproximadamente 51.12 μ s.

Na sequência se apresenta uma comparação entre os resultados obtidos através do procedimento analítico do **Capítulo 4** e os resultados obtidos através das simulações.

A partir dos resultados apresentados no Quadro 19 e no Quadro 21, foi possível verificar que, em cada uma das portas do *switch* no máximo podem haver *N-1* mensagens prontas para serem retransmitidas, sendo *N* o número de nós na rede (ou na VLAN). Tomando como exemplo a porta 3 do *switch* no cenário T1-1, pode-se observar que não há dados correspondentes a mensagens com prioridade 6, justamente a prioridade do equipamento de proteção a distância conectado nela. Esta forma de operação afeta diretamente o processamento das mensagens como explicado a seguir:

- Na porta 3 do *switch*, as mensagens de prioridade 7 sofrem unicamente por bloqueio das mensagens com prioridade 5 ou 4 (uma única vez). Isto é coerente com o exposto na análise teórica.
- Na mesma porta 3, as mensagens de prioridade 5 sofrem por bloqueio das mensagens com prioridade 4 e por interferência das mensagens com prioridade 7.
- As mensagens com prioridade 4 sofrem por interferência tanto das mensagens com prioridade 5 quanto das mensagens com prioridade 7.

- Finalmente, quando é utilizado o recurso de marcação de VLAN na porta 1 ou na porta 2 do *switch*, as mensagens com prioridade 6 passam a ser as de maior prioridade, portanto sofrem unicamente por bloqueio das mensagens com prioridade 4 ou com prioridade 5.

O exposto até agora permite afirmar-se que o modelo analítico do **Capítulo 4** é pessimista, podendo ser refinado para obter tempos de resposta do pior caso mais próximos da realidade do estudo de caso T1-1. É importante lembrar que o tempo de resposta do pior caso calculado analiticamente faz referência ao tempo que transcorre desde a chegada de uma mensagem ao *switch*, até o momento em que esta mesma mensagem é completamente transmitida até o seu destino. Tomando como referência a Figura 48, o tempo de resposta no pior caso calculado analiticamente, seria o tempo que transcorre desde o *Evento 3* até o *Evento 9*, o que é equivalente ao valor do tempo de fila adicionado do tempo de transmissão da mensagem desde o *switch* até o destino ou também seria equivalente ao tempo *EtE* subtraído do tempo de transmissão da mensagem desde a fonte até o *switch*.

No Quadro 22, apresentam-se os valores do tempo de resposta calculados analiticamente considerando a operação real do *switch* no contexto do segundo teste do caso de estudo T1-1 (mensagens *Multicast* utilizando marcação VLAN).

Quadro 22. Valores do tempo de resposta no pior caso e análise corrigida.

Tarefa (Fonte da Mensagem)	Tempo de Resposta Original (μs)	Tempo de Resposta Corrigido (μs)
<i>T₄</i> (Comando-SB2)	55,24	41,45
<i>T₅</i> (Intertravamento-BP1)	55,24	41,45
<i>T₆</i> (Proteção à distância-BP2)	41,45	27,66
<i>T₇</i> (MU-SB1)	27,66	27,66

Fonte: Autor.

No Quadro 23, apresenta-se a comparação entre os valores do tempo de resposta obtidos na análise teórica corrigida com os obtidos da simulação. Pode-se observar a proximidade entre os dois valores, indicando o correto funcionamento da plataforma de simulação.

Quadro 23. Comparação entre valores do tempo de resposta no pior caso teórico e simulado no contexto do segundo teste.

Tarefa (Mensagem)	Máximo Tempo de Resposta		
	Método analítico (µs)	Simulação (µs)	Diferença (%)
<i>T₄ (Comando-SB2)</i>	41,45	38,4	7,35
<i>T₅ (Intertravamento- BP1)</i>	41,45	37,92	8,5
<i>T₆ (Proteção à distância-BP2)</i>	27,66	25,91	6,32
<i>T₇ (MU-SB1)</i>	27,66	25,38	8,24

Fonte: Autor.

6.2.2 Desempenho da Rede Económica no Caso de estudo T1-1

A seguir, apresentam-se os resultados das simulações executados no caso de estudo T1-1 quando é utilizado unicamente um *switch* central para estabelecer comunicação entre os nós da rede (parte inferior da Figura 46). Os cenários simulados foram idênticos aos utilizados na arquitetura que utiliza 4 *switches* (um *switch* por bay mais o um *switch* central). Inicialmente foi simulado o cenário utilizando mensagens *Unicast*, variando a presença do recurso de marcação de prioridade e sem utilizar o recurso de VLAN. Na sequência foi simulado o cenário utilizando mensagens *Multicast*, variando a presença do recurso de marcação de prioridade e utilizando o recurso de VLAN.

No Quadro 24, apresentam-se os resultados referentes ao índice de desempenho *EtE* no cenário do primeiro teste com a arquitetura de rede económica. No Quadro 25, apresentam-se os valores do mesmo índice de desempenho, mas no contexto do segundo teste. Note-se que não há diferença entre estes valores e os valores obtidos com a arquitetura completa (Quadro 18 e Quadro 20). Isto acontece porque, com a utilização dos recursos de comunicação do padrão IEEE 802.1q (VLAN e priorização de mensagens) em conjunto com a arquitetura do modelo de simulação do *switch* (8 filas de saída para cada dispositivo conectado), a separação lógica do SAS é mantida idêntica tanto na rede económica quanto na rede completa; ou seja o tráfego é mantido intra-bay sem gerar maior carga em cada um dos *buffers* de saída. Assim, conclui-se que é possível utilizar uma menor quantidade de equipamentos para construir a infraestrutura de comunicação do SAS.

Quadro 24. Tempo de transmissão fim a fim do primeiro teste.

<i>Mensagem Recebida pelo IED (Fonte-Destino-Prioridade)</i>	<i>Tempo de Transmissão Fim a Fim (EtE)</i>			
	<i>Com Marcação de prioridade (µs)</i>		<i>Sem prioridade (µs)</i>	
	<i>Média</i>	<i>Max</i>	<i>Média</i>	<i>Max</i>
<i>MU-pc-7</i>	25,4	25,4	25,4	25,4
<i>Com-inter-4 pc-inter-6</i>	25,2	36,48	25,2	36,48
<i>inter-Com-5</i>	24,9	24,9	24,9	24,9

Fonte: Autor.

Quadro 25. Tempo de transmissão fim a fim do segundo teste.

<i>Porta do switch (IED conectado/VLAN)</i>	<i>Tempo de Transmissão Fim a Fim (EtE)</i>			
	<i>Com Marcação de prioridade (µs)</i>		<i>Sem prioridade (µs)</i>	
	<i>Média</i>	<i>Max</i>	<i>Média</i>	<i>Max</i>
<i>0,4 e 8 (MU/VLAN1/ VLAN11, VLAN21)</i>	NA	NA	NA	NA
<i>1, 5 e 9 (Inter/VLAN2/VLAN12/VLAN22)</i>	24,21	36,47	29,9	36,47
<i>2, 6 e 11 (Com/VLAN2/VLAN12/VLAN22)</i>	24,67	36,95	24,67	36,95
<i>3, 7 e 12 (PC/VLAN1/VLAN11/VLAN21)</i>	25,44	37,67	25,44	51,12
<i>3, 7 e 12 (PC/VLAN2/VLAN12/VLAN22)</i>	26,94	51,12	26,77	43,9

Fonte: Autor.

6.2.3 Escalabilidade da Rede T1-1

Considerando que o padrão IEEE 802.1q disponibiliza um número muito limitado de prioridades, formar redes de comunicação com um número de nodos superior a esse número, gera uma situação em que as mensagens possam sofrer interferências de outra com mesma prioridade. Nos casos de estudo simulados até o momento, este tipo de interferência têm sido evitado pois os dispositivos de cada VLAN da rede T1-1 possuem prioridades diferentes. Conseqüentemente, os buffers de saída

do *switch* nunca têm mais do que uma mensagem, de uma determinada prioridade, pronta para ser transmitida.

Para o estudo da escalabilidade da rede de comunicação T1-1, considerar a adição de, por exemplo, um dispositivo do tipo MU, faria com que o *buffer* que trata as mensagens de prioridade 7 no *switch* possa reter até duas mensagens aguardando por transmissão. O cálculo do tempo de resposta da mensagem gerada pelo dispositivo adicionado deve levar em conta tanto a interferência de uma mensagem de prioridade 7 gerada pelo outro dispositivo MU existente na rede, quanto o bloqueio de uma mensagem de menor prioridade. Pode-se afirmar então que, o tempo de resposta de uma mensagem aumenta proporcionalmente com a quantidade de dispositivos que geram mensagens de sua mesma prioridade. No pior caso, todas as N fontes de mensagens de igual prioridade transmitiriam as suas mensagens no mesmo momento, o *switch* acomodaria as mensagens nos buffers de saída de acordo com uma política FIFO e a última mensagem a chegar ao *switch* precisa aguardar pelo processamento de $N-1$ mensagens antes de ser transmitida. Esta sequência de eventos pode-se repetir a cada T_m unidades de tempo (208,333 μ s no caso das mensagens SMV).

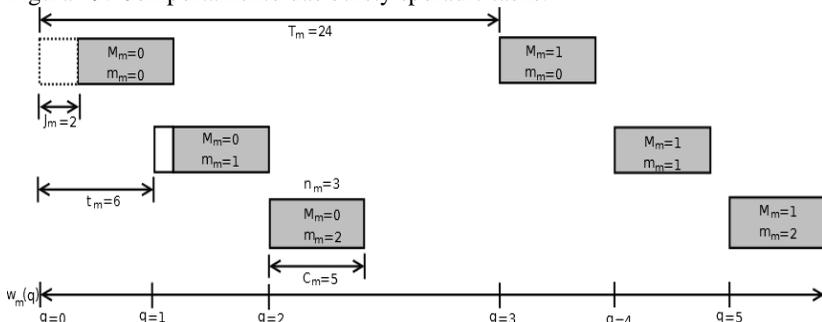
O comportamento descrito, é característico de tarefas esporadicamente periódicas (*Bursty Sporadic Tasks*), as quais são ativadas com dois períodos:

- O **período interno** (*inner period*), onde a tarefa é liberada um número finito de vezes com um tempo de chegada muito curto entre as instâncias da tarefa.
- O **período externo** (*outer period*), onde não há liberações da tarefa mas, ao seu término, a tarefa novamente se comporta como no período interno.

A Figura 49 ilustra o comportamento para uma tarefa que libera 3 instâncias com um período interno de 6 unidades de tempo e possuindo um período externo de 24 unidades de tempo. Para calcular o tempo de resposta considerando este tipo de comportamento, a Equação (2) deve ser estendida utilizando o conceito de *i Busy Period* (tempo ocupado de nível i)¹¹ (Tindell, 1994). Essa extensão é apresentada na Equação (4). No **Anexo C** detalha-se a relação existente entre a Equação (2) e a Equação (4).

