

Ivan Donisete Lonel

**Desenvolvimento de um Sistema Preditivo de  
Tráfego para Redes de Relés Digitais de  
Proteção Sob o Uso do Padrão IEC 61850**

**São Carlos**

**2015**



Ivan Donisete Lonel

**Desenvolvimento de um Sistema Preditivo de Tráfego  
para Redes de Relés Digitais de Proteção Sob o Uso do  
Padrão IEC 61850**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro de Computação.

Universidade de São Paulo – USP  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Orientador: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

São Carlos  
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

L847d

Lonel, Ivan Donisete  
Desenvolvimento de um Sistema Preditivo de Tráfego  
para Redes de Relés Digitais de Proteção Sob o Uso do  
Padrão IEC 61850 / Ivan Donisete Lonel; orientador  
Denis Vinicius Coury. São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia de Computação)  
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo, 2015.

1. IEC 61850. 2. Intelligent Electronic Devices. 3.  
Local Area Network. 4. Mensagens GOOSE. 5. Proteção  
Digital. 6. Redes Neurais Artificiais. 7. Sistemas  
Elétricos de Potência. 8. SNMP. I. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nome:** Ivan Donisete Lonel

**Título:** "Desenvolvimento de um sistema preditivo de tráfego para redes de relés digitais de proteção sob o uso do padrão IEC 61850"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido em 06/02/2015.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Titular Denis Vinicius Coury  
Orientador - SEL/EESC/USP

**Resultado:**

APROVADO

Prof. Dr. Mário Oleskovicz  
SEL/EESC/USP

APROVADO

Mestre Rui Bertho Junior  
Doutorando - SEL/EESC/USP

APROVADO

**Coordenador do Curso Interunidades - Engenharia de Computação:**

Prof. Associado Evandro Luís Linhari Rodrigues



*Este trabalho é dedicado aos meus colegas e amigos que  
me ajudaram e estimularam nos momentos difícieis da graduação.*



# Agradecimentos

Dirijo aqui meus sinceros agradecimentos àqueles cujo auxílio foi essencial para a realização do presente trabalho:

- Ao meu orientador, Prof. Titular Denis Vinicius Coury, pela paciência e pelo voto de confiança, além da oportunidade de realização deste trabalho de conclusão de curso.
- Ao amigo e co-orientador de iniciação científica, Dr. Ulisses Chemin Netto, pelo acompanhamento próximo, pelo conhecimento compartilhado, bem como pelos conselhos profissionais e acadêmicos.
- Ao colega Diego de Castro Grillo, pela importante colaboração no trabalho realizado em laboratório.
- A meus pais, José Luiz Lonel e Sueli Aparecida Gritti Lonel, pelo suporte moral, financeiro e emocional, indispensáveis em todas as etapas do caminho que percorri até aqui.



*"Aquele que quebra uma coisa para descobrir o que ela é  
deixou o caminho da sabedoria."*  
*(John Ronald Reuel Tolkien)*



# Resumo

**LONEL, I. D. Desenvolvimento de um Sistema Preditivo de Tráfego para Redes de Relés Digitais de Proteção Sob o Uso do Padrão IEC 61850.** 2015. 104f. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Esta pesquisa aborda o uso do padrão IEC 61850 em sistemas elétricos de potência (SEPs) para o monitoramento do tráfego de mensagens *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) no barramento de *bay* de subestações de energia elétrica (SEs). O objetivo principal foi o desenvolvimento de um sistema preditivo de monitoramento de ocupação de banda baseado na utilização do *Simple Network Management Protocol* (SNMP) e em Redes Neurais Artificiais (RNAs) para monitorar de forma permanente as interfaces de rede de *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) utilizados em um Sistema de Automação de Subestações (SAS). A motivação foi diminuir a influência de anomalias na rede de comunicação do SAS sobre a operação daqueles equipamentos. Tal sistema utiliza um parâmetro de dimensionamento e comparação de desempenho para o tempo de transferência das mensagens GOOSE, obtido de maneira experimental. A partir desse monitoramento preditivo, foram obtidos para o Sistema de Proteção (SP) maior confiabilidade e desempenho, pois qualquer alteração na ocupação da banda dos IEDs pode ser observada, fornecendo subsídios para um melhor acompanhamento do funcionamento da rede de comunicação de dados sobre a qual ele foi estabelecido. Todos os recursos, funcionalidades e dados apresentados no texto são baseados em resultados obtidos através de implementação e ensaios em laboratório, envolvendo uma estrutura laboratorial experimental composta por IEDs, *switches ethernet* gerenciáveis, microcomputador do tipo IBM PC, relógio sincronizador *Global Positioning System* (GPS), cordões de fibra óptica, cabos do tipo par trançado sem blindagem e aplicativos de software.

**Palavras-chave:** IEC 61850, Intelligent Electronic Devices, Local Area Network, Mensagens GOOSE, Proteção Digital, Redes Neurais Artificiais, Sistemas Elétricos de Potência, SNMP.



# Abstract

**LONEL, I. D. Development of a Traffic Predictive System for Digital Protection Relays Networks Under the Use of IEC 61850 Standard.** 2015. 104f. Final Paper - Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

This research addresses the use of IEC 61850 standard in electric power systems for monitoring Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE) messages traffic in the bay bus of electricity substations. The main goal was developing a predictive bandwidth occupancy monitoring system based on utilization of the Simple Network Management Protocol (SNMP) and Artificial Neural Networks (ANNs) to constantly monitor the network interfaces of the Intelligent Electronic Devices (IEDs) used in a Substation Automation System (SAS). The motivation was to reduce the influence of defects in the SAS communication network on the operation of such equipment. This system makes use of a parameter obtained experimentally for dimensioning and comparing the performance of transfer times of GOOSE messages. From that predictive monitoring, greater reliability and performance were obtained for the protection system, since any change in bandwidth occupancy of the IEDs can be observed, providing support for better monitoring the operation of the data communication network on which it was established. All features, functionality and data presented in this text are based on results obtained through implementation and testing in laboratory, involving an experimental laboratorial structure composed of IEDs, manageable ethernet switches, IBM PC computer, Global Positioning System (GPS) synchronizer clock, optical fiber strands, unshielded twisted pair cables and software applications.

**Keywords:** IEC 61850, Intelligent Electronic Devices, Local Area Network, GOOSE Messages, Digital Protection, Artificial Neural Networks, Electric Power Systems, SNMP.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Níveis hierárquicos para o SAS. . . . .	28
Figura 2 – Representação para o neurônio artificial. . . . .	31
Figura 3 – Funções de ativação. . . . .	32
Figura 4 – Rede Neural Artificial. Fonte: Rao (1995). . . . .	34
Figura 5 – Topologia para a TDNN. Fonte: da Silva et al. (2010) . . . . .	36
Figura 6 – Fluxograma da etapa experimental. Fonte: Netto (2012) . . . . .	39
Figura 7 – Aparato experimental. Fonte: Netto (2012) . . . . .	41
Figura 8 – Esquema de ensaio utilizado. Fonte: Netto (2012) . . . . .	44
Figura 9 – Exemplo de tráfego extra para 85% da ocupação de banda, obtido durante os ensaios. Fonte: Netto (2012) . . . . .	46
Figura 10 – Lógica digital para geração de mensagens GOOSE. Fonte: Netto (2012) . . . . .	48
Figura 11 – Saída da lógica desenvolvida. Fonte: Netto (2012) . . . . .	48
Figura 12 – Representação esquemática para o aplicativo de análise dos dados. Fonte: Netto (2012) . . . . .	51
Figura 13 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 0. Fonte: Netto (2012) . . . . .	52
Figura 14 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 0. Fonte: Netto (2012) . . . . .	53
Figura 15 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 0. Fonte: Netto (2012) . . . . .	54
Figura 16 – Concepção para o sistema preditivo de banda. Fonte: Netto (2012) . . . . .	59
Figura 17 – Janelamento da série temporal para apresentação à RNA. . . . .	61
Figura 18 – Esquema laboratorial utilizado. Fonte: Netto (2012) . . . . .	62
Figura 19 – Formação dos conjuntos de treinamento e teste para a RNA. Fonte: Netto (2012) . . . . .	63
Figura 20 – Montagem Conjuntos Treinamento/Teste. Fonte: Netto (2012) . . . . .	64
Figura 21 – Representação para a separação dos valores que compõe os conjuntos de treinamento/teste. Fonte: Netto (2012) . . . . .	65
Figura 22 – Topologia para a RNA utilizada. Fonte: Netto (2012) . . . . .	66
Figura 23 – Exemplo de relatório de ocorrência. Fonte: Netto (2012) . . . . .	67
Figura 24 – Resultado da predição para todo o conjunto de teste. Fonte: Netto (2012) . . . . .	69
Figura 25 – Histograma para o erro relativo percentual da predição de banda para todo o conjunto de teste. Fonte: Netto (2012) . . . . .	69
Figura 26 – Resultado da predição para 35% de ocupação de banda. Fonte: Netto (2012) . . . . .	70