¹¹ O tempo ocupado de nível i é a janela de tempo onde tarefas com prioridade igual ou superior à tarefa i são executadas sem interrupção.

Figura 49. Comportamento das bursty sporadic tasks.



Fonte: (Tindell,1993)

$$R_m = \max_{q=0,1,2,\dots} (w_m(q) + J_m - m_m t_m - M_m T_m) \quad (4)$$

$$w_m(q) = (M_m n_m + m_m + 1) C_m + B_m + \sum_{j \in hp} \left(\min \left(n_j, \left\lfloor \frac{J_j + w_m(q) - F_j T_j}{t_j} \right\rfloor \right) + F_j n_j \right) C_j$$

Onde:

 q = quantidade de liberações da tarefa m dentro do busy period. t_m = período interno. T_m = período externo. n_m = quantidade de liberações da tarefa m dentro do período interno. $M_m = \left\lfloor \frac{q}{n_m} \right\rfloor$ = quantidade de períodos externos no busy period. $m_m = q - M_m n_m$ = quantidade de períodos internos no busy period. $F_j = \left\lfloor \frac{J_j + w_m(q)}{T_j} \right\rfloor$ = interferência causada por tarefas de prioridade superior do que m . $w_m(q)$ = Busy Period, considera $M_m T_m + m_m t_m$ instâncias da tarefa antes da instância de interesse m .

Note-se da Equação (4) que o termo w_m aparece nos dois lados da expressão, portanto o seu procedimento de solução é igual ao processo iterativo apresentado no Capítulo 4. É importante salientar que o processo de iteração sobre a variável q termina quando $w_m(q) \leq M_m T_m + m_m t_m - J_m$.

Na sequência se apresentam os resultados obtidos quando há **7 dispositivos MU, 5 dispositivos de intertravamento e 5 dispositivos de comando** na rede de um dos bay da subestação T1-1. Aplicando a Equação (4), e mantendo as características temporais das mensagens GOOSE e SMV (Quadro 16), pode-se determinar o comportamento temporal da rede de comunicação T1-1 aumentada. É importante salientar

que o estudo contempla mensagens com endereço de destino *Multicast* e com os recursos de comunicação IEEE802.1q configurados igual ao apresentado na Seção 5.1 (VLAN e prioridades).

Das simulações do estudo de caso original, pode-se observar que o comportamento temporal mais crítico é o da porta 3 do *switch* (mensagens transmitidas para o dispositivo de proteção a distância). Portanto, nas simulações efetuadas com a rede aumentada, foi analisado com maior atenção o comportamento dessa porta do *switch* e, em particular, o índice *EtE* das mensagens com prioridade 4, por serem as que mais sofreram interferência no caso de estudo original.

Quadro 26. Parâmetros da Equação (4) para análise de mensagens de prioridade 4 no caso T1-1 aumentado.

Parâmetro		IED		
		Comando	Intertravamento	MU
<i>Período interno - μs</i>	t	0	0	0
<i>Período externo - μs</i>	T	30000	30000	208,333
<i>Número de instâncias por período interno, número de IED</i>	n	5	5	7
<i>Jitter - μs</i>	J	1	1	1
<i>Tempo de computação - μs</i>	C	13.79	13.79	13.87
<i>Bloqueio - μs</i>	B	0	13.79	13.79
<i>Instâncias da tarefa analisada dentro do busy period</i>	q	0,1,2,3,4		
<i>Número de períodos externos dentro do busy period para cada valor de q</i>	M(q)	0,0,0,0,0		
<i>Número de períodos internos dentro do busy period para cada valor de q</i>	m(q)	0,1,2,3,4		

Fonte: Autor.

No Quadro 26 apresentam-se os valores para cada um dos parâmetros da Equação (4) quando é analisado o atraso máximo que sofreria uma mensagem de prioridade 4 recebida pelo *switch* no caso da subestação T1-1 aumentada. Como visto anteriormente, por conta da definição de retransmissão dos *switches*, as mensagens do IED de

proteção à distância não são consideradas no Quadro 26 por não afetar o cálculo do tempo de resposta da mensagem de interesse. É importante salientar que o pior tempo de resposta é o atraso máximo sofrido por qualquer uma das instâncias (q) analisadas dentro do *busy period*. A condição de parada é avaliada a cada iteração sobre a variável q .

No Quadro 27 apresenta-se a comparação dos valores do índice EtE obtidos tanto pelo método analítico quanto por simulações. Note-se que a diferença relativa apresentado é baixo, indicando coerência entre ambos os métodos. Os valores do procedimento analítico foram obtidos utilizando uma ferramenta de software desenvolvida em *Matlab*. No entanto, no Anexo C é apresentado o procedimento utilizado para obter o tempo de resposta de uma das tarefas do caso de estudo.

Quadro 27. Máximo tempo de resposta para o caso T1-1 aumentado.

Porta do switch (Tipo de Mensagens/VLAN)	Tempo de Transmissão Fim a Fim (EtE) Com Marcação de prioridade (μs)		Diferença (%)
	Teórico	Simulado	
3 (SMV/VLAN1)	122,93	120,15	2,3
3 (GOOSE/VLAN2)	346,87	334,56	3,7

Fonte: Autor.

Utilizando a Equação (4), é possível determinar a quantidade máxima de dispositivos de cada tipo que pode ser adicionada a um *bay* da subestação T1-1 original, sempre que os requisitos temporais de todos os dispositivos forem definidos. Na sequência, apresenta-se a análise para os dispositivos tipo MU (o caso mais crítico por ter menor *deadline*).

Dado que as mensagens SMV possuem a maior prioridade do sistema, o somatório da Equação (4) tem valor de zero, assim:

$$R_m = \max_{q=0,1,2,\dots} (w_m(q) + J_m - m_m t_m - M_m T_m)$$

$$w_m(q) = (M_m n_m + m_m + 1) C_m + B_m$$

Para ter o máximo tempo de resposta (R_m), o fator $M_m T_m$ deve ser o mínimo possível (lembre-se que t_m é igual 0, Quadro 26). Assim:

$$M_m = \left\lfloor \frac{q}{n} \right\rfloor = 0 \quad \forall q/q \in Z = [0, n);$$

Portanto, o maior valor de q no “i-busy period” é $n-1$. Tem-se então $R_{\max}(n-1) - J_m = w_m(n-1)$. Dessa forma, substituindo na equação para a janela $w_m(q)$:

$$R_{\max}(n-1) - J_m = (M_m n_m + m_m + 1)C_m + B_m$$

Substituindo $m_m = q - M_m n_m$:

$$R_{\max}(n-1) - J_m = (M_m n_m + q - M_m n_m + 1)C_m + B_m$$

Isolando q :

$$\frac{R_{\max}(n-1) - J_m - B_m}{C_m} = (q + 1)$$

Substituindo $q = n-1$:

$$\frac{R_{\max}(n-1) - J_m - B_m}{C_m} = n$$

Considerando R_{\max} como o deadline e os valores de B_m e C_m como no Quadro 16:

$$\left\lceil \frac{208.333 - 1 - 13,79}{13,87} \right\rceil = [13,95] = \mathbf{13 \text{ dispositivos.}}$$

É importante salientar que este limite é válido unicamente quando todas as considerações aqui apresentadas são aplicadas. A Figura 50 ilustra o valor do índice EtE para um dos *bays* da subestação T1-1 quando foram utilizados 14 dispositivos MU, 1 dispositivo de intertravamento, 1 dispositivo de comando e 1 dispositivo de proteção à distância. Os recursos de comunicação IEEE 802.1q foram utilizados da mesma forma que tem sido utilizados ao longo do texto (VLAN1 para SMV, VLAN2 para GOOSE, prioridades atribuídas segundo DM). Note-se que o *EtE* máximo para as mensagens SMV foi de 215,5 μ s, o qual não cumpre com o *deadline* definido para esse tipo de mensagens (208,333 μ s).

Figura 50. Máximo EtE de um Bay T1-1 com 14 MU.

Module	Name	Count	Mean	StdDev	Max
T1_1_ECO2.pcl.goMod	endToEndDelay:vector	76	1.1246683417105262E-4	5.9824260254391E-5	2.28959985E-4
T1_1_ECO2.pcl.subs	endToEndDelay:vector	672000	1.1436106101922678E-4	5.514595209828535E-5	2.15519986E-4

Fonte: Autor.

6.3 EXPERIMENTOS COM PROTÓTIPO DE SAS

Uma das atividades desenvolvidas neste trabalho de mestrado foi a especificação, aquisição e montagem de um laboratório portátil para o estudo de sistemas de automação de subestações (SAS) de energia elétrica. Um dos requisitos fundamentais deste laboratório é o da conformidade de seus equipamentos com o padrão IEC 61850.

Nesta seção, são apresentados resultados dos experimentos efetuados com esses equipamentos. Apresenta-se também uma ferramenta de software desenvolvida para interagir com os equipamentos através da geração de mensagens GOOSE e SMV. O desenvolvimento dessa ferramenta foi baseada nos mesmos conceitos utilizados na modelagem de simulação apresentada no Capítulo 4.

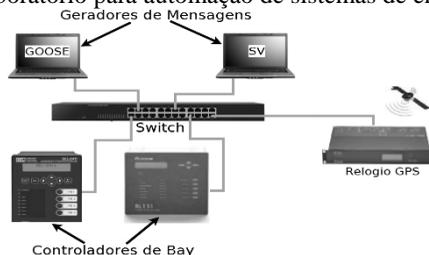
6.3.1 Arquitetura do Laboratório

Na Figura 51, apresenta-se a arquitetura do laboratório para o estudo de sistemas de automação do setor elétrico projetado como parte deste trabalho. Foram adquiridos:

- Dois controladores de *bays* com suporte da norma IEC 61850 (IED) e fornecidos por fabricantes diferentes.
- Um *switch* com oito portas Ethernet e capacidade para o tratamento de mensagens de acordo com o padrão IEEE 802.1q.
- Um relógio GPS com suporte de diversos padrões para sincronismo de equipamentos (IRIG-B, PTP, PPS, SNMP, etc).
- Um computador tipo notebook.

É importante salientar que os dois IED adquiridos unicamente tem capacidade para processar e gerar mensagens GOOSE (dispositivos do tipo P&C).

Figura 51. Laboratório para automação de sistemas de energia elétrica.



Fonte: Autor.

No Quadro 28, apresentam-se as funções desempenhadas por cada um dos dispositivos do laboratório.

Quadro 28. Características dos equipamentos do laboratório.

<i>Equipamento</i>	<i>Qde.</i>	<i>Descrição</i>
Relógio GPS RT430	1	Instrumento encarregado da sincronização dos equipamentos do Sistema de Automação.
Switch Ethernet T1000	1	Equipamento para comutação de mensagens que trafegam na rede de comunicação.
Dispositivo Eletrônico Inteligente RL131	1	Elementos utilizados pelo geral para executar tarefas de proteção, controle e/ou monitoração nos diferentes ambientes do Sistema de Energia. Unicamente suportam mensagens GOOSE e configuração SCL.
Dispositivo Eletrônico Inteligente SEL751A	1	
Computador tipo Notebook	1	Equipamento com capacidade de configurar e interatuar com os equipamentos do laboratório para monitorar o desempenho da rede de comunicação
Mini Rack 19” 12U	1	Rack para armazenar os equipamentos do laboratório.