Figura 27 – Histograma para o erro relativo percentual referente a predição de 35% de ocupação de banda. Fonte: Netto (2012) . . . . .	70
Figura 28 – Tela inicial para o sistema desenvolvido. Fonte: Netto (2012) . . . . .	72
Figura 29 – Seleção do agente a ser monitorado. Fonte: Netto (2012) . . . . .	72
Figura 30 – Seleção da interface a ser monitorada. Fonte: Netto (2012) . . . . .	73
Figura 31 – Medição da interface monitorada. Fonte: Netto (2012) . . . . .	74
Figura 32 – Predição para a interface monitorada. Fonte: Netto (2012) . . . . .	74
Figura 33 – Inserção do parâmetro de dimensionamento. Fonte: Netto (2012) . .	75
Figura 34 – Monitoramento na região de operação 2. Fonte: Netto (2012) . . . . .	75
Figura 35 – Gravação de dados pelo usuário. Fonte: Netto (2012) . . . . .	76
Figura 36 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 1. Fonte: Netto (2012) . . . . .	87
Figura 37 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 1. Fonte: Netto (2012) . . . . .	88
Figura 38 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 1. Fonte: Netto (2012) . . .	89
Figura 39 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 2. Fonte: Netto (2012) . . . . .	90
Figura 40 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 2. Fonte: Netto (2012) . . . . .	90
Figura 41 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 2. Fonte: Netto (2012) . . .	91
Figura 42 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 3. Fonte: Netto (2012) . . . . .	92
Figura 43 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 3. Fonte: Netto (2012) . . . . .	92
Figura 44 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 3. Fonte: Netto (2012) . . .	93
Figura 45 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 4. Fonte: Netto (2012) . . . . .	94
Figura 46 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 4. Fonte: Netto (2012) . . . . .	95
Figura 47 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 4. Fonte: Netto (2012) . . .	95
Figura 48 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 5. Fonte: Netto (2012) . . . . .	96
Figura 49 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 5. Fonte: Netto (2012) . . . . .	97
Figura 50 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 5. Fonte: Netto (2012) . . .	97
Figura 51 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 6. Fonte: Netto (2012) . . . . .	98
Figura 52 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 6. Fonte: Netto (2012) . . . . .	99

Figura 53 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 6. Fonte: Netto (2012) . . .	100
Figura 54 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 7. Fonte: Netto (2012) . . . . .	100
Figura 55 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 7. Fonte: Netto (2012) . . . . .	101
Figura 56 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 7. Fonte: Netto (2012) . . .	102



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de configuração aplicados ao esquema de ensaio. . . . .	44
Tabela 2 – Ajuste dos Pesos no mecanismo de QoS. . . . .	45
Tabela 3 – Patamares ocupação banda IED. . . . .	46
Tabela 4 – Ajuste dos pesos no mecanismo de QoS. . . . .	50
Tabela 5 – Comparação entre os resultados para cada perfil caracterizado (Re- gião I). . . . .	54
Tabela 6 – Comparação entre os resultados para cada perfil caracterizado (Re- gião II). . . . .	55
Tabela 7 – Comparação da ocupação percentual de banda nominal (BN). . . . .	68
Tabela 8 – Percentual de acerto da predição. . . . .	68



# Lista de abreviaturas e siglas

BE	Barramento de Estação
BNC	<i>Bayonet Neil Concelman</i>
BP	Barramento de Processo
DDR	<i>Double Data Rate</i>
DoS	<i>Denial of Service</i>
GGIO	<i>Generic Function References, Generic Process I/O</i>
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSE	<i>Generic Substation Events</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IHM	Interface Homem Máquina
IP	<i>Internet Protocol</i>
IRIG	<i>Inter Range Instrumentation Group</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
MIB	<i>Management Information Base</i>
MMS	<i>Manufacturing Messaging Specification</i>
NL	Nó Lógico
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>

PIT	Programa de Inspeção e Ensaio
PMC	Perceptron Multicamadas
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RBF	<i>Radial Basis Function</i>
RFC	<i>Request for Comments</i>
RNA	Rede Neural Artificial
Rprop	<i>Resilient-Propagation</i>
RSE	Registro Sequencial de Eventos
SAS	Sistema de Automação de Substações
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SE	Subestação de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SG	<i>Smart Grid</i>
SP	Sistema de Proteção
TC	Transformador de Corrente
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDNN	<i>Time Delay Neural Network</i>
TP	Transformador de Potência
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
UCA	<i>Utility Communications Architecture</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
VLAN	<i>Virtual LAN</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>25</b>
1.1	Objetivos da Pesquisa	25
1.2	Contribuições da pesquisa	26
1.3	Organização do texto	26
<b>2</b>	<b>Aspectos Conceituais Importantes</b>	<b>27</b>
2.1	<i>Intelligent Electronic Device</i>	27
2.2	O Padrão IEC 61850	27
2.3	<i>Simple Network Management Protocol</i>	29
2.4	Séries Temporais	30
2.5	Redes Neurais Artificiais	31
2.5.1	Arquitetura e Topologia da RNA	34
2.5.2	Processo de Treinamento	35
2.5.3	Rede PMC com Entradas Atrasadas no Tempo	36
<b>3</b>	<b>Metodologia experimental</b>	<b>39</b>
3.1	Fluxograma de Trabalho	39
3.2	Análise Experimental das Mensagens GOOSE	41
3.2.1	Configuração Lógica e Aparato Experimental	43
3.2.2	Execução dos Ensaios	45
3.3	Resultados e Discussões Referentes à Porção Experimental do Trabalho	50
3.3.1	Resultados para o Perfil Zero	50
3.3.2	Comentários Finais	53
<b>4</b>	<b>Sistema Preditivo de Monitoramento de Banda</b>	<b>57</b>
4.1	Introdução	57
4.2	Sistema Preditivo Desenvolvido	57
4.2.1	Medição de Tráfego e Cálculo da Banda Utilizada	58
4.2.2	Predição da Ocupação de Banda	60
4.2.3	Registro de Ocorrência	66
4.3	Resultados e Discussões	67
4.3.1	Medição e Cálculo do Percentual de Ocupação de Banda	67
4.3.2	Predição do Percentual de Ocupação de Banda	68
4.4	Interface Gráfica	71
4.5	Comentários Finais	76
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>79</b>
5.1	Comentários Finais Sobre o Parâmetro de Dimensionamento	79
5.2	Comentários Finais sobre o Sistema Preditivo	80
5.3	Continuidade da Pesquisa	81

<b>6 Referências Bibliográficas</b>	<b>83</b>
<b>A Análise Experimental: Perfis 1 a 7</b>	<b>87</b>
A.1 Resultados para o Perfil 1	87
A.2 Resultados para o Perfil 2	88
A.3 Resultados para o Perfil 3	91
A.4 Resultados para o Perfil 4	93
A.5 Resultados para o Perfil 5	94
A.6 Resultados para o Perfil 6	98
A.7 Resultados para o Perfil 7	99

# 1 Introdução

Subestações de energia elétrica projetadas no passado faziam uso de sistemas de proteção e controle implementados com dispositivos eletromecânicos ou estáticos de função única e relés de lógica baseada apenas em *hardware*. Funções de Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) eram centralizadas e limitadas a monitorar cargas de circuitos, tensão de barramentos, alarmes agregados, controle de disjuntores e comutadores etc. Gravação de distúrbios e dados de sequência de eventos, quando existentes, eram centralizados e locais à subestação (Kasztenny et al, 2006).

Com o advento dos IEDs (Intelligent Electronic Devices) multifuncionais baseados em microprocessadores veio a possibilidade de integrar mais funcionalidades em um único dispositivo, resultando em projetos mais simples com cabeamento reduzido. Além disso, devido à capacidade de comunicação dos IEDs, mais informação pôde ser disponibilizada remotamente, resultando em menos visitas à subestação (Kasztenny et al, 2006).

Os elementos que compõem a *Local Area Network* (LAN) da Subestação de Energia Elétrica (SE), bem como suas configurações, afetam diretamente seu desempenho e confiabilidade (Chelluri et al., 2010; Sidhu et al., 2008). Dessa forma, a afirmação anterior se torna objeto de maior preocupação em relação ao funcionamento global da SE, particularmente no que se refere ao Sistema de Proteção (SP), pois, é preciso assegurar que as funções que o compõe atuarão corretamente quando forem necessárias (Blackburn e Domin, 2007; Elmore, 2004).

Existem na literatura registros que mostram que uma rede de IEDs utilizando o padrão IEC 61850 pode ter seu desempenho e confiabilidade comprometidos em função das condições de tráfego e configuração estabelecidas (Sidhu e Yin, 2007; Sidhu et al., 2008; Kanabar e Sidhu, 2010; Sidhu et al., 2010).

## 1.1 Objetivos da Pesquisa

Dado esse problema, este trabalho busca viabilizar o desenvolvimento de um sistema preditivo de monitoramento de tráfego para o barramento de bay de um Sistema de Automação de Subestações (SAS) composto por IEDs, para que, futuramente, seja possível tomar medidas corretivas automaticamente, antes de ocorrerem maiores problemas ao SE.

## 1.2 Contribuições da pesquisa

Os resultados obtidos devem ser de considerável utilidade a engenheiros, técnicos e pesquisadores da área de proteção e automação de sistemas de energia elétrica, para que possam, a partir da informação de um problema na rede de comunicação de dados, automatizar a tomada de decisão sobre medidas corretivas para minimizar os problemas sobre o sistema de proteção em condições críticas de operação.

## 1.3 Organização do texto

Em sua totalidade, este texto é composto por cinco capítulos, os quais serão brevemente apresentados a seguir.

No Capítulo 2, denominado “Revisão Bibliográfica”, é feita uma contextualização teórica do assunto tratado, oferecendo ao leitor um breve aprofundamento nos conceitos de IEDs, o padrão IEC 61850, o protocolo SNMP, séries temporais e RNAs (Redes Neurais Artificiais).

No Capítulo 3, “Metodologia Experimental”, é descrito o arranjo laboratorial utilizado para estabelecer um parâmetro de dimensionamento e comparação de desempenho para o tempo de transferência das mensagens GOOSE entre IEDs.

No Capítulo 4, “Sistema Preditivo de Monitoramento de Banda”, é apresentada a concepção de um sistema computacional desenvolvido para monitorar de forma permanente a ocupação percentual da banda de comunicação dos IEDs.

Finalmente, no Capítulo 5, “Conclusões”, são apresentadas as principais conclusões sobre os resultados e os pontos de continuidade para a pesquisa.

## 2 Aspectos Conceituais Importantes

### 2.1 *Intelligent Electronic Device*

Como parte integrante das novas soluções que a Norma IEC 61850 apresenta, os IEDs representam uma esfera de importância substancial para a realização de automação de subestações de forma distribuída. Advindos basicamente dos conhecidos relés de proteção, são unidades multifuncionais para a proteção, controle, medição e monitoramento de sistemas elétricos, permitindo ainda a concepção de lógicas de bloqueio e de intertravamentos, tanto de maneira integrada – todas as funcionalidades em uma mesma caixa – quanto distribuída – diferentes funcionalidades realizadas em diferentes IEDs. Neste contexto, a Norma IEC 61850 prevê a livre alocação de funções, em que as funcionalidades necessárias para o correto funcionamento de uma planta podem estar alocadas em um ou diversos IEDs (dos Santos et al, 2009).

Estes dispositivos de tecnologia microprocessada possibilitam diferentes tipos de interface com o usuário, sendo a comunicação remota a mais importante delas. Particularmente no caso da aplicação da Norma IEC61850 a interface atual de comunicação é apresentada através de portas de comunicação em TCP/IP, permitindo que os IEDs possam usufruir de todos os benefícios que esta tecnologia possui. Neste caso, cada IED, ou porta de comunicação deste IED, apresenta um endereçamento IP que possibilita que este equipamento possa trocar informações em um ambiente de rede *Ethernet*. Cabe ressaltar, neste momento, que a Norma não especifica o tipo de interface física (*Link Layer*) que deve ser usado, mas sim do ambiente da aplicação. (dos Santos et al, 2009).

### 2.2 O Padrão IEC 61850

As demandas por desempenho, qualidade técnica, satisfação dos clientes e lucro, por exemplo, apresentam-se como elementos motivadores para a digitalização de SEs. Para que tais demandas sejam satisfeitas é necessário que uma grande quantidade de informações sejam adquiridas e processadas pelo SAS. Para que tal volume seja utilizado de forma ágil e confiável é necessário que uma rede de comunicação de dados seja aplicada para esse fim. A existência de várias regras, proprietárias ou não, para comunicação de dados, ou seja, protocolos de comunicação, estabelece um problema para integração destes equipamentos no âmbito do SAS (Netto, 2012).

Um dos principais objetivos da norma internacional IEC 61850 é o de garantir

a interoperabilidade entre IEDs de diferentes fabricantes, permitindo o uso e a troca irrestrita de dados a fim de que sejam realizadas suas funcionalidades dedicadas individualmente. Assim, por interoperabilidade, entende-se a habilidade de dois ou mais IEDs de um mesmo fabricante, ou de fabricantes diferentes, de trocar informações e usar estas informações para uma correta cooperação. Tal necessidade surge basicamente da dificuldade encontrada nos processos de integração de informações durante as diferentes etapas de implementação na automação de subestações, principalmente quando dispositivos distintos, frequentemente de diferentes fornecedores, devem ser integrados. A norma IEC 61850 surge, então, como um requisito de mercado, sendo baseada em fortes argumentos de funcionalidades comprovadas, evolução tecnológica, especificações de clientes e de métodos de engenharia disponibilizados pelos fabricantes (dos Santos et al., 2009).

Nessa nova concepção de SE, a rede de comunicação de dados aplicada é do tipo LAN e está disposta em três níveis hierárquicos do SAS, a saber: processo, *bay* e estação, conforme a representação simplificada apresentada na Figura 1 (Olifer e Olifer, 2006; Schumacher et al., 2007; Rodrigues, 2005).

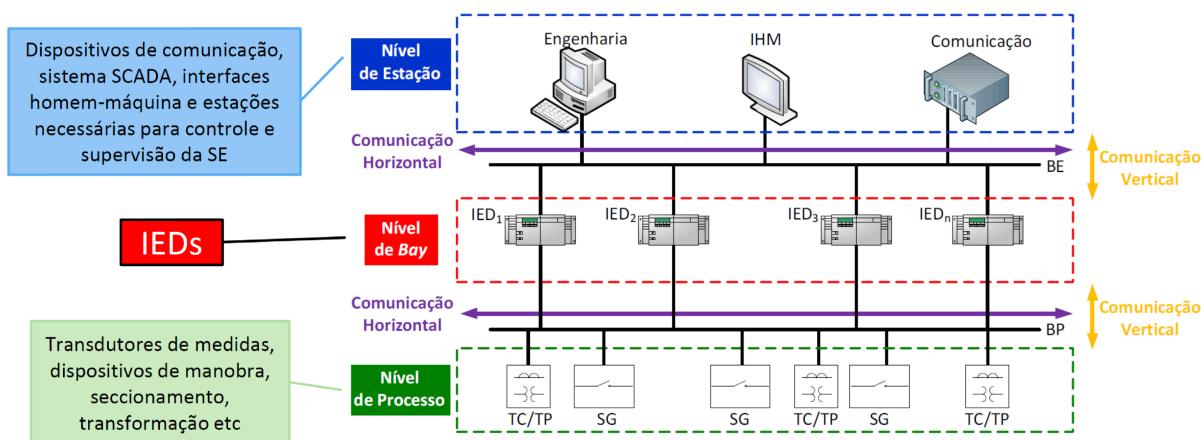


Figura 1 – Níveis hierárquicos para o SAS.

O nível de *bay* contém os IEDs existentes na SE, os quais recebem informações do nível de processo por meio do Barramento de Processo (BP) e trocam informações entre si pelo Barramento de Estação (BE). Ambos estão definidos nas partes 8.1 e 9.2 do padrão IEC 61850, respectivamente (Kaneda et al., 2008; IEC, 2004b,c). No nível de processo, estão ilustrados Transformadores de Corrente (TC), Transformadores de Potencia (TP) e *Smart Grids* (SG).

## 2.3 Simple Network Management Protocol

O SNMP (Simple Network Management Protocol), definido pela RFC 1157, é um protocolo executado na camada de aplicação do modelo OSI, sobre tecnologia TCP/IP<sup>1</sup>, a partir do qual variáveis de rede podem ser obtidas e modificadas, tornando possível realizar operações de monitoramento e manutenção em uma rede (Forouzan, 2007; Case et al., 1990, 1989). Ele é largamente utilizado por fabricantes de *hardware* e *software*, tornando-se uma solução comum para a gerência de redes (Case et al., 1990). O SNMP suporta uma variada gama de utilizações, tais como os gerenciamentos de falha, configuração, segurança e contabilização (Case et al., 1989).

Esse protocolo utiliza o conceito de gerente e agente, no qual o gerente controla e monitora os agentes. O gerente é responsável por inquirir o agente e recuperar as informações que esse tem disponível para uso (Jiangyi e Yan, 2009).

O protocolo SNMP possui três versões, SNMPv1, SNMPv2 e SNMPv3 que coexistem, sendo que a diferença básica entre elas reside em implementações de segurança e aprimoramento de funções. Independentemente da versão, os componentes básicos do SNMP são o sistema de gerenciamento de rede, o agente, e a base de informações de gerenciamento (MIB - *Management Information Base*) (Chavan et al., 2008). O primeiro é responsável por prover a interface entre o gestor da rede e o sistema de gestão. O segundo, por fornecer as informações de interesse ao gestor. E o último, por conter e formatar as informações a serem enviadas.

A comunicação entre o sistema de gerenciamento de rede e o agente é realizada pelo protocolo da camada de transporte UDP (*User Datagram Protocol*) através das portas<sup>2</sup> 161 e 162 (Netto, 2012). O protocolo UDP, assim como o TCP, pertence à camada de transporte do modelo OSI. Porém, o UDP não é confiável: caso garantias de entrega dos pacotes sejam necessárias, é preciso implementar uma série de estruturas de controle, tais como *timeouts*, retransmissões, *acknowledgments*, controle de fluxo, etc. Cada datagrama (pacote de dados UDP) tem um tamanho e pode ser considerado como um registro indivisível, diferentemente do TCP, que é um protocolo orientado a fluxos de *bytes* sem início e sem fim (Ferreira, 2008).

<sup>1</sup> O TCP/IP é um conjunto de protocolos de comunicação entre computadores em rede. Seu nome vem de dois protocolos: o TCP (*Transmission Control Protocol* - Protocolo de Controle de Transmissão) e o IP (*Internet Protocol* - Protocolo de Internet). O conjunto de protocolos baseia-se no modelo de camadas (Modelo OSI - *Open Systems Interconnection*), onde cada camada é responsável por um grupo de tarefas, fornecendo um conjunto de serviços bem definidos para o protocolo da camada superior. De um total de 7 camadas, a de mais alto nível (mais próxima do usuário) é a camada de aplicação, sendo a camada física a de mais baixo nível.

<sup>2</sup> Portas são estruturas de *software* que servem como pontos extremos de comunicação entre processos ou aplicações em um sistema operacional. O objetivo das portas é identificar diferentes aplicativos ou processos em execução em um único computador e, assim, permitir que eles compartilhem uma única conexão física com uma rede de comutação de pacotes, como a *Internet*.

## 2.4 Séries Temporais

Um sistema variante no tempo, em geral, é estocástico e não-linear, não havendo, portanto, um modelo matemático que descreva seu comportamento. Dessa forma, séries temporais podem ser utilizadas para representar eventos que são dependentes do tempo (da Silva Soares, 2008).