Fonte: Autor.

6.3.2 Ferramenta para Geração de Mensagens GOOSE e SMV

Devido à quantidade reduzida de equipamentos no laboratório, foi preciso criar ferramentas de software que permitissem produzir o volume de tráfego necessário para avaliar o comportamento dos IED em diversas situações de operação.

Utilizando o gerador de pacotes de rede *Ostinato* (software livre), foram desenvolvidos dois *script* que permitem transmitir mensagens GOOSE e SMV através das interfaces de rede dos computadores do laboratório. Os scripts desenvolvidos possibilitam a configuração de todos os campos das suas respectivas mensagens de acordo com a necessidade do usuário (Quadro 7 e Quadro 8).

O software *Ostinato* é baseado numa arquitetura cliente-servidor, onde os clientes, através de uma conexão TCP/IP, podem controlar as portas de comunicação dos servidores. Dessa forma, é possível ligar vários computadores ao *switch* do laboratório e através de um computador central (cliente) coordenar a transmissão de mensagens GOOSE ou SMV.

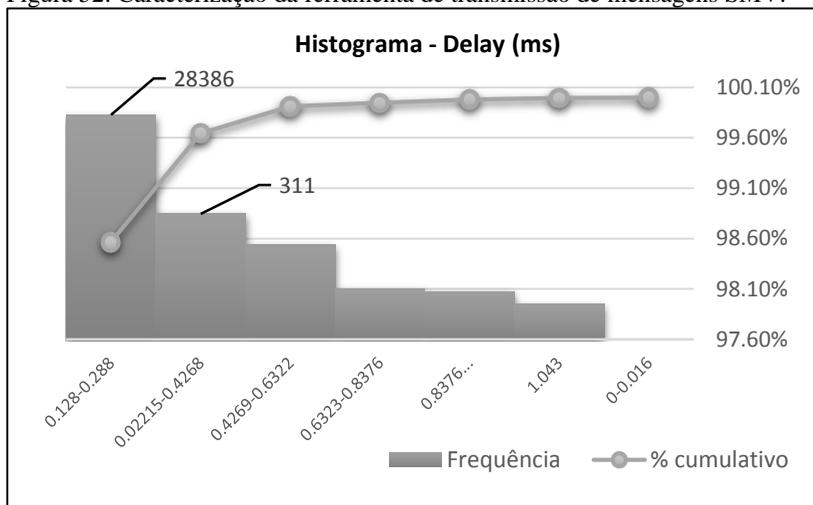
Para verificar o correto funcionamento dos geradores de mensagens, foram executados os mesmos testes apresentados no Quadro 17. O primeiro teste consistiu em avaliar a taxa de transmissão das mensagens geradas.

Com ajuda do analisador de tráfego de rede *wireshark* (software livre), executado em um computador central identificado como SCADA, foi analisado tanto o conteúdo de cada mensagem quanto o tempo em que essas mensagens foram recebidas na interface de rede. Na Figura 52 apresenta-se o histograma que relaciona o tempo entre transmissões (*delay*) com a quantidade de mensagens produzidas pelo gerador de mensagens SMV. Na Figura 53 apresenta-se o resultado do mesmo teste mas desta vez com o gerador de mensagens GOOSE. É importante salientar que os histogramas foram organizados por ordem de frequência, demonstrando que o comportamento da transmissão das mensagens não é exata e tem um comportamento estocástico. Esses histogramas representam a caracterização da placa de rede do computador que executou o software do gerador. Note-se que, das 28800 mensagens SMV transmitidas, mais do 98% tiveram um *delay* entre 128 μ s e 288 μ s, com o qual a média da taxa de transmissão estaria de acordo com o especificado pela norma (4800 mensagens/s). No caso das mensagens GOOSE, foram transmitidas 100 mensagens e 97% delas tiveram o valor do seu *delay* em 1 segundo; portanto a média da taxa de transmissão está em conformidade com a taxa configurada na ferramenta (1 mensagem/s).

Na Figura 54 e na Figura 55, apresentam-se as estruturas das mensagens GOOSE e SMV capturadas no *Wireshark*, respectivamente. Note-se que os campos *sqNum* e *stNum* da mensagem GOOSE estão em conformidade com o especificado pelos testes *Goo3*, *Goo4* e *Goo5* (iniciam com valor 1 e o *stNum* aumenta depois de uma mudança na informação do *dataset*). No lado direito da Figura 55, observa-se a reconstrução das amostras transmitidas nas mensagens SMV utilizando o programa *SV Scout* da empresa OMICRON.

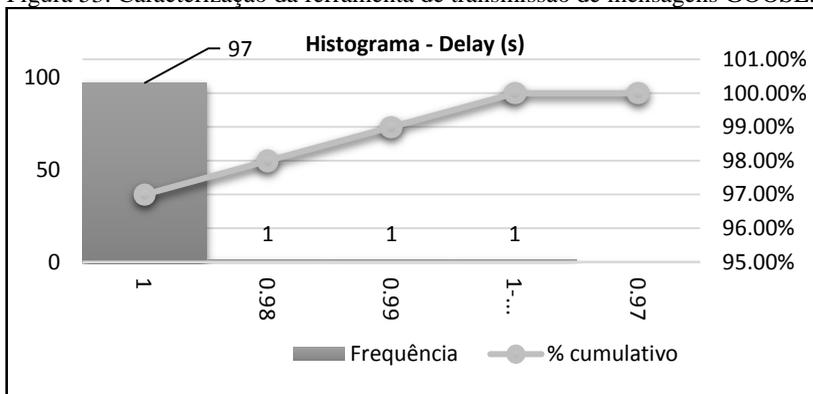
Conclui-se, então, que o tráfego produzido pelas ferramentas de geração de mensagens, está em conformidade com as especificações da norma e portanto pode ser utilizada para emular o comportamento de um IED (seja MU ou P&C) dentro da rede de comunicação de um SAS determinado.

Figura 52. Caracterização da ferramenta de transmissão de mensagens SMV.

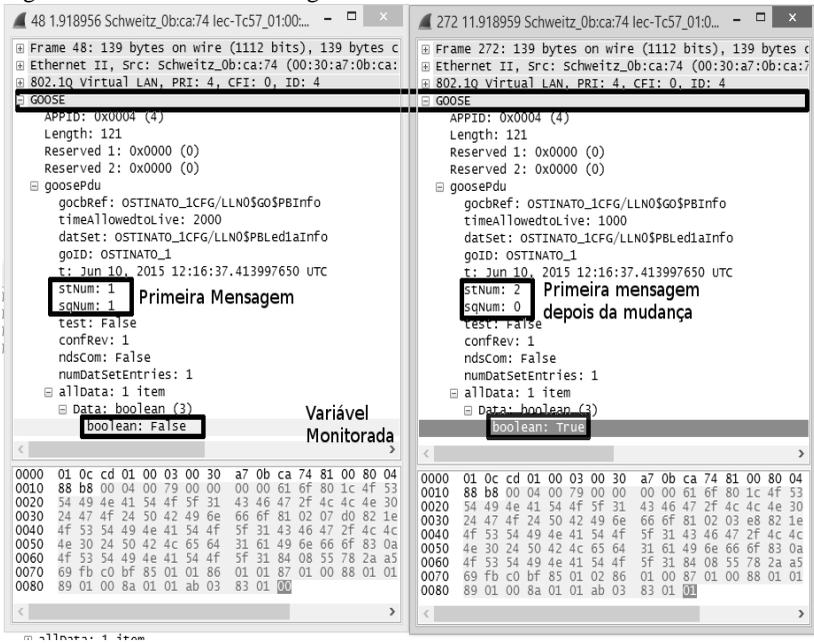


Fonte: Autor.

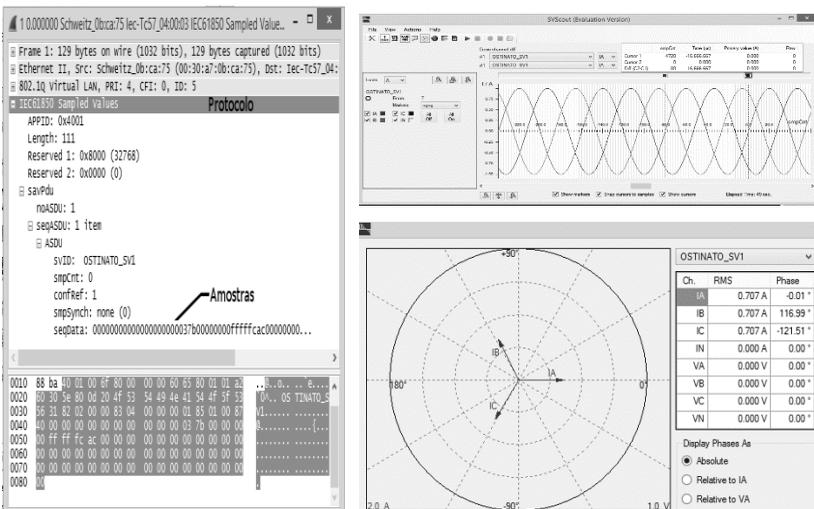
Figura 53. Caracterização da ferramenta de transmissão de mensagens GOOSE.



Fonte: Autor.

Figura 54. Estrutura da mensagem GOOSE no *Wireshark*.

Fonte: Autor.

Figura 55. Estrutura da mensagem SMV no *Wireshark* e reconstituídos no *SvScout*.

Fonte: Autor.

6.3.3 Caracterização dos IED

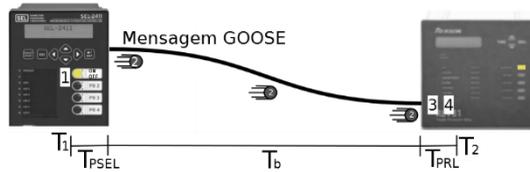
Foram desenvolvidos alguns testes para verificar a interoperabilidade entre os IED do laboratório e entre esses IED e a ferramenta geradora de mensagens. Esses testes também serviram para estimar o tempo de processamento gasto pelos IED durante o processo de comunicação de mensagens GOOSE (porção T_a e T_c da definição de tempo EtE , Figura 21). Igualmente, os testes serviram para avaliar o quão realistas foram os resultados obtidos nas simulações.

O primeiro teste consistiu em estabelecer comunicação direta entre os relés SEL751-A e RL131, sem utilizar o *switch*. O teste foi executado da seguinte forma:

1. Através de um botão do painel frontal do equipamento SEL 751-A, a cada 20 segundos aproximadamente, o estado de um dos seus LED foi alterado (LED1). Cada mudança de estado do LED1 foi registrada em um arquivo interno conhecido como SOE (*Sequence Of Event Register*).
2. O relé SEL751-A foi configurado para produzir mensagens GOOSE contendo o estado do LED1.
3. A mensagem GOOSE produzida pelo SEL751-A foi recebida pelo RL131, o qual foi configurado para perceber mudanças do estado da variável de interesse (LED1). Adicionalmente, este dispositivo foi configurado para gerar uma indicação visual dos eventos, refletindo o estado da variável monitorada em um dos seus LED (LED2).
4. Os eventos foram registrados no respectivo arquivo SOE do relé RL131.

Os arquivos de registros SOE contêm tanto o horário em que os eventos são detectados quanto o valor da variável monitorada (LED1). Na Figura 56 é apresentada a arquitetura utilizada neste teste e os seus eventos estão indicados por números. Os tempos T_1 e T_2 , fazem referência aos tempos em que os eventos são registrados nos arquivos SOE de cada dispositivo, enquanto o tempo T_b é o tempo de transmissão da mensagem GOOSE. Utilizando esses dados e as características de desempenho documentadas pelos fabricantes nos *datasheet*, é possível estimar o tempo gasto pelos dispositivos na geração e no processamento das mensagens (T_{pSel} e T_{pRL}) conforme explicado na sequência.

Figura 56. Eventos do primeiro teste com equipamentos reais.



Fonte: Autor.

Dado que tanto a largura de banda da comunicação como o tamanho da mensagem são conhecidos, da Equação 3 (incluindo o IFG) é possível considerar T_b igual a $13.87 \mu\text{s}$. Da Figura 56:

$$T_1 + T_{pSEL} + T_b + T_{pRL} = T_2$$

Isolando as variáveis desconhecidas:

$$T_{pSEL} + T_{pRL} = T_2 - T_1 - T_b \quad (5)$$

Segundo a Parte 10 da norma IEC 61850 (2004), o tempo de processamento pode ser expresso como:

$$T_{pSEL} = T_{IORefresh} + T_a \quad (6)$$

Onde $T_{IORefresh}$, é o tempo que gasta o dispositivo para ler as suas interfaces de entrada/saída, enquanto T_a é o tempo que gasta o dispositivo para criar, processar e iniciar a transmissão da mensagem GOOSE. Devido ao fabricante do dispositivo RL131 não disponibilizar dados sobre o $T_{IORefresh}$, foi considerado que o T_{pSEL} é igual ao T_{pRL} . Assim das Equações 5 e 6:

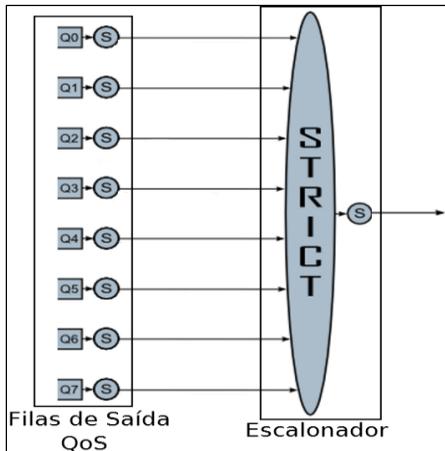
$$T_a = T_c = \frac{T_2 - T_1 - T_b}{2} - T_{IORefresh}$$

No teste foram efetuadas 200 mudanças de estado do LED1 (cem mudanças de 1 para 0 e cem mudanças de 0 para 1). A média das diferenças entre os tempos registrados nos arquivos SOE ($T_2 - T_1$) foi de **30.9 ms**, enquanto o tempo $T_{IORefresh}$ documentado no *datasheet* é de 10 ms. É importante salientar que o tempo $T_{IORefresh}$ deve ser acrescido de 5 ms decorrentes da incerteza com que os eventos são registrados no arquivo SOE. Esta incerteza também está documentada no *datasheet* do

produto. Com estes valores se estima que o tempo de processamento T_a e T_c é $443\mu s$.

Um segundo teste foi executado para emular o comportamento de um dos *bays* da subestação T1-1. Neste teste, o gerador de mensagens SMV foi configurado para transmitir mensagens com prioridade 7, emulando o comportamento de um dispositivo MU. O relé RL131 foi configurado para gerar mensagens GOOSE cada 30 ms e com marcação de prioridade 5, similar ao comportamento do dispositivo de intertravamento. O relé SEL751-A foi configurado para gerar mensagens GOOSE com prioridade 4. Porém, por causa de uma restrição do equipamento, o período das suas mensagens foi configurado em 50 ms. Assim, não foi possível emular completamente o comportamento do dispositivo de comando do caso de estudo T1-1. Um computador foi utilizado para executar o gerador de mensagens GOOSE com período de 30 ms e valor de prioridade 6, emulando o comportamento do dispositivo de proteção a distância. Neste mesmo dispositivo, também foi executado o analisador de mensagens *Wireshark* para capturar o tráfego da rede. Por fim, o *switch* foi configurado para separar a rede em VLAN e suportar as classes de QoS seguindo a mesma forma do que no caso de estudo T1-1. O *switch* utilizado (T1000) possui uma arquitetura similar ao modelo de simulação desenvolvido neste trabalho (Figura 29), cada porta de comunicação tem oito filas de prioridade e um escalonador de prioridade fixa. Na Figura 57 apresenta-se a estrutura interna das portas do *switch* (imagem extraída da interface de configuração do *switch*).

Figura 57. Estrutura interna de uma porta do *switch*.



Fonte: (Alstom, 2015).

Na Figura 58 é apresentada a operação do *switch*. No experimento, o dispositivo MU foi conectado na porta 1, o dispositivo de proteção à distância na porta 2, o dispositivo de intertravamento na porta 3 e o dispositivo de comando na porta 4. Importante observar que a figura apresenta a operação da porta 2 do *switch* (não há dados na coluna Q6).

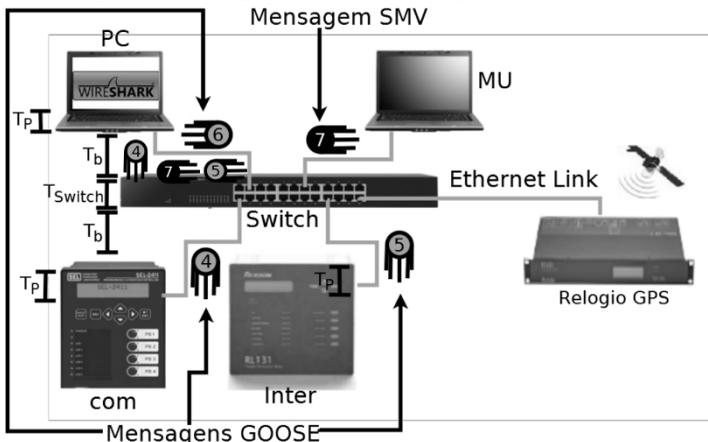
Figura 58. Divisão de tráfego no *switch*.

Port	Q0		Q1		Q2		Q3		Q4		Q5		Q6		Q7	
	Rx	Tx	Rx	Tx												
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10893	1
2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	76	0	0	0	11317
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	78	0	0	0	0	2
4	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	82	0	0	0	1

Fonte: Autor.

Na Figura 59 apresenta-se a arquitetura do segundo teste com equipamentos reais.

Figura 59. Arquitetura do segundo teste com equipamentos reais.



Fonte: Autor.

Dado que o ponto de coleta de dados é a placa de rede do dispositivo de proteção a distância (conectado na porta 2 do switch), é possível determinar a ocorrência de interferências/bloqueios através da diferença entre os tempos de chegada de cada um dos fluxos de dados da rede. Assim, na ausência de interferências/bloqueios, essa diferença deve ser igual ao período de transmissão de cada uma das mensagens. O

sistema ficou em operação por duas horas, os resultados foram condensados no Quadro 29.

Quadro 29. Bay de T1-1 com equipamentos reais.

<i>Fluxo de dados</i>	<i>Período de transmissão configurado (ms)</i>	<i>Média da diferença entre tempos de chegada (ms)</i>	<i>Média do atraso referente ao período de transmissão (ms)</i>
<i>MU</i>	0,208333	0,2088	0,00047
<i>Intertravamento</i>	30	31	1
<i>Comando</i>	50	52,08	2,08

Fonte: Autor.

Dos dados do quadro (última coluna), pode-se observar que o fluxo de mensagens SMV (MU) não sofreu de interferências/bloqueio durante todo o tempo do teste. Note-se também que as mensagens GOOSE do dispositivo de comando sofreram o dobro da interferência do que as mensagens do dispositivo de intertravamento (2,08ms e 1ms, respectivamente), demonstrando o processamento prioritário de mensagens (SMV, intertravamento e comando, nessa ordem). O valor do tempo de interferência ($T_{interferência}$) causado por uma única mensagem pode ser atribuído ao tempo de transmissão da mensagem (T_b) adicionado, tanto do tempo processamento do IED (T_p) estimado no primeiro teste, quanto do tempo de processamento no *switch* (T_{switch}) como explicado a seguir na Equação 7:

$$\begin{aligned} T_p + T_b + T_{switch} + T_b + T_p &= T_{interferência} \\ 2T_p + T_{switch} + 2T_b &= T_{interferência} \end{aligned} \quad (7)$$

Utilizando os valores conhecidos para T_p e T_b , e utilizando **1.02 ms** como a média do tempo de interferência medido, estima-se que o T_{switch} é igual a **882 μ s**.

Tendo estimado os valores de T_p e T_{switch} é possível estimar o valor do tempo de resposta para as mensagens envolvidas no experimento da Figura 59. No Quadro 30, apresenta-se a comparação entre os resultados obtidos com os três métodos explorados nesta dissertação: método analítico, modelos de simulação e experimentos com protótipos reais. Dado que tanto nos modelos analíticos quanto nos modelos de simulação os efeitos das operações de hardware não foram considerados (*debounce*, tempo de varredura de portas de I/O, etc.), os tempos de processamento

desses modelos diferem dos valores estimados para os dispositivos reais utilizados nos experimentos apresentados nesta seção. Entende-se então que, para obter resultados compatíveis entre os três métodos (analíticos, simulados e experimentais) basta adicionar T_{switch} e T_p ao tempo de computação (C_m) das mensagens.

Quadro 30. Comparação do tempo de resposta obtido com o método simulado, analítico e experimental.

Tarefa (Mensagem)	Média do Tempo de resposta Experimental (μs)	Máximo Tempo de Resposta (μs)	
		Método analítico	Simulação
T_4 (Comando-SB2)	1363,5	1366,45	1363,4
T_5 (Intertravamento- BP1)	1364,8	1366,45	1362,92
T_6 (Proteção à distância-BP2)	1351	1352,66	1350,38
T_7 (MU-SB1)	1351,5	1352,66	1350,38

Fonte: Autor.