Uma série temporal consiste em um conjunto de medidas, tomadas de forma discreta e equidistante ao longo do tempo, que descrevem o comportamento dinâmico e variante no tempo de um sistema qualquer, como, por exemplo, o tráfego em uma rede de comunicação de dados, o valor de títulos financeiros ou o valor de demanda em um alimentador (da Silva et al., 2010). Assim, pode-se utilizar uma série temporal representando os valores instantâneos de ocupação de banda em uma rede de comunicação de dados como entrada de uma rede neural atrasada no tempo (TDNN), como descrito na seção 2.5.3.

Uma série temporal pode ser descrita conforme apresentado na Equação 2.1 (Morettin e de Castro Toloi, 2006):

$$x(t) = x(t) \in \Re | t = 1, 2, 3 \dots N \quad (2.1)$$

para a qual  $t$  é índice da amostra e  $N$  é o número de amostras.

Associada à série temporal existem dois parâmetros de interesse. O horizonte de previsão, que representa um valor futuro da série, por exemplo,  $t + h$ , dadas  $t$ -n observações prévias, e a janela de previsão, que representa a quantidade de elementos prévios utilizados no processo de previsão (Silva et al., 2007).

Dessa forma, a utilização de um modelo não linear, como uma RNA, é adequado para a tarefa de predição de uma série temporal, devido a sua capacidade de aprendizado a partir de exemplos e generalização, tornando-se capaz de fornecer uma resposta coerente a partir de qualquer sinal de entrada fornecido (da Silva et al., 2010; da Silva Soares, 2008; Mandic e Chambers, 2001).

A predição dos valores futuros de uma série temporal pode ser feita por meio de seus valores passados, como pode ser visto na Equação 2.2 (da Silva et al., 2010):

$$x(t) = f(x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n_p)) \quad (2.2)$$

para a qual  $n_p$  representa a quantidade de elementos passados necessários para realizar a predição do próximo valor de  $x(t)$ .

Baseada nessa premissa, uma rede Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC) do tipo *Time Delay Neural Network* (TDNN) concentrada é uma arquitetura pertinente para resolver esse tipo de problema (da Silva et al., 2010; Haykin, 2001).

## 2.5 Redes Neurais Artificiais

As RNAs, segundo Haykin (2001), representam um conjunto de processamento distribuído e paralelo constituído por unidades singelas de processamento, as quais possuem a característica intrínseca de armazenar conhecimento a partir de experiências e torná-lo disponível para uso. Essa estrutura se assemelha ao cérebro, pois o conhecimento é adquirido pela rede a partir do ambiente, através de um processo de aprendizado, sendo armazenado através de interconexões chamadas de pesos sinápticos.

O modelo matemático do neurônio artificial foi baseado no funcionamento do neurônio biológico, apresentando funções e arquitetura cognitiva parecidas (Rao, 1995; Mcculloch e Pitts, 1943). O modelo apresentado por Mcculloch e Pitts (1943) continua sendo o mais utilizado em diferentes arquiteturas de RNAs (da Silva et al., 2010). A Figura 2 ilustra o neurônio artificial, onde:  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  são as entradas do neurônio;  $(w_1, w_2, \dots, w_n)$  são os pesos associados às entradas e  $(y)$  é a saída do neurônio.

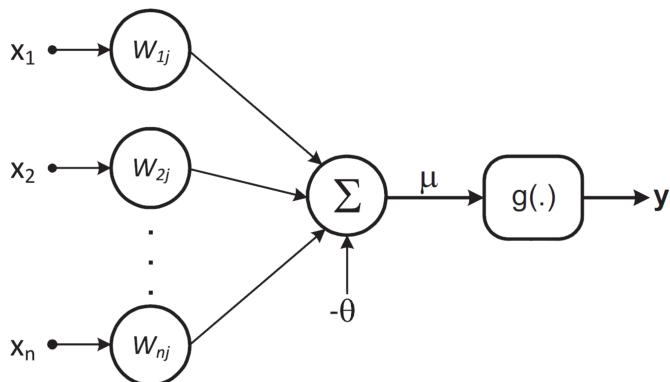


Figura 2 – Representação para o neurônio artificial.

Esta modelagem representa um discriminador linear, o qual é definido pela seguinte expressão (Dillon e Niebur, 1996; Kovács, 1996):

$$y = g\left(\sum_{k=1}^n w_k x_k - \theta\right) = g(\mu) \quad (2.3)$$

para a qual  $k$  é o número da entrada,  $w_k$  é o peso sináptico associado a  $k$ ,  $\theta$  é o limiar de ativação,  $x_k$  é a entrada e  $g(\cdot)$  é a função de ativação do neurônio. Essa função pode ser considerada como a função de transferência do neurônio (Dillon e Niebur, 1996), na qual o conjunto de entradas é transformado em um estado de ativação.

O funcionamento do neurônio artificial pode ser resumido da seguinte forma (Netto, 2012):

1. As variáveis do processo são apresentadas às entradas da rede;

2. Em seguida, essas são multiplicadas pelo peso correspondente. Esse produto indica a sua influência na saída da unidade;
3. Faz-se a soma ponderada de todos os sinais de entrada para produzir um nível de ativação;
4. Se este nível exceder o limiar definido, a unidade produz uma saída.

A Figura 3 ilustra as funções de ativação mais utilizadas (Haykin, 2001), lembrando que para cada tipo de problema há uma função de ativação mais indicada (da Silva et al., 2010).

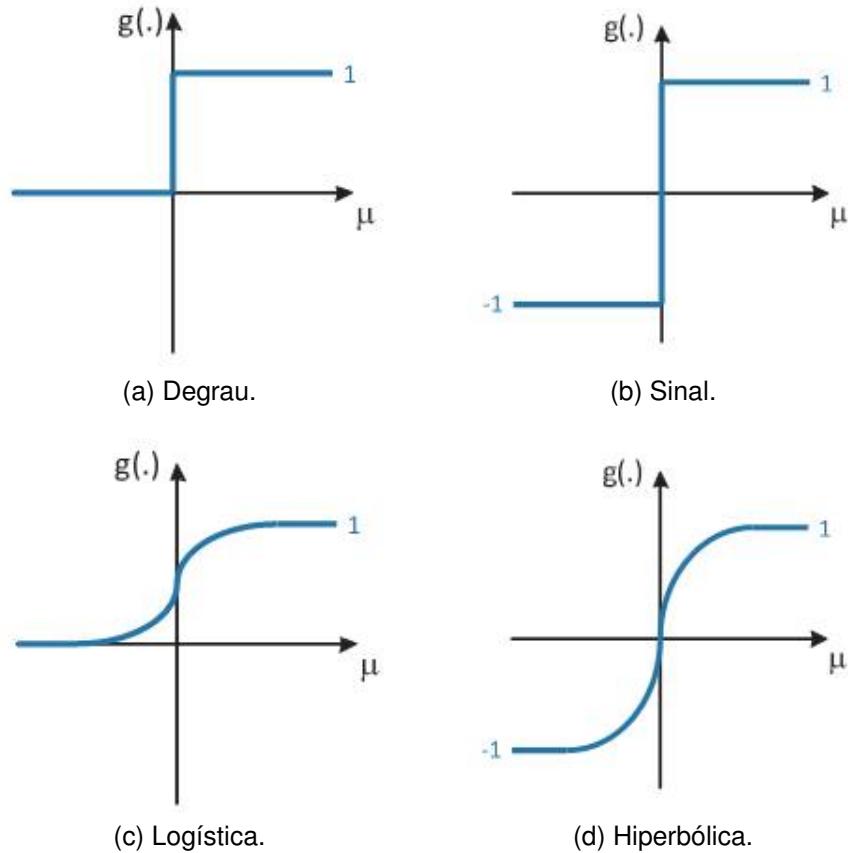


Figura 3 – Funções de ativação.

Segundo da Silva et al. (2010), as principais características das RNAs são:

- Adaptação por experiência - os parâmetros internos da rede são ajustados a partir da apresentação sucessiva de exemplos vindos do ambiente na qual ela será aplicada, o que possibilita extrair o conhecimento de tal processo;
- Capacidade de aprendizado - através de um método de treinamento o conhecimento necessário ao entendimento de uma aplicação é obtido pela RNA;

- Habilidade de generalização - concluída a etapa de treinamento, a rede é capaz de fornecer novas soluções a partir da generalização do conhecimento adquirido na fase de treinamento;
- Organização de dados - a partir de um conjunto de dados que representa um processo qualquer, a rede é capaz de se organizar de forma a agrupar padrões que representem alguma particularidade dos dados de entrada;
- Tolerância a falhas - por ser formada por um grande conjunto de unidades discretas de processamento (neurônios), e estes possuírem várias conexões com outras unidades, se houver uma falha em qualquer porção da rede, esta continua operando;
- Armazenamento distribuído - o conhecimento sobre um processo qualquer é distribuído por toda a arquitetura da rede devido ao grande número de interconexões entre unidades de processamento existentes;
- Facilidade de prototipagem - findo o processo de treinamento, e para a maioria das arquiteturas de RNAs, os resultados da rede são normalmente obtidos através de operações matemáticas elementares, o que facilita sua implementação tanto em *hardware* quanto em *software*.

Por serem capazes de mapear sistemas não lineares, as RNAs são utilizadas em várias áreas do conhecimento para a resolução de diversos problemas, como, por exemplo, na área médica para prever e classificar canceres a partir do perfil genético do paciente, na química para obtenção de novos compostos poliméricos, na biologia para identificação e classificação de espécies animais, na área de finanças, para a predição de valores de ações (da Silva et al., 2010).

Em relação às engenharias e ciências, conforme apontado por da Silva et al. (2010), as RNAs podem ser utilizadas como um aproximador universal de funções, no controle de processos, reconhecimento e classificação de padrões, no agrupamento de dados, em sistemas de previsão, na otimização de sistemas e em memórias associativas.