Do Quadro 30 pode-se apreciar que os resultados obtidos são próximos entre si. Adicionalmente, fica exposto que quando considerado o tempo de processamento do switch e do IED, o tempo de resposta obtido pelo método analítico continua sendo o mais pessimista por considerar que todas as fontes de mensagens transmitem seus respectivos pacotes no mesmo instante (instante crítico), o que muito raramente acontece no cenário simulado e experimental. No entanto, este pessimismo serve como medida de segurança quando analisado o cumprimento de requisitos temporais no projeto de redes de comunicação para SAS.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados apresentados neste capítulo, demonstrou-se a correta implementação dos conceitos da norma IEC 61850 na plataforma de simulação desenvolvida neste trabalho. Portanto pode-se afirmar que esta plataforma eventualmente serviria em processos de treinamentos que visem o ensino dos princípios de redes de comunicação para sistemas de automação de subestações (SAS).

Com respeito aos testes com equipamentos reais, foi constatado que, apesar da norma IEC-61850 ter como objetivo principal a

interoperabilidade, os fabricantes ainda têm problemas em atingir este objetivo, especialmente no procedimento de configuração, já que as ferramentas de cada fabricante não conseguiram decodificar totalmente os arquivos CID gerados pela sua contraparte.

Embora não tenham sido executados testes relacionados ao efeito do tráfego de fundo (mensagens de configuração, transferência de arquivos de relatórios, etc.) no desempenho temporal do SAS, é possível estender os resultados apresentados neste capítulo para compreender como seria este comportamento. Considerando as mensagens do tráfego de fundo como mensagens relativamente grandes (da ordem dos *kilobytes*) e configurados com a menor prioridade no sistema, o bloqueio causado por elas poderia comprometer a correção temporal de mensagens de alta prioridade. Nesse contexto seria necessário definir políticas de interrupção deste tipo de tarefas e assim manter a transmissão das mensagens dentro do seu respectivo *deadline*. Sidhu *et al.* (2000) por exemplo, propõem que, além da implementação de políticas de escalonamento e tratamento de QoS nos *switch*, estas também sejam implementadas nos IED para ter um maior controle da geração de mensagens na rede.

É importante salientar que os tempos de processamentos (tanto do *switch* quanto dos IED) estimados neste capítulo são particulares dos equipamentos utilizados para esta dissertação. Estes tempos são fortemente dependentes dos dados disponibilizados pelos fabricantes nos *datasheets* correspondentes.

7. CONCLUSÕES

7.1 REVISÃO DAS MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS

Pelo fato de definir a forma com que equipamentos de diferentes fabricantes devem se comunicar, o padrão IEC 61850 vem ganhando relevância, facilitando a inserção de novas tecnologias nos sistemas de energia elétrica e aproximando a ideia de *smart grid* cada vez mais à realidade. Isto tudo cria oportunidade para a pesquisa e desenvolvimento de ferramentas que permitam verificar o correto funcionamento dos sistemas de comunicação em SAS.

Esta dissertação se inclui nesse contexto através da utilização de conceitos de sistemas de tempo real para o estudo do comportamento de redes de comunicação baseados na norma IEC 61850 e para o desenvolvimento de uma plataforma de simulação dessas redes.

De forma sucinta, este trabalho foi guiado no sentido de estudar e propor soluções para as seguintes questões:

- Que características devem ter tanto os dispositivos do barramento de processos quanto as mensagens produzidos por eles para não violar os requisitos de desempenho temporal definidos pela norma IEC-61850?
- Quais seriam os casos representativos de sistemas de proteção e controle de subestações a serem utilizados como cenários para estudo do barramento de comunicação em SAS?
- É possível utilizar técnicas analíticas como ferramenta para prever o comportamento de equipamentos utilizados em sistemas de automação de subestações?

7.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO

Inicialmente foi feito um estudo sobre a norma IEC 61850 e sobre o estado da arte dos sistemas de automação para subestações. Baseando-se nesses estudos, foram desenvolvidos modelos de simulação para cada um dos dispositivos que faz parte do barramento de processos de uma subestação. Estes modelos foram integrados em uma plataforma de simulação que permite visualizar e estimar o comportamento temporal das mensagens definidas pela norma (GOOSE e SMV). Adicionalmente, foram definidos cenários típicos da operação de uma subestação os quais serviram como casos de estudo durante a execução das simulações.

Uma das conclusões mais importantes, obtida através da análise dos resultados das simulações, foi que a utilização dos recursos de comunicação do padrão IEEE 802.1q é fundamental para o cumprimento dos requisitos temporais definidos pela norma IEC 61850. Além disso, foi ilustrado a forma com que as técnicas de sistemas de tempo real podem ser utilizadas tanto para estimar o tempo de resposta de uma determinada mensagem como para determinar a quantidade máxima de dispositivos que podem ser inseridos numa rede de comunicação, auxiliando na tomada de decisões em casos de projetos de ampliação de subestações.

Como parte do trabalho, foi feito um estudo de mercado com o objetivo de adquirir equipamentos necessários para implantar a infraestrutura básica de um laboratório que viabilize a formação de engenheiros na área de automação de sistemas elétricos. Com a aquisição destes dispositivos e com a ajuda de uma ferramenta de geração de mensagens GOOSE e SMV, desenvolvida também como parte deste trabalho, foi possível estabelecer uma relação entre os resultados do sistema simulado e os de um sistema real, principalmente na obtenção dos parâmetros de operação dos equipamentos reais.

7.3 PERSPECTIVAS FUTURAS

Existem diversas possibilidades de continuação deste trabalho. Algumas propostas de possíveis extensões são:

- Integrar a ferramenta de simulação e a ferramenta de geração de mensagens em um único ambiente que permita a virtualização de redes de comunicação para SAS de grande porte.
- Adicionar os serviços de comunicação MMS e os serviços de configuração SCL à ferramenta de simulação.
- Utilizar métodos estatísticos mais apurados dos aqui apresentados para estimar os parâmetros de desempenho tanto do sistema simulado quanto do sistema real.
- Adicionar modelos de simulação de dispositivos do SEP (transformadores, linhas de transmissão, etc.) para obter cenários de simulação mais próximos da operação real de subestações de energia elétrica.
- Estudar as mais recentes extensões da norma IEC 61850 para verificar quais novos detalhes devem ser considerados para representar melhor os dispositivos utilizados em rede de comunicação para SAS.

REFERÊNCIAS

ABB. **ABB Review**: Special Report IEC 61850. [s.l]: Abb, 2010. 64 p. Disponível em: <https://library.e.abb.com/public/a56430e1e7c06fdfc12577a00043ab8b/3BSE063756_en_ABB_Review_Special_Report_IEC_61850.pdf>. Acesso em: 20 set. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **482**: Acesso de Micro e Mini Geração Distribuída. Brasília: Aneel, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

BRAND, K.-p.. The standard IEC 61850 as prerequisite for intelligent applications in substations. **Ieee Power Engineering Society General Meeting, 2004.**,[s.l.], v. 1, n. 1, p.714-718, jun. 2004. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/pes.2004.1372909.

BURNS, Alan; WELLINGS, Andy. **Real-Time System and Programming Languages**: Ada, Real-Time Java and C/Real-Time POSIX. 4. ed. Londres: Pearson, 2009.

BUSCHMANN, Frank et al. **Pattern-Oriented Software Architecture: A System of Patterns**. [s.l]: Willey, 1996.

BUTAZZO, Giorgio C. **Hard Real-Time Computing System**: Predictable Scheduling Algorithms and Application. 3. ed. Pisa: Springer, 2011. 528 p.

COULOURIS, George et al. **DISTRIBUTED SYSTEMS**: Concepts and Design. 5. ed. S.l: Pearson, 2012. 1067 p.

DAVIS, Robert I. et al. Controller Area Network (CAN) schedulability analysis: Refuted, revisited and revised. **Real-time Syst**,[s.l.], v. 35, n. 3, p.239-272, 30 jan. 2007. Springer Science + Business Media. DOI: 10.1007/s11241-007-9012-7.

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.

DJIEV, S.1 **Industrial Network for Communication and Control**. Sofia: Anp, 2002. 39 p. Disponível em: <<http://anp.tu-sofia.bg/djiev/PDF/files/IndustrialNetworks.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2014.

FALK, H., Burns, M.; **MMS and ASN.1 Encodings Simple Examples and Explanations on How to Crack an MMS PDU**, Systems Integration Specialists Company, Inc.(SISCO), USA, 1996.

FARINES, Jean-marie et al. **Sistemas de Tempo Real**. Florianópolis: Editora Ufsc, 2000. 208 p.

FERREIRA, Roger Daniel F. et al. Cloud IEC 61850. **Pac World Conference 2013**, Dublin, v. 1, n. 1, p.1-10, jun. 2013.

GE, **Protection And Control Journal**: The Road Ahead. [s.l]: General Electric, 2009. 116 p. Disponível em: <https://www.gedigitalenergy.com/multilin/journals/issues/PCJ_Spring2009.pdf>. Acesso em: 20 set. 2014.

GOLSHANI, Mohammad; TAYLOR, Gareth A. ; PISICA, Ioana. Simulation of power system substation communications architecture based on IEC 61850 standard.**2014 49th International Universities Power Engineering Conference (upec)**, Cluj-napoca, v. 1, n. 1, p.1-6, set. 2014. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/upec.2014.6934745.

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

GUPTA, Ram Prakash. Substation Automation Using IEC61850 Standard.**Fifteenth National Power Systems Conference (npsc)**, Bombay, p.462-466, dez. 2008.

FOROUZAN, Behrouz A. **Data Communications and Networking**. 4. ed. Boston: Mcgraw-hill, 2007. 1171 p.

HOLBACH, J et al. First IEC61850 Multivendor Project in the USA.**Pacautumn**, [s.l], v. 1, n. 1, p.50-58, set. 2007.

INET. INET Framework for OMNeT++: User Manual. 4.5 [s.l]: Opensim Ltd., 2012. 173 p. Disponível em: <<https://omnetpp.org/doc/inet/api-current/inet-manual-draft.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2014.

INGRAM, David Mark Edward. **Assessment of Precision Timing and Real-Time Data Networks for Digital Substation Automation**. 2013. 210 f. Tese (Doutorado) - Curso de Electrical Engineering, Electrical Engineering And Computer Science, Queensland University Of Technology, Queensland, 2013. Disponível em: <<http://eprints.qut.edu.au/60892/5/60892.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2011.

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-60044**: Instrument Transformer. [s.l]: Iec, 2004.

JUÁREZ, Javier; RODRÍGUEZ-MORCILLO, Carlos; RODRÍGUEZ-MONDEJAR, José Antonio. Simulation of IEC 61850-based substations under OMNeT++. **Proceedings Of The Fifth International Conference On Simulation Tools And Techniques**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.319-326, mar. 2012. Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering (ICST). DOI: 10.4108/icst.simutools.2012.247730.

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. Disponível em: <<http://eprints.qut.edu.au/60892/5/60892.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2014.

KONKA, Jakub W. et al. Traffic generation of IEC 61850 sampled values. **2011 Ieee First International Workshop On Smart Grid Modeling And Simulation (sgms)**, Brussels, v. 1, n. 1, p.43-48, out. 2011. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/sgms.2011.6089025.

KOSTIC, Tatjana; FREI, Christian. Modelling and using IEC 61850-7-2 (ACSI) as an API. **2007 Ieee Lausanne Power Tech**, [s.l.], v. 2, n. 1, p.713-719, jul. 2007. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/pct.2007.4538403.

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.

KRIGER, Carl . A detailed analysis of the GOOSE message structure in an IEC 61850 standard-based substation automation system. **International Journal Of Computers, Communications And Control**, [s.l.], v. 8, n. 5, p.708-721, out. 2013.

KUNDUR, P. . **Power System Stability And Control**. New York: Mcgraw-hill, Inc., 1993. 1199 p.

KUROSE, James ; ROSS, Keith . **Computer Networking: A Top-Down Approach**. 6. ed. Boston: Pearson, 2013. 889 p.

LEELARUJI, Rujiroj . **Power System Protective Relaying: basic concepts, industrial-grade devices, and communication mechanisms**. S.l: Kth Royal Institute Of Technology, 2011. 35 p.

LASSETER, Robert H. **Distributed Generation**. Power System Engineering Research Center. Wisconsin, Usa, p. 1-3. 4 set. 2003. Disponível em: <http://pserc.wisc.edu/documents/publications/special_interest_publications/grid_reliability/Lasseter_DG_PSERC_Sep_2003.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2015.

LEE, Tae-gun ; SHON, Su-goog . Development of real-time simulator theory and modeling technique based on NS-2. **2010 2nd International Conference On Education Technology And Computer**, Shanghai, v. 5, n. 1, p.115-117, jun. 2010. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/icetc.2010.5529802.

LIMA, Claudio. **Geração Distribuída Baseada em Normas e Padrões Técnicos**. Brasília: Agx, 2014. 35 slides, color. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/hotsite/mmgd/slides/Claudio_Lima.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2015.

LONGO, Michela et al. Smart planning for ecoefficient cities. **2013 International Conference On Renewable Energy Research And Applications (icrera)**, Madrid, v. 3, n. 1, p.366-370, out. 2013. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/icrera.2013.6749782.

MACKIEWICZ, R. E. Overview of IEC 61850 and Benefits. **2006 Ieee Pes Power Systems Conference And Exposition**, Atlanta, v. 57, n. 57, p.623-630, out. 2006. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/psce.2006.296392.

MCDONALD, John D. **ELECTRIC POWER SUBSTATIONS**. 3. ed. Florida: CRC Press, 2012. 524 p.

MIAO, Xin et al. Comparing Smart Grid technology standards roadmap of the IEC, NIST and SGCC. **2012 China International Conference On Electricity Distribution**, Shanghai, v. 5, n. 1, p.1-4, set. 2012. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/ciced.2012.6508435.

MOHAGHEGHI, S. et al. Modeling distribution automation system components using IEC 61850. **2009 Ieee Power & Energy Society General Meeting**, Calgary, p.1-6, jul. 2009. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/pes.2009.5275841.

MONTAZERI, Mohsen et al. Real time substation distributed control system simulator development based on IEC 61850 standard for a sample substation (case study: Sheikh bahayi substation 400/230/63KV). **2013 Smart Grid Conference (sgc)**, Tehran, v. 1, n. 1, p.108-112, dez. 2013. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/sgc.2013.6733820.

MOORE, Roger; GORAJ, Maciej . Ethernet for IEC 61850. **Pacworld: Protection, Automation and Control**, [s.l.], v. 5, n. 8, p.1-5, nov. 2010. Disponível em: <https://www.pacw.org/issue/september_2010_issue/cover_story/ethernet_for_iec_61850/complete_article/1.html>. Acesso em: 20 jan. 2015.

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

NETTO, U. C. et al. A behaviour evaluation of network traffic in a power substation concerning GOOSE messages. **2012 Ieee Power And Energy Society General Meeting**, San Diego, v. 1, n. 1, p.1-5, jul. 2012. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/pesgm.2012.6345140.

NIVETHAN, Jeyasingam. **MODELING AND SIMULATION OF AN ELECTRIC POWER SUBSTATION AUTOMATION**. 2013. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Computer Science, The University Of Tulsa, Tulsa, 2013.

PEREIRA, Sergio Paulo. **Um Estudo Empírico do Barramento de Processos (IEC 61850-9-2). Desenvolvimento, Montagem e Teste.** 2013. Uberlândia, v. 1, n. 1, p.1-12, jul. 2013. PAC Latin America – Protection Automation and Control. Disponível em: <http://www.conprove.com.br/pub/artigos/2012_PAC_ESTUDO_BARRAMENTO_DE_PROCESSO_IEC61850_ARTIGO.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2015

PHAM, Giang. **Integration of IEC 61850 MMS and LTE to support smart metering communications.** 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Computer Science, Electrical Engineering, Mathematics And Computer Science, University Of Twente, Twente, 2013. Disponível em: <<http://purl.utwente.nl/essays/64424>>. Acesso em: 31 out. 2014.

RABELO, Ricardo J. **CIM:** Florianópolis: Ufsc, 2012. 52 slides, color. Disponível em: <<http://user.das.ufsc.br/~rabelo/Ensino/DAS5316/MaterialDAS5316/CIM.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2014.

RAMIREZ, Carlos Felipe . **Subestaciones de Alta y Extra alta Tensión.**Medellin: Mejia Villegas S.a., 1991. 809 p.

REASON, Tecnologia. **RL131 Relé Multifunção para Proteção e Controle de Alimentador:** Manual de Usuário. Florianópolis: Reason Tecnologia, 2014. 281 p.

SIDHU, T.s.; YIN, Yujie. IED modelling for IEC61850 based substation automation system performance simulation. **2006 Ieee Power Engineering Society General Meeting**, [s.l.], p.1-7, out. 2006. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/pes.2006.1708970.

SIDHU, S. et al. Control and automation of power system substation using IEC61850 communication. **Proceedings Of 2005 Ieee Conference On Control Applications, 2005. Cca 2005.**, Canada, p.1331-1335, ago. 2005. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/cca.2005.1507316.

SIDHU, Tarlochan S.; YIN, Yujie. Modelling and Simulation for Performance Evaluation of IEC61850-Based Substation Communication Systems. **Ieee Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 22, n. 3, p.1482-1489, jul. 2007. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/tpwr.2006.886788.

SIDHU, S. et al. Implementation issues with IEC 61850 based substation automation systems. **Fifteenth National Power Systems Conference**, India, p. 473-478, dez. 2008.

SIDHU, T S et al. Packet scheduling of GOOSE messages in IEC 61850 based substation intelligent electronic devices (IEDs). **Ieee Pes General Meeting**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.1-8, jul. 2010. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/pes.2010.5590065.

SILLMANN, Kristjan. **Applied Data Communication Communication**:Estonia: Utt, 2013. 25 slides, color. Disponível em: <<http://www.dcc.ttu.ee/LAP/ISP0051/loengud/Loeng05.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2014.

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.

SOLLECITO, Larry. Smart Grid: The Road Ahead. **Protection & Control Journal**, S.l, v. 8, n. 1, p.15-19, jul. 2009. Disponível em: <http://www.gedigitalenergy.com/multilin/journals/issues/PCJ_Spring2009.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2015.

SOUZA, B. A. et al. An IEC 61850 network simulator. **2010 Ieee/pes Transmission And Distribution Conference And Exposition: Latin America (T&D-LA)**, São Paulo, v. 1, n. 1, p.511-515, nov. 2010. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/tcd-la.2010.5762930.

STEMMER, Marcelo Ricardo. **REDES LOCAIS INDUSTRIAIS: A INTEGRAÇÃO DA PRODUÇÃO ATRAVÉS DAS REDES DE COMUNICAÇÃO**. Florianópolis: Editora Ufsc, 2010. 272 p.

TANENBAUM, Andrew S; WETHERALL, David. **Computer Networks**. 5. ed. Boston: Prentice Hall, 2012. 962 p.

TINDELL; HANSSON; WELLINGS. Analysing real-time communications: controller area network (CAN). **Proceedings Real-time Systems Symposium Real-94**, San Juan, v. 1, n. 1, p.259-263, 7 dez. 1994. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/real.1994.342710.

TINDELL, K. W. et al. An extendible approach for analyzing fixed priority hard real-time tasks. **Real-time Syst**, [s.l.], v. 6, n. 2, p.133-151, mar. 1994. Springer Science + Business Media. DOI: 10.1007/bf01088593.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **RUS1724E-300**: Design Guide for Rural Substation. [s.l.]: Rural Utilities Service, 2001. 764 p. Disponível em: <http://www.rd.usda.gov/files/UEP_Bulletin_1724E-300.pdf>. Acesso em: 13 out. 2014.

VARGA, András . **OMNeT++**: User Manual. 4.5 [s.l]: Opensim Ltd., 2014. 432 p. Disponível em: <<https://omnetpp.org/doc/omnetpp/UserGuide.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2014.

YADAV, Navidra ; KAPADIA, Eruch. **IP and Ethernet Communication Technologies and Topologies for IED networks**. S.l: Cisco, 2010. 21 p. Disponível em: <http://www.gridwiseac.org/pdfs/forum_papers10/kapadia_gi10.pdf>. Acesso em: 20 set. 2014.

YANG, Ming-ta. Interoperability and Performance Analysis of IEC61850 Based Substation Protection System. **International Journal Of Electrical, Robotics, Electronics And Communications Engineering**, [s.l], v. 7, n. 8, p.112-119, ago. 2013.

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

ANEXO A – IEC 61850-2, GLOSSÁRIO

A Parte 2 da norma IEC 61850 contém a definição da terminologia específica utilizada no contexto dos Sistemas de Automação de Subestações. Na sequência, se apresentam alguns termos e definições que auxiliam no entendimento dos conceitos da norma.