Para o SEP, as RNAs podem ser utilizadas, por exemplo, na estimação de grandezas elétricas, como a frequência, no despacho de potência, na identificação e localização de faltas, na classificação de transitórios referentes à Qualidade da Energia Elétrica (QEE) e previsão de cargas em diversos horizontes de planejamento, dentre outros (Netto, 2012).

Neste trabalho, uma RNA é utilizada para, a partir de um conjunto de treinamento extraído de medidas feitas em laboratório, obter-se uma generalização que permita

a uma aplicação de *software* predizer um valor de ocupação de banda na rede de comunicação de dados de uma subestação de energia elétrica, utilizando como entrada os valores mais recentes de ocupação de banda medidos nesta rede.

### 2.5.1 Arquitetura e Topologia da RNA

A disposição dos neurônios, uns em relação aos outros, suas conexões sinápticas e a forma pela qual a rede é treinada definem sua arquitetura (da Silva et al., 2010; Haykin, 2001). Já a topologia da rede representa, para uma determinada arquitetura, as diferentes formas de composição desta, ou seja, seu número de camadas, de neurônios, tipo de função de ativação, etc. (da Silva et al., 2010).

Basicamente, a arquitetura de uma RNA é composta pela camada de entrada, responsável pelo recebimento das informações advindas do processo, camadas escondidas, compostas pelos neurônios e responsáveis por extrair o conhecimento do processo em estudo e, por fim, a camada de saída, também composta por neurônios e responsável por apresentar o resultado final da rede, conforme a Figura 4 (da Silva et al., 2010; Rao, 1995).

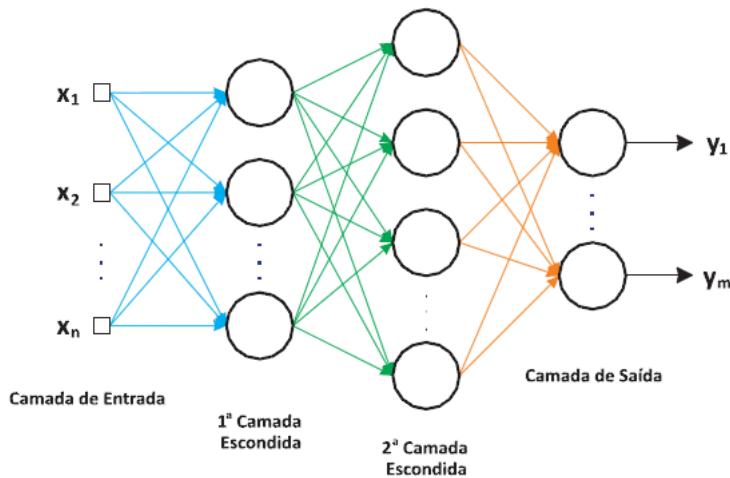


Figura 4 – Rede Neural Artificial. Fonte: Rao (1995).

Conforme apontado por da Silva et al. (2010); Haykin (2001), as principais arquiteturas de redes neurais artificiais são:

- Redes *feedforward* de camada simples - existe apenas uma camada de entrada e uma camada neural de saída. O fluxo da informação é unidirecional à saída, sendo as redes Perceptron e Adaline exemplos desta arquitetura;
- Redes *feedforward* de múltiplas camadas - a principal diferença desta arquitetura para a anterior reside no fato de que esta possui uma ou mais camadas

escondidas de neurônios. As arquiteturas PMC e Radial Basis Function (RBF) são exemplos desse tipo de rede;

- Redes recorrentes - neste tipo de arquitetura, a saída dos neurônios da última camada é realimentada em neurônios de camadas anteriores. A rede de Hopfield é um exemplo dessa arquitetura;
- Redes reticuladas - são arquiteturas nas quais a disposição espacial dos neurônios está relacionada ao processo de ajuste de seus pesos e limiares. A rede de Kohonen é um exemplo deste tipo de arquitetura.

### 2.5.2 Processo de Treinamento

Segundo Haykin (2001), “Treinamento ou aprendizagem é o processo pelo qual os parâmetros livres da rede neural são adaptados através de um processo contínuo de estímulo pelo ambiente no qual a rede está envolvida. O tipo de aprendizagem é determinado pela maneira em que a alteração dos parâmetros é realizada” .

O processo de aprendizagem é realizado por um conjunto de passos ordenados comumente chamado de algoritmo de treinamento. Ao término desse processo, a RNA será capaz de extrair conhecimento a partir do conjunto de informações fornecidas que representam o processo ao qual essa será aplicada. Em geral, esse conjunto de informações é subdividido em conjunto de treinamento e teste, sendo o primeiro aplicado no processo de aprendizado da rede, enquanto o segundo serve para verificar a generalização da rede e dessa forma validar a topologia estudada (da Silva et al., 2010).

Em geral, são utilizadas duas abordagens para definir como será efetuado o ajuste das variáveis livres da rede (Dillon e Niebur, 1996):

1. Treinamento baseado nas semelhanças dos padrões de entrada;
2. Treinamento que minimiza o erro entre os valores desejados e os obtidos atualmente pela rede.

A apresentação completa do conjunto de treinamento, utilizada no processo de ajuste dos pesos sinápticos e limiares da RNA é conhecida como época de treinamento (da Silva et al., 2010).

Basicamente existem dois tipos de processos de aprendizagem (da Silva et al., 2010):

- Treinamento supervisionado - consiste na utilização de um conjunto de treinamento formado por vários pares de amostras, para cada variável utilizada, do

tipo entrada/saída desejada para, continuamente, ajustar os pesos das conexões entre neurônios da rede. A rede será considerada ajustada quando a defasagem entre a saída produzida e a saída desejada estiver dentro de um valor especificado, o qual é monitorado pelo algoritmo de treinamento. A regra proposta por Hebb (1949) representa a primeira estratégia para este tipo de treinamento;

- Treinamento não supervisionado - em oposição ao tipo supervisionado, nesta forma de treinamento não existem nos padrões utilizados os pares entrada/saída desejada. Dessa maneira, a rede deve se auto-organizar criando agrupamentos de dados que contenham similaridades, sendo o processo de treinamento encerrado quando o algoritmo correspondente consegue ajustar as variáveis livres da rede de forma a refletir tais agrupamentos.

### 2.5.3 Rede PMC com Entradas Atrasadas no Tempo

Problemas dinâmicos e variantes no tempo, como a predição de um valor futuro de demanda, por exemplo, podem ser resolvidos pelo uso de uma rede PMC com entradas atrasadas no tempo (TDNN) (da Silva et al., 2010).

Uma rede com arquitetura TDNN introduz um atraso de tempo apenas na sua camada de entrada. Tal atraso funciona como uma memória do comportamento no tempo do processo mapeado. A Figura 5 ilustra essa arquitetura (da Silva et al., 2010; Haykin, 2001).

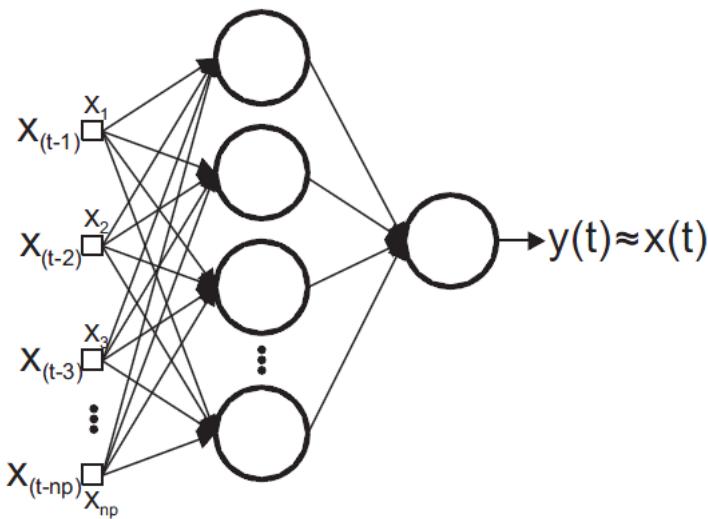


Figura 5 – Topologia para a TDNN. Fonte: da Silva et al. (2010)

onde:  $n_p$  representa a ordem do preditor,  $x(t) = f(x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n_p))$  são as entradas passadas apresentadas a rede que representam o processo em estudo e  $x(t)$  é o próximo valor a ser predito, fornecido pela saída  $y(t)$ . Assim, durante a fase

de treinamento, o ajuste das variáveis livres da rede tem por objetivo minimizar o erro entre  $x(t)$  e  $y(t)$ . O treinamento da TDNN é similar ao da PMC.



# 3 Metodologia experimental

Neste capítulo é descrito o aparato experimental utilizado para estabelecer um parâmetro de dimensionamento e comparação de desempenho para o tempo de transferência das mensagens GOOSE. Além disso, são apresentados os resultados e suas discussões.

## 3.1 Fluxograma de Trabalho

A etapa experimental da pesquisa foi realizada segundo o fluxograma apresentado na Figura 6, que será detalhado a seguir.

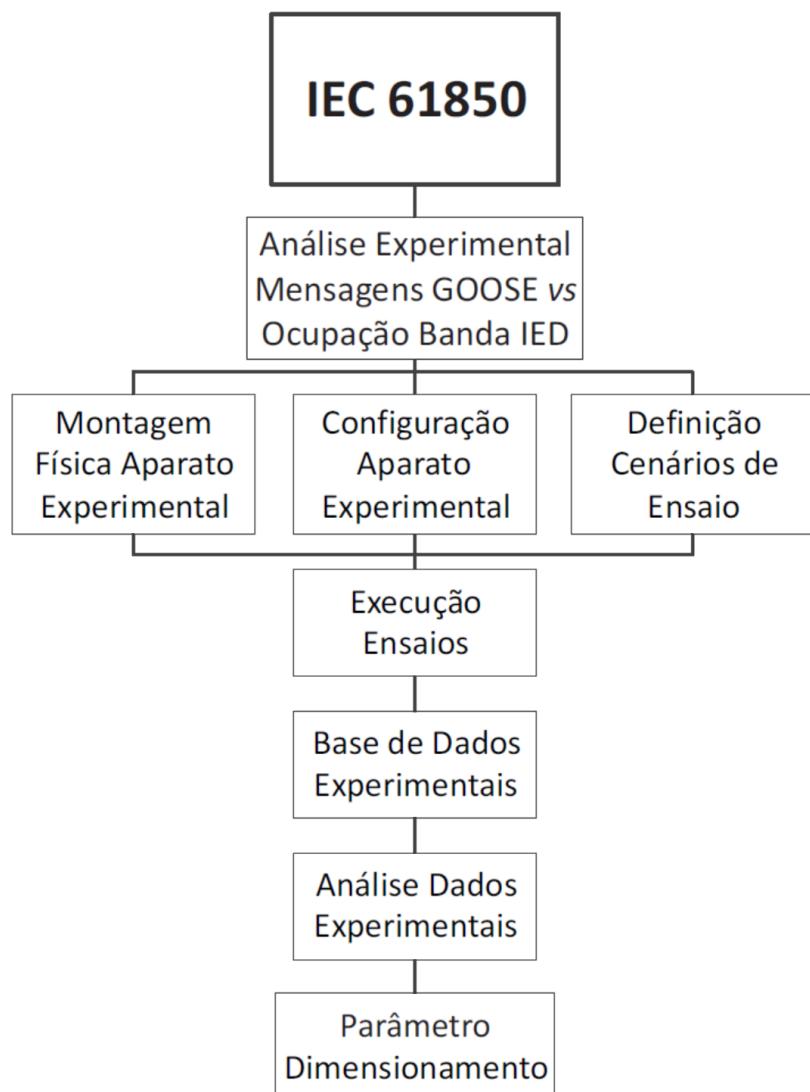


Figura 6 – Fluxograma da etapa experimental. Fonte: Netto (2012)

A análise experimental da transferência de mensagens GOOSE versus a ocupação percentual da banda de comunicação dos IED foi planejada para atingir o objetivo de estabelecer um parâmetro de dimensionamento e comparação de desempenho para o tempo de transferência das mensagens GOOSE.

Para tanto, foi realizada a montagem dos equipamentos, a qual consiste na instalação em painéis de 19" dos IEDs, switch gerenciável, relógio sincronizador *Global Positioning System* (GPS) e *Uninterruptible Power Supply* (UPS). Após a montagem, foi definida a topologia física para a rede de comunicação de dados e, consequentemente, foram realizadas as interligações dos equipamentos à mesma e ao relógio sincronizador por GPS. Por fim, foi estabelecida a infraestrutura de alimentação segura em corrente alternada para todo o aparato utilizado.

Realizada a atividade de montagem, foi definido e configurado o esquema de ensaio. Para isso, foram ajustados os parâmetros indispensáveis, referentes a todos os equipamentos utilizados, para execução do ensaio. Esses consistem em determinar o modo de comunicação, o endereçamento lógico (endereço IP), a classificação das mensagens, a instalação de aplicativos de software, o envio e recepção de mensagens GOOSE, o sinal de sincronismo de tempo, os valores de tensão auxiliar de alimentação, o Registro Sequencial de Eventos (RSE) e a sinalização na Interface Homem Máquina (IHM) dos IED.

Em seguida foram definidos os cenários de ensaio, os quais consistem na discriminação dos valores de tráfego extra aplicado e suas características, em determinar os equipamentos que terão suas interfaces de rede sobrecarregadas, em ajustar o aplicativo de software que irá gerar o tráfego extra, em definir as configurações do switch gerenciável e em estabelecer um fluxo controlado de mensagens GOOSE entre um IED e aqueles dispositivos que serão sobrecarregados.

Concluídas as etapas anteriores foi realizada a execução dos ensaios a partir do conjunto de situações definidas previamente. Finalizada a execução dos ensaios foi obtida uma base de dados experimental a partir do resgate do RSE de cada IED.

Posteriormente foi realizada a análise dos dados experimentais a partir de um aplicativo computacional desenvolvido para extração das características de interesse da massa de dados obtida previamente. Essas características são o desvio padrão, o valor máximo, o valor mínimo e a média para o tempo de transferência, além da contabilização do total de mensagens extraviadas. Todos esses valores serão apresentados em gráficos pertinentes para análise e discussão.

Por fim, a partir das discussões sobre os resultados, com consequente apresentação das inferências sobre os mesmos, é proposto um parâmetro de dimensionamento e comparação de desempenho para o tempo de transferência e perda das mensagens

GOOSE.

## 3.2 Análise Experimental das Mensagens GOOSE

Os elementos componentes aplicados à construção do aparato experimental utilizado nesta pesquisa são os mesmos encontrados em SE reais, sendo sua montagem e configuração similares ao que de fato se encontraria em campo. A Figura 7 apresenta seu aspecto físico.

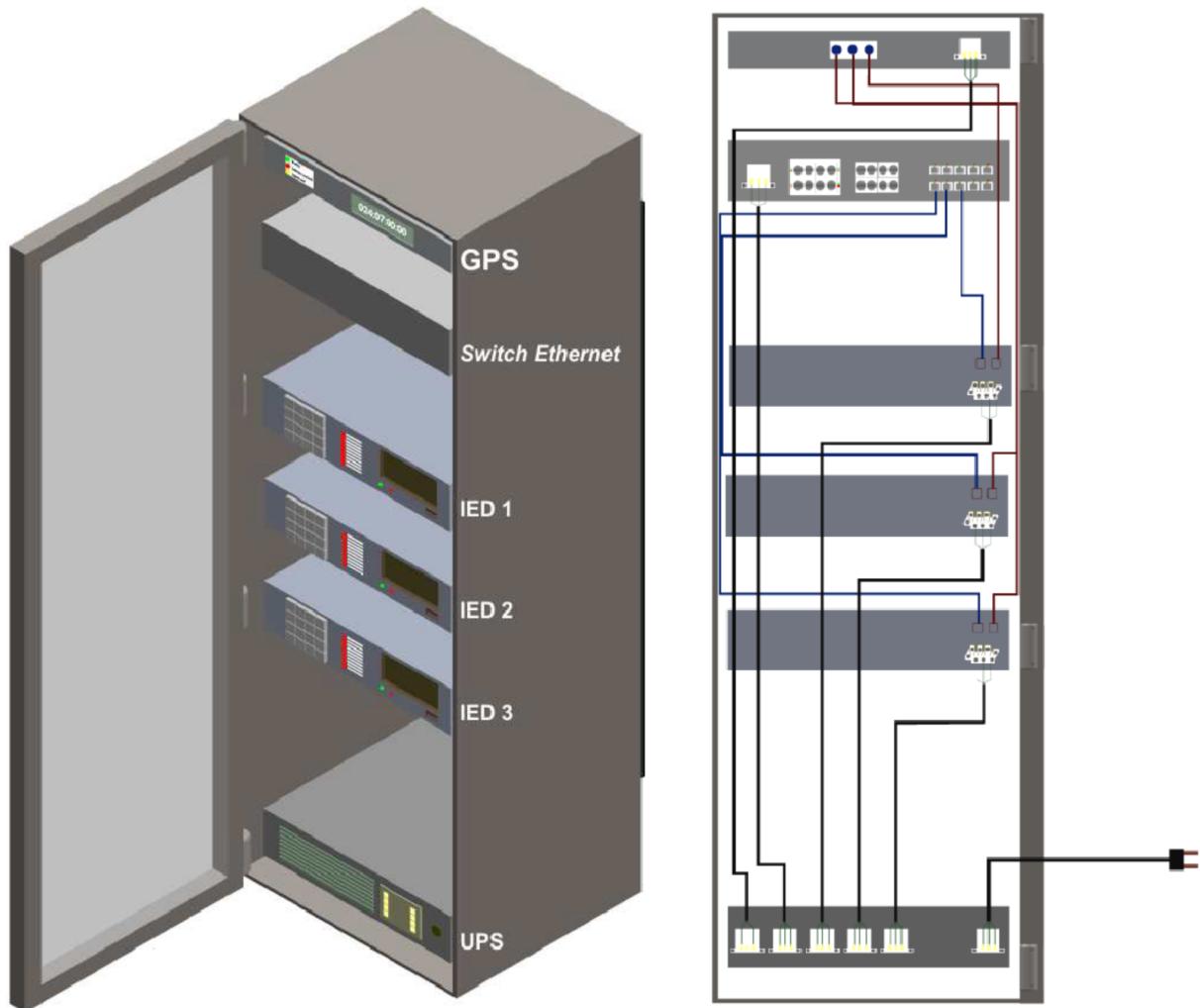


Figura 7 – Aparato experimental. Fonte: Netto (2012)

Este aparato foi utilizado porque representa adequadamente, em escala reduzida, a rede de comunicação de dados e o SP de uma SE. Esta abordagem é distinta daquela utilizada em outros trabalhos sobre o padrão IEC 61850 realizados em ambientes de simulação computacional, já que não se restringe a um nível lógico de simulação.

A seguir são apresentadas as principais características, relevantes a esta pesquisa, dos elementos utilizados no aparato experimental.