- **Bay** – Subparte das subestações de energia elétrica cujos componentes estão intimamente ligados e cumprem uma função específica em conjunto.
- **Dados (DO)** – Informação de aplicação, estruturada e significativa, localizada nos IED e que pode ser escrita ou lida através de serviços de comunicação.
- **Atributos de dados (DA)** – Definem o nome (semântica), o formato, o range possível de valores e a representação dos valores dos dados a serem comunicados pelos IED.
- **Restrições de Funcionalidade (FC)** – Propriedade dos DA que indica os serviços de comunicação (por exemplo escrita, leitura, substituição, etc.) que podem ser aplicados a eles.
- **Nó Lógico (LN)** – A menor parte de uma função, capaz de transmitir dados (DO) através de serviços de comunicação. Um LN é um objeto definido pelos seus dados e métodos.
- **Dispositivo Lógico (LD)** – Dispositivo virtual definido para permitir a associação de LN para propósitos de comunicação.
- **Dispositivo Eletrônico Inteligente (IED)** – Qualquer dispositivo que incorpore (embarque) um ou mais microprocessadores, com a capacidade de receber ou transmitir dados/comandos desde ou para uma fonte externa (por exemplo relays digitais, controladores, etc.).
- **Modelo** – Representação de alguns aspectos da realidade. O propósito de criar um modelo é descrever ou prever como as coisas funcionam no mundo real, explorando uma representação simplificada de uma entidade particular ou fenômeno.
- **Modelo de Informação** – Conhecimento referente as funções (dispositivos) de uma subestação, materializado e acessível através da norma IEC61850. O modelo descreve, de forma abstrata, a representação simplificada de uma função ou dispositivo real.
- **Intercambiabilidade** – Habilidade de substituir um dispositivo fornecido por um fabricante por um outro dispositivo fornecido

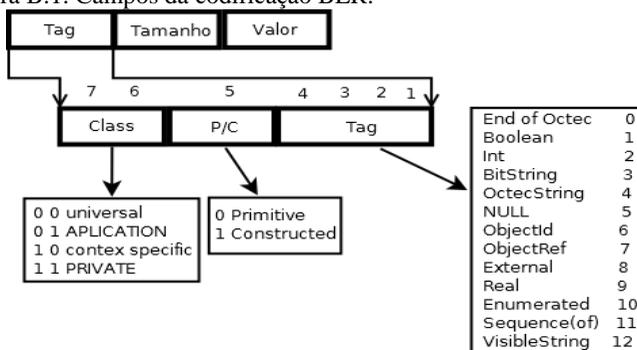
por outro fabricante, sem fazer mudanças em outros elementos do sistema.

- ***Interoperabilidade*** – Habilidade de dois ou mais IED do mesmo fabricante, ou de diferente fabricante, de trocar informações e utilizá-la para a correta execução de funções especificadas.
- ***Merging Unit (MU)*** – Unidade física que executa a combinação de dados de tensão e/ou corrente originados por diferentes conversores secundários. A MU pode ser parte de um dos transdutores de campo ou pode ser uma unidade separada localizada, por exemplo, no quarto de controle da subestação.

ANEXO B – ABSTRACT SYNTAX NOTATION ONE/BASIC ENCODING RULES (ASN-1/BER)

O ASN.1 é um padrão que descreve regras e estruturas para representar dados em redes de comunicação, particularmente em redes de computadores. Com estas regras, permite o processamento de informações independente da arquitetura específicas de cada máquina da rede (Coulouris, 2012). Por outro lado o formato BER, especifica um formato para codificar e decodificar as estruturas de dados definidas com as regras ASN.1. No BER, cada dado é codificado utilizando um identificador de tipo (T), uma descrição do tamanho (T) e o valor do dado transmitido (V). Na Figura B.1, apresentam-se os campos que fazem parte da codificação TTV. Estes dois padrões fazem parte da camada de apresentação do RM-OSI (Kurose, 2013).

Figura B.1. Campos da codificação BER.



Fonte: (ITU-T X.690, 2002)

No Quadro B.1, apresentam-se os identificadores de tipos de dados ASN.1/BER mais utilizados para codificar as informações do barramento de processo definido no padrão IEC 61850.

Quadro B.1. Indicadores de tipo do padrão ASN.1/BER

Tipo de Dado	Representação Hexadecimal do Identificador (valor do Tag)
BOOLEAN	0x01
INTEGER	0x02
OCTEC STRING	0x04
SEQUENCE AND SEQUENCE OF	0x10

Fonte: (ITU-T X.690, 2002).

Na Figura B.2 apresenta-se o conteúdo em bytes de uma mensagem SMV gerada com a plataforma de simulação. Nessa figura, os bytes do APDU estão codificados utilizando os campos TTV segundo ASN.1/BER. Por fim, no Quadro B.2 apresenta-se a definição ASN.1 do APDU da mensagem SMV comparada com o APDU gerado pela plataforma de simulação. Assim, com ajuda do Quadro 9 é possível verificar a correta implementação das funções de codificação e decodificação na plataforma de simulação desenvolvida na presente dissertação.

Figura B.2. Detalhes da mensagem SMV geradas pela plataforma de simulação

Bytes		
1-7	1 0 1 0 1 0 1 0	Preamble
8	1 0 1 0 1 0 1 1	Start of Frame
9-14	0x01 0x0C 0xCD 0x04 0x01 0xFF	Destination Address (Definido norma)
15-20	0x00 0x11 0x22 0x33 0x44 0x55	Source Address (Definido Hardware)
21	0x8100	TPID-FIXO(priority tag)
22	1 0 0 0 0 0 0 0	TCI-1 (User Priority-3b + CFI-1b + VID-4b)
23	0x00	TCI-2(MD-8bits)
24-25	0x88 0xBA	Ethertype (Definido norma)
26-27	0x40 0x00	APPID (Unico no sistema)
28-29	0x00 0x78	Tamanho (m+8)
30-33	0x80 0x00 0x00 0x00	Reservado1(test) e Reservado 2
<pre> 60 82 00 6C 80 01 01 a2 82 00 65 30 63 80 12 68 65 63 74 6f 72 53 61 6d 70 6c 65 56 61 6c 75 65 00 82 02 00 00 83 04 00 00 00 01 85 01 01 87 40 00 00 00 00 00 00 00 00 </pre>		APDU

Fonte: (IEC 61850-9-2, 2004)

Quadro B.2. Definição da mensagem SMV em ASN.1

Definição ASN.1 do SMV	Campo do APDU	Bytes do APDU Gerado		
		Tag	Tamanho	Valor
SavPdu [Application 0]	<i>Início do APDU</i>	60	82	00 6C
{				
context-specific sequence [0]	<i>Número de ASDU no APDU</i>	80	01	
context-specific sequence [2]	<i>Tamanho do APDU</i>	A2	82	00 65
}				
context-specific constructed type	<i>Início do ASDU</i>	30	63	
{				
context-specific sequence [0]	<i>SvID</i>	80	12	68 65 63 ...
context-specific sequence [2]	<i>SmpCnt</i>	82	02	00 00
context-specific sequence [3]	<i>ConfRev</i>	83	04	00 00 00 01
context-specific sequence [5]	<i>SmpSynch</i>	85	01	01
context-specific sequence [7]	<i>Dataset</i>	87	40	
Conteúdo do Dataset PhsMeas1 da norma IEC 61850-9-2				
}				

Fonte: (IEC 61850-9-2, 2004).

ANEXO C – TESTE DE ESCALONABILIDADE COM MODELO DE TAREFAS ESPORADICAMENTE PERIÓDICAS.

Tindell (2000) apresenta a dedução do modelo matemático para a análise de escalonabilidade de tarefas periódicas com *deadline* menor ou igual do que o seu período (Equação 1). Adicionalmente apresenta a dedução do modelo matemático para a análise de escalonabilidade de tarefas esporadicamente periódicas. No entanto, é possível definir o primeiro modelo como um caso particular do segundo (Burns, 1993). Neste anexo se apresenta a forma em que esses dois modelos estão relacionados. Na sequência, utilizando a Equação 3, é apresentado o procedimento matemático do cálculo do tempo de resposta das tarefas do caso de estudo T1-1.

A Equação 3 descreve o tempo de resposta de tarefas esporadicamente como:

$$R_m = \max_{q=0,1,2,\dots} (w_m(q) + J_m - m_m t_m - M_m T_m) \quad (3)$$

$$w_m(q) = (M_m n_m + m_m + 1)C_m + B_m + \sum_{\forall j \in hp} \left(\min \left(n_j, \left\lceil \frac{J_j + w_m(q) - F_j T_j}{T_j} \right\rceil \right) + F_j n_j \right) C_j$$

Para tarefas periódicas com *deadline* menor do que seu período, os parâmetros da Equação 3 têm os seguintes valores:

- $T_m = t_m$ (Não existe período externo e período interno, existe um único período).
- $n_m = 1$ (Uma única instância da tarefa durante o período da tarefa).
- $= 0$ (Uma única instância da tarefa durante o período ocupado, antes do *deadline*).

Consequentemente:

$$M_m = \left\lfloor \frac{q}{n_m} \right\rfloor = q = 0$$

$$m_m = q - M_m n_m = q - q = 0$$

$$w_m(0) = C_m + B_m + \sum_{\forall j \in hp} \left(\min \left(n_j, \left\lceil \frac{J_j + w_m(0) - F_j T_j}{T_j} \right\rceil \right) + F_j \right) C_j$$

$$F_j = \left\lceil \frac{J_j + w_m(0)}{T_j} \right\rceil$$

Substituindo F_j em W_m e considerando $\left\lfloor \frac{J_j + w_m(q) - F_j T_j}{T_j} \right\rfloor$ como menor do que 1:

$$w_m(0) = C_m + B_m + \sum_{\forall j \in hp} \left(\left\lfloor \frac{J_j + w_m(0) - \left\lfloor \frac{J_j + w_m(0)}{T_j} \right\rfloor T_j}{T_j} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{J_j + w_m(0)}{T_j} \right\rfloor \right) C_j$$

$$w_m(0) = C_m + B_m + \sum_{\forall j \in hp} \left(\left\lfloor \frac{J_j + w_m(0)}{T_j} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{J_j + w_m(0)}{T_j} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{J_j + w_m(0)}{T_j} \right\rfloor \right) C_j$$

Distribuindo a função teto no somatório:

$$w_m(0) = C_m + B_m + \sum_{\forall j \in hp} \left(\left\lfloor \frac{J_j + w_m(0)}{T_j} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{J_j + w_m(0)}{T_j} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{J_j + w_m(0)}{T_j} \right\rfloor \right) C_j$$

$$w_m(0) = C_m + B_m + \sum_{\forall j \in hp} \left(\left\lfloor \frac{J_j + w_m(0)}{T_j} \right\rfloor \right) C_j$$

Substituindo na equação do tempo de resposta (R_m), obtém-se a expressão da Equação 1:

$$R_m = C_m + B_m + \sum_{\forall j \in hp} \left(\left\lfloor \frac{J_j + w_m(0)}{T_j} \right\rfloor \right) C_j + J_m$$

Na sequência, apresenta-se o procedimento utilizado para calcular o tempo de resposta no pior caso da tarefa $T4$ utilizando a Equação 3 no contexto do caso de estudo T1-1 aumentado (7 MU, 5 IED de comando e 5 IED de intertravamento). Ou seja, quando a mensagem GOOSE $T4$ (gerada por algum dispositivo de comando) é recebida no buffer de saída da porta 3 do *switch* (ligada ao dispositivo de proteção a distância). Neste procedimento são utilizados os valores do Quadro 16 e do Quadro 26.