**Painéis de 19”** Foi utilizado um painel com medida padrão de 19”, semelhante àqueles encontrados em SE, para alojar a montagem física dos equipamentos utilizados no aparato laboratorial. Esse foi identificado pelo acrônimo de PNL1.

**IED** Foram utilizados 02 IED de proteção, de um mesmo fabricante, com interface de rede óptica multimodo, emissor óptico com tecnologia LED e comprimento de onda de 820nm, velocidade de 100MBps, com conector ST, suporte ao padrão IEC 61850, capacidade de armazenamento de 1000 linhas para o RSE com precisão da medição de 1ms, recepção de sinal GPS através do IRIG no formato B demodulada (IRIG-B000, IRIG-B002) e IHM configurável.

**Microcomputadores** Foram utilizados 02 microcomputadores do tipo IBM PC para executar os aplicativos de configuração, monitoramento, análise e geração de tráfego para os equipamentos constituintes da referida estrutura laboratorial. O primeiro possui um processador Intel® Core™ 2 Quad Q9450 com velocidade de *clock* de 2,66GHz, placa de rede Intel® 82566DC-2 Gigabit, 4GB de memória RAM DDR3 de 1333MHz, 500GB para armazenamento e sistema operacional Ubuntu 11.10 com Kernel linux 3.0.4 de 32 bits. O segundo computador possui um processador Intel® Core® Duo P9600 com velocidade de *clock* de 2,66GHz, placa de rede Intel™ 82567LM Gigabit, 4GB de memória RAM DDR2 de 800MHz, 250GB de armazenamento e sistema operacional *Windows 7 Professional®* de 64 bits.

**Switch para rede Ethernet** Foi utilizado 01 *switch ethernet* gerenciável, de camada 2 do modelo ISO/OSI, do tipo *Store and forward*, com *IEEE 802.3x full-duplex flow-control, non-blocking*, com interfaces de comunicação 10/100 Mbps (14880/148800 pps) com conectores ST para fibra óptica multimodo e RJ45 para cabo UTP, *buffer* de pacotes de 240KB, padrões de rede *Ethernet v1.0/v2.0 IEEE 802.3: 10 Base-T; IEEE 802.3u: 100Base-TX, 100Base-FX; IEEE 802.1p: Priority protocol; IEEE 802.1d: Spanning tree protocol; IEEE 802.1q: VLAN tagging; IEEE 802.3x: Flow control*, latência igual a  $5/15\mu\text{s} + \text{tempo do pacote para } 10/100 \text{ Mbps}$ , em conformidade com IEEE P1613 - *Standard for Environmental and Testing Requirements for Communications Networking Devices Installed in Electric Power Facilities* e IEC 61850-3 - *General requirements*, com duas filas de prioridade do tipo ponderada (*weighted fair queuing*).

**Relógio GPS** Foi utilizado um relógio GPS com entrada IRIG-no formato B modulada ou IRIG-B compatível com TTL demodulada, com conectores BNC ou bloco de

pinos ("pin-in") que suporta os formatos IRIG-B002 e IRIG-B120. Possui 16 saídas IRIG-B demoduladas com conector DB-9 e formato IRIG-B002.

**UPS** Foi utilizada uma UPS com entrada monofásica em 115/127/220V AC, frequência de 60Hz, potência de saída de 3000 VA, 115Vac, fator de potência 0,62, com capacidade das baterias de 17Ah, correspondendo aproximadamente, para este aparato, em um tempo de 3,4h de autonomia.

**Materiais de consumo e ferramentas** Foram utilizados diversos materiais para compor a estrutura desejada, como, por exemplo uma caixa de cabo UTP-Categoria 5e, uma bobina de cabo manga com 26 vias, cordões em fibra óptica multimodo com conectores ST, conectores RJ45, abraçadeiras, condutores elétricos, parafusos do tipo porca-gaiola, fita isolante, etc. Quanto às ferramentas, foram utilizadas ferramentas para construção de redes de comunicação de dados, como alicate crimpador, testadores de cabo etc., além de ferro de solda, multímetro, alicates diversos, como universal, de bico e de corte, chaves de fenda, chaves de precisão, entre outras.

**Softwares** Foram utilizados softwares para configuração e controle dos equipamentos, como, por exemplo, o *AcSELerator QuickSet*, versão 5.2.0.1, o *EnerVista Launchpad*, versão 5.01 e o *AcSELerator Architect*, versão 1.1.99.0. A linguagem de computação técnica *MatLab® R2010a* para realizar a análise dos resultados, os aplicativos *WAN Killer®* e *SNMP Real-Time Graph® 9.2.0.47*, para geração e monitoramento de tráfego, respectivamente. Alguns desses serão nativos dos equipamentos com os quais se está trabalhando, outros serão aplicativos de propósito geral que se adequam as necessidades desta pesquisa.

### 3.2.1 Configuração Lógica e Aparato Experimental

Nesta etapa foram definidos o esquema de ensaio a partir do aparato laboratorial desenvolvido, conforme a Figura 8 e ajustados todos os parâmetros indispensáveis para sua execução, de acordo com a Tabela 1.

Além das configurações apresentadas na Tabela 1, o RSE de cada IED foi configurado para registrar o envio e recepção das mensagens GOOSE utilizadas durante o ensaio, de acordo com a lógica apresentada na Figura 10.

A topologia física em estrela foi escolhida por ser, de acordo com discussões feitas com profissionais da área ao longo desta pesquisa, preferencial quando se busca uma estrutura de rede de menor custo (Netto, 2012).

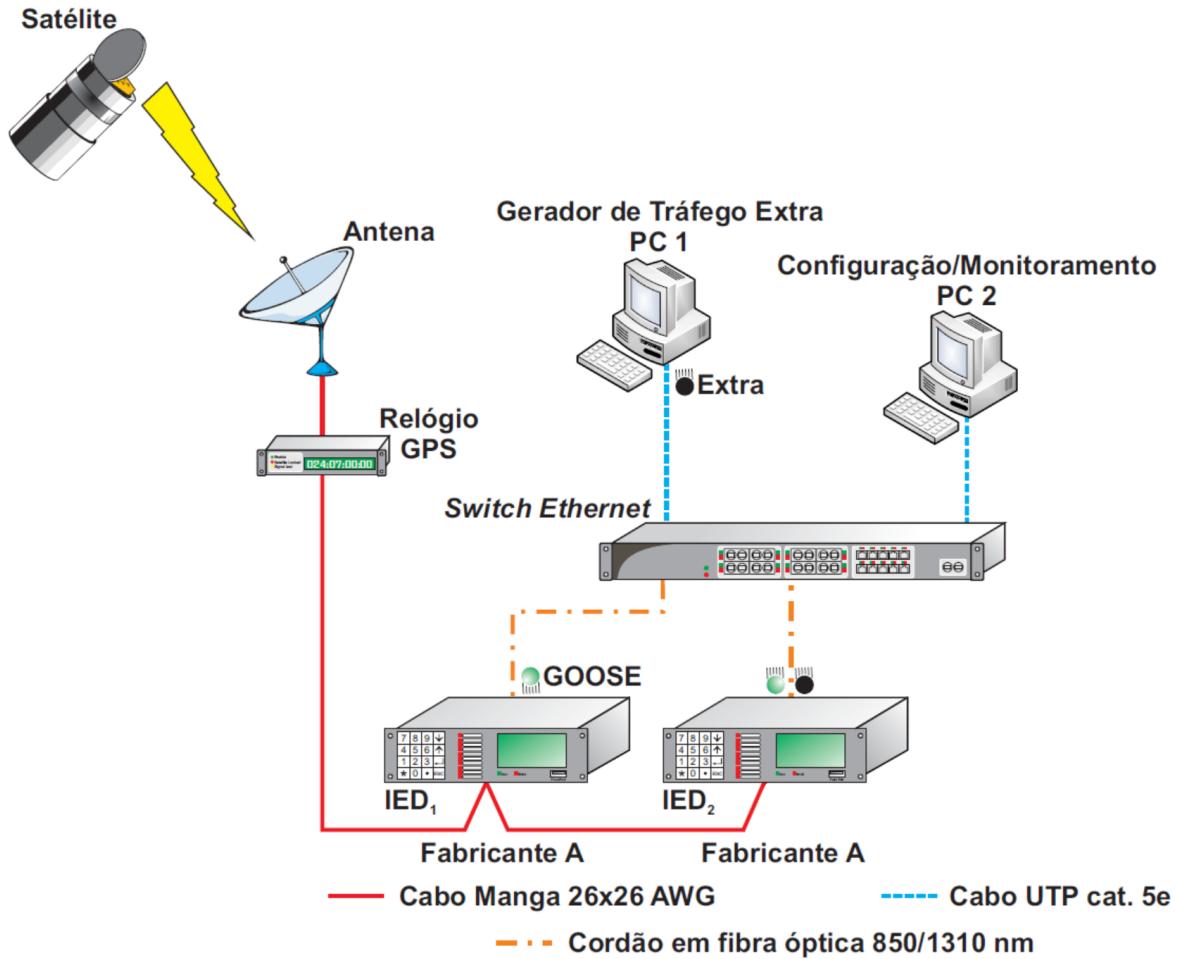


Figura 8 – Esquema de ensaio utilizado. Fonte: Netto (2012)

Tabela 1 – Parâmetros de configuração aplicados ao esquema de ensaio.