I. Primeira iteração em q .

Utilizando $q = 0$, $n_m = 5$, $C_m = 13,79 \mu s$, $B_m = 0$:

$$M_m = \left\lfloor \frac{q}{n_m} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{0}{5} \right\rfloor = 0$$

$$\mathbf{m}_m = q - M_m n_m = 0 - 0 * 5 = 0$$

Dado que $t_m = \mathbf{0}$, a expressão $\min \left(\mathbf{n}_j, \left\lfloor \frac{J_j + w_m(q) - F_j T_j}{t_j} \right\rfloor \right)$ sempre será igual a \mathbf{n}_j . Assim:

$$w_m(0) = C_m + \sum_{\forall j \in hp} (n_j + F_j n_j) C_j$$

Iniciando a iteração em $w_m(\mathbf{0})$ com valor $w_m^0(0) = 0$:

$$F_j = \left\lfloor \frac{J_j + w_m^0(0)}{T_j} \right\rfloor = 0 \forall j \in hp$$

$$w_m^{0+}(0) = 13.79 + \sum_{\forall j \in hp} n_j C_j = 13.79 + 7 * 13.87 + 5 * 13.79 = 179,83$$

Dado que $w_m^{0+}(0) \neq w_m^0(0)$ então as iterações em $w_m(\mathbf{0})$ devem continuar com valor $w_m^{0+}(0) = w_m^1(0) = 179,83\mu s$.

$$F_j = \left\lfloor \frac{J_j + w_m^1(0)}{T_j} \right\rfloor = 0 \forall j \in hp$$

$$w_m^{1+}(0) = 13.79 + \sum_{\forall j \in hp} n_j C_j = 13.79 + 7 * 13.87 + 5 * 13.79 = 179,83$$

Dado que $w_m^{1+}(0) = w_m^1(0)$ então as iterações em $w_m(\mathbf{0})$ param com valor de **179,83 μs** .

II. Segunda iteração em q .

Incrementando o valor de $q (= \mathbf{1})$, e iniciando a iteração em $w_m(\mathbf{I})$ com valor $w_m^0(1) = 179,83$:

$$M_m = \left\lfloor \frac{q}{n_m} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{1}{5} \right\rfloor = 0$$

$$\mathbf{m}_m = q - M_m n_m = 1 - 0 * 5 = 1$$

Verifica-se a condição de parada:

$$w_m(\mathbf{1}) \not\leq m_m t_m + M_m T_m - J_m \text{ porque } 179,83 > -J_m$$

Percebe-se que é possível continuar com as iterações em $w_m(\mathbf{I})$:

$$F_j = \left\lfloor \frac{J_j + w_m^0(1)}{T_j} \right\rfloor = 0 \forall j \in hp$$

$$w_m^{0+}(1) = (1 + 1) C_m + \sum_{\forall j \in hp} (n_j) C_j = 27,58 + 7 * 13,87 + 5 * 13,79 = 193,62$$

Dado que $w_m^{0+}(1) \neq w_m^0(1)$ então as iterações em $w_m(\mathbf{I})$ devem continuar com valor $w_m^{0+}(1) = w_m^1(1) = 193,62\mu s$.

$$F_j = \left\lfloor \frac{J_j + w_m^1(1)}{T_j} \right\rfloor = 0 \quad \forall j \in hp$$

$$w_m^{1+}(1) = (1 + 1)C_m + \sum_{\forall j \in hp} (n_j)C_j = 27,58 + 7 * 13,87 + 5 * 13,79 = 193.62$$

Dado que $w_m^{1+}(1) = w_m^1(1)$ então as iterações em $w_m(1)$ param com valor de **193,62μs**.

III. Terceira iteração em q .

Incrementando o valor de q ($= 2$), e iniciando a iteração em $w_m(2)$ com valor $w_m^0(2) = 193,62$:

$$M_m = \left\lfloor \frac{q}{n_m} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{2}{5} \right\rfloor = 0$$

$$m_m = q - M_m n_m = 2 - 0 * 5 = 2$$

Verifica-se a condição de parada:

$$w_m(2) \not\leq m_m t_m + M_m T_m - J_m \text{ porque } 193,62 > -J_m$$

Percebe-se que é possível continuar com as iterações em $w_m(2)$:

$$F_j = \left\lfloor \frac{J_j + w_m^0(2)}{T_j} \right\rfloor = 0 \quad \forall j \in hp$$

$$w_m^{0+}(2) = (2 + 1)C_m + \sum_{\forall j \in hp} (n_j)C_j = 41,37 + 7 * 13,87 + 5 * 13,79 = 207.41$$

Dado que $w_m^{0+}(2) \neq w_m^0(2)$ então as iterações em $w_m(2)$ devem continuar com valor $w_m^{0+}(2) = w_m^1(2) = 207,41\mu s$.

Para a tarefa com prioridade 7 $T_j = 208.333$, portanto:

$$F_1 = \left\lfloor \frac{J_1 + w_m^1(2)}{T_1} \right\rfloor = 1$$

Para a tarefa com prioridade 5, $T_j = 30000$, portanto $F_2 = 0$. Assim:

$$w_m^{1+}(2) = (2 + 1)C_m + \sum_{\forall j \in hp} (n_j + F n_j)C_j$$

$$w_m^{1+}(2) = 41,37 + (7 + 7) * 13,87 + 5 * 13,79 = 304.5$$

Dado que $w_m^{1+}(2) \neq w_m^1(2)$ então as iterações em $w_m(2)$ devem continuar com valor $w_m^{1+}(2) = w_m^2(2) = 304,5\mu s$.

Para a tarefa com prioridade 7, $F_1 = 1$ e para a tarefa com prioridade 5 $F_2 = 0$. Assim:

$$w_m^{2+}(2) = (2 + 1)C_m + \sum_{\forall j \in hp} (n_j + Fn_j)C_j$$

$$w_m^{2+}(2) = 41,37 + (7 + 7) * 13,87 + 5 * 13,79 = 304,5$$

Dado que $w_m^{2+}(2) = w_m^2(2)$ então as iterações em $w_m(2)$ param com valor de **304,5µs**.

IV. Quarta iteração em q .

Incrementando o valor de $q (= 3)$, e iniciando a iteração em $w_m(3)$ com valor $w_m^0(3) = 304,5$:

$$M_m = \left\lfloor \frac{q}{n_m} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{3}{5} \right\rfloor = 0$$

$$m_m = q - M_m n_m = 3 - 0 * 5 = 3$$

Verifica-se a condição de parada:

$$w_m(3) \not\leq m_m t_m + M_m T_m - J_m \text{ porque } 304,5 > -J_m$$

Percebe-se que é possível continuar com as iterações em $w_m(3)$. Para a tarefa com prioridade 7, $T_j = 208.333$, portanto:

$$F_1 = \left\lfloor \frac{J_1 + w_m^0(3)}{T_1} \right\rfloor = 1$$

Para a tarefa com prioridade 5, $T_j = 30000$, portanto $F_2 = 0$. Assim:

$$w_m^{0+}(3) = (3 + 1)C_m + \sum_{\forall j \in hp} (n_j + Fn_j)C_j$$

$$w_m^{0+}(3) = 55,16 + (7 + 7) * 13,87 + 5 * 13,79 = 318,29$$

Dado que $w_m^{0+}(3) \neq w_m^0(3)$ então as iterações em $w_m(3)$ devem continuar com valor $w_m^{0+}(3) = w_m^1(3) = 318,29\mu s$.

Para a tarefa com prioridade 7, $F_1 = 1$ e para a tarefa com prioridade 5 $F_2 = 0$. Assim:

$$w_m^{1+}(3) = (3 + 1)C_m + \sum_{\forall j \in hp} (n_j + Fn_j)C_j$$

$$w_m^{1+}(3) = 55,16 + (7 + 7) * 13,87 + 5 * 13,79 = 318,29$$

Dado que $w_m^{1+}(3) = w_m^1(3)$ então as iterações em $w_m(3)$ param com valor de **318,29µs**.

V. *Quinta iteração em q.*

Incrementando o valor de \mathbf{q} ($= 4$), e iniciando a iteração em $w_m(4)$ com valor $w_m^0(4) = 318,29$:

$$M_m = \left\lfloor \frac{q}{n_m} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{4}{5} \right\rfloor = 0$$

$$m_m = q - M_m n_m = 4 - 0 * 5 = 4$$

Verifica-se a condição de parada:

$$w_m(4) \not\leq m_m t_m + M_m T_m - J_m \text{ porque } 318,29 > -J_m$$

Percebe-se que é possível continuar com as iterações em $w_m(4)$. Para a tarefas com prioridade 7 e 5 o parâmetro F_J continua com o mesmo valor ($F_1 = 1$ e $F_2 = 0$, respectivamente). Assim:

$$w_m^{0+}(4) = (4 + 1)C_m + \sum_{\forall j \in hp} (n_j + F n_j)C_j$$

$$w_m^{0+}(4) = 68,95 + (7 + 7) * 13,87 + 5 * 13,79 = 332,08$$

Dado que $w_m^{0+}(4) \neq w_m^0(4)$ então as iterações em $w_m(4)$ devem continuar com valor $w_m^{0+}(4) = w_m^1(4) = 332,08\mu s$.

Para a tarefas com prioridade 7 e 5 o parâmetro F_J continua com o mesmo valor ($F_1 = 1$ e $F_2 = 0$, respectivamente). Assim:

$$w_m^{1+}(4) = (4 + 1)C_m + \sum_{\forall j \in hp} (n_j + F n_j)C_j$$

$$w_m^{1+}(4) = 68,95 + (7 + 7) * 13,87 + 5 * 13,79 = 332,08$$

Dado que $w_m^{1+}(4) = w_m^1(4)$ então as iterações em $w_m(4)$ param com valor de **332,08 μs** .

VI. *Sexta iteração em q.*

Incrementando o valor de \mathbf{q} ($= 5$), e iniciando a iteração em $w_m(5)$ com valor $w_m^0(5) = 332,08$:

$$M_m = \left\lfloor \frac{q}{n_m} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{5}{5} \right\rfloor = 1$$

$$m_m = q - M_m n_m = 5 - 1 * 5 = 0$$

Verifica-se a condição de parada:

$$w_m(5) \leq m_m t_m + M_m T_m - J_m \text{ porque } 332,08 < M_m T_m - J_m$$

Percebe-se que não é possível continuar com as iterações em $w_m(5)$ portanto o tempo de resposta é computado utilizando o valor de $w_m^{-1}(4) = 332,08 \mu\text{s}$:

$$R_m = \max_{q=0,1,2,3,4} (w_m(q) + J_m) = 332,08 + 1 = 333,08 \mu\text{s}$$

Finalmente, é importante salientar que o tempo de resposta (R_m) é calculado desde o momento em que a mensagem analisada chega ao buffer de saída do *switch* até o momento em que esta mensagem é completamente transmitida para o seu destino. Portanto, para calcular o tempo de transmissão fim a fim (EtE) é preciso adicionar ao R_m o tempo de transmissão da mensagem desde a sua fonte até o *switch*, ou seja deve ser adicionado o valor do parâmetro C_m . Assim, para a mensagem com prioridade 4, o índice de desempenho EtE no contexto do estudo de caso T1-1 aumentado seria $333,08 + 13,79 = 346,87 \mu\text{s}$. Este valor é igual ao valor registrado no Quadro 27 e muito próximo do valor achado por simulação (diferença relativa de 3,7%).