Item	Com. <sup>1</sup>	IP <sup>2</sup>	Vel. <sup>3</sup>	Cod. <sup>4</sup>	Fila <sup>5</sup>	Por. <sup>6</sup>	Rot. <sup>7</sup>	Tipo <sup>8</sup>	Ret. <sup>9</sup>
IED 1	Full-Duplex	192.168.0.8	100MBps	IRIG-B002	Alta	1	7	1/1A	0,100,100,500ms
IED 2	Full-Duplex	192.168.0.19	100MBps	IRIG-B002	Alta	9	7	1/1A	0,100,100,500ms
GPS	n/a <sup>10</sup>	n/a	n/a	IRIG-B002	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Switch	Full-Duplex	192.168.0.31	100MBps	n/a	Alta/Baixa	n/a	0-7	n/a	n/a
PC 1	Full-Duplex	192.168.0.15	100MBps	n/a	Baixa	13	n/a	n/a	n/a
PC 2	Full-Duplex	192.168.0.12	100MBps	n/a	Baixa	17	n/a	n/a	n/a

<sup>1</sup> Com = Modo de comunicação;

<sup>2</sup> IP = Endereço IP;

<sup>3</sup> Vel. = Velocidade de interface;

<sup>4</sup> Cod. = Codificação sincronismo tempo;

<sup>5</sup> Fila = Fila de prioridade do switch Ethernet;

<sup>6</sup> Por. = Porta utilizada no switch Ethernet;

<sup>7</sup> Rot. = Campo de prioridade de acordo com IEEE (2006);

<sup>8</sup> Tipo = Tipo de mensagens GOOSE;

<sup>9</sup> Ret. = Retransmissão GOOSE;

<sup>10</sup> n/a = não aplicável;

### 3.2.2 Execução dos Ensaios

A rede de comunicação de dados da SE é utilizada para mais de uma atividade, como, por exemplo, envio/recebimento de mensagens GOOSE, troca de informações pelo SCADA e obtenção de informações de processo, como oscilografias e RSE. Cada uma dessas atividades possui requisitos distintos para o tempo de entrega de suas mensagens, tornando necessário classificar o tráfego que chega em um nó ativo da rede, como um *switch Ethernet*, por exemplo, em diferentes classes de prioridade. Nesse contexto, tanto a configuração de *Quality of Service* (QoS)<sup>1</sup> quanto a ocupação percentual da banda da interface de comunicação dos IED são variáveis a serem consideradas.

Conforme mencionado anteriormente, o *switch Ethernet* possui duas filas de prioridade e um método de formação de fila do tipo ponderada (*weighted fair queuing*), para o qual 8 valores distintos de peso podem ser aplicados. Neste trabalho foi verificada a influência desse ajuste sobre o tempo de transferência e perda de mensagens GOOSE, e denominado “perfil”. A Tabela 2 resume os ajustes possíveis para os pesos.

Tabela 2 – Ajuste dos Pesos no mecanismo de QoS.

Peso	Encaminhamento Pacotes
Zero	O tráfego é enviado alternadamente a partir de cada fila e os pacotes são enfileirados alternadamente em cada fila.
1	02 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote da fila de baixa prioridade.
2	04 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote da fila de baixa prioridade.
3	06 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote da fila de baixa prioridade.
4	08 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote da fila de baixa prioridade.
5	10 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote da fila de baixa prioridade.
6	12 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote da fila de baixa prioridade.
7	Todos os pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade.

A outra variável para execução do ensaio é a ocupação percentual da banda do IED em estudo, pois suas variações influenciam diretamente no atraso e perda de mensagens GOOSE. Foram definidos 11 patamares de ocupação da banda nominal do IED em estudo, de acordo com a Tabela 3.

As ocupações de banda descritas foram obtidas a partir da geração de tráfego extra com um perfil de bits variável, conforme ilustra a Figura 9, a partir de uma sobrecarga do tipo Denial of Service (DoS)<sup>2</sup> aplicada somente ao IED 2 (Erickson, 2008; Forouzan, 2007).

Foram utilizados os aplicativos de software *WAN Killer®* e *SNMP Real-Time Graph®* 9.2.0.47, para geração e monitoramento do tráfego extra, respectivamente (Solarwinds, 2009). O monitoramento foi possível porque o *switch ethernet* utilizado possui

<sup>1</sup> O conceito de quaidade de serviço refere-se à garantia de largura de banda ou à probabilidade de um pacote circular entre dois pontos da rede.

<sup>2</sup> Em um ataque de negação de serviço (DoS), um atacante gera uma sobrecarga de requisições num determinado servidor ou na rede em que o mesmo se encontra, a fim de impedir que usuários legítimos acessem informações ou serviços.

Tabela 3 – Patamares ocupação banda IED.

Banda Nominal (BN) = 100Mbps											
Patamar N <sup>º</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ocupação Banda (% BN)	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95

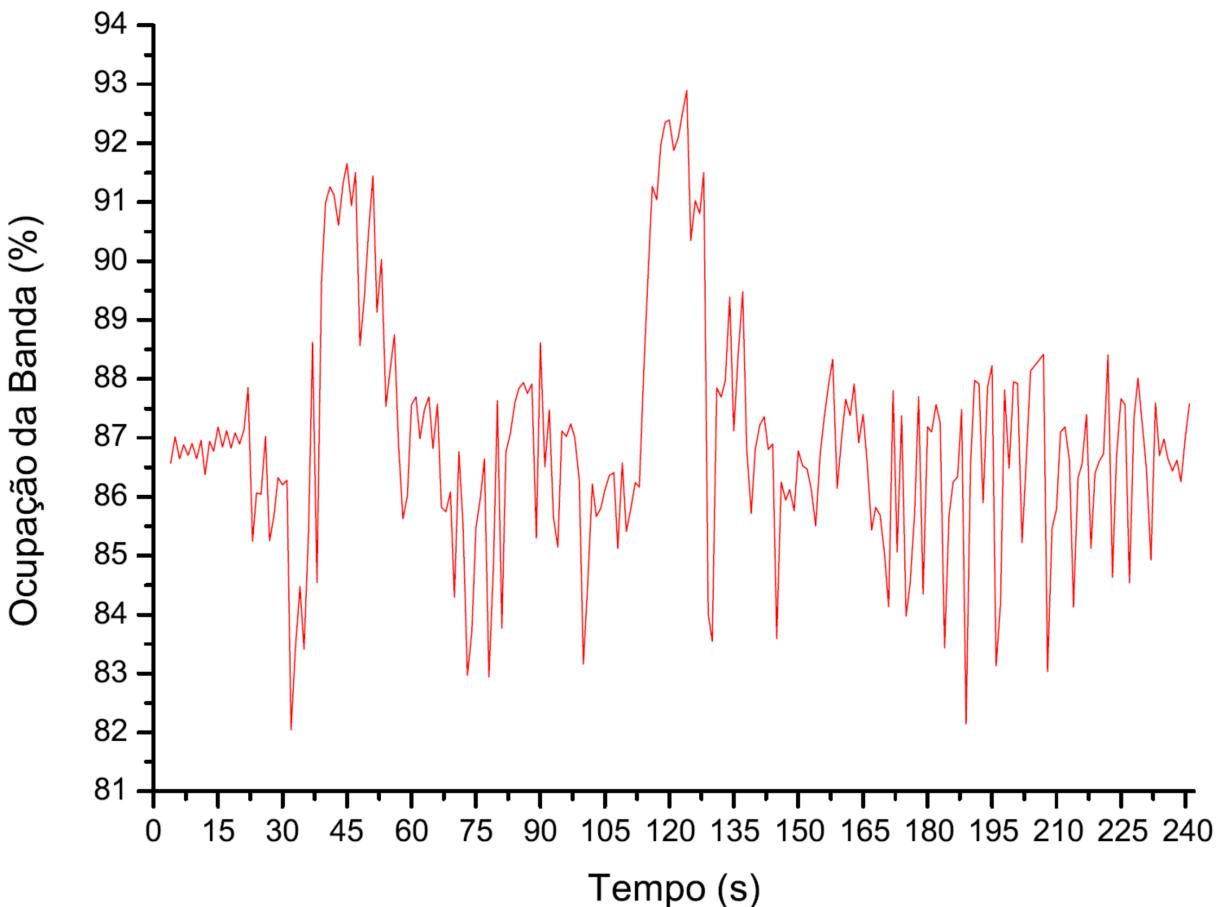


Figura 9 – Exemplo de tráfego extra para 85% da ocupação de banda, obtido durante os ensaios. Fonte: Netto (2012)

o *Simple Network Management Protocol* (SNMP) versão 3 (STD0062) implementado (Seifert e Edwards, 2008). Quanto ao gráfico apresentado na Figura 9, esse foi obtido com o uso do *SNMP Real-Time Graph®* 9.2.0.47 com um intervalo de requisição de 1s e um tempo total de medição de 240s.

Para a criação do tráfego extra, foi utilizado o protocolo da camada de transporte *User Datagram Protocol* (UDP). Cada pacote enviado foi configurado com tamanho igual a 1496 bytes (Forouzan, 2007). A quantidade de pacotes por segundo gerados foi ajustada para representar o carregamento percentual da banda nominal da interface do IED em estudo, neste caso 100Mbps, de acordo com a Tabela 3.

Em seguida foi definido um fluxo conhecido de mensagens GOOSE enviadas do

IED 1 ao IED 2 para tornar possível a determinação do tempo de transferência e perda das mesmas. Segundo (Flores et al, 2007), o tempo de transferência pode ser obtido a partir do RSE de cada IED. Isso é possível pois, para IED com relógios sincronizados com a mesma base de tempo, basta realizar a subtração direta do valor da estampa de tempo do IED que recebeu a mensagem GOOSE que a publicou.

Para estabelecer a base de tempo necessária foi utilizado o IRIG no formato B, por esse atender aos requisitos de precisão demandados pelo padrão IEC 61850 (IEEE, 2007; IEC, 2003d; Council, 1998).

Essa é uma modificação do procedimento de ensaio conhecido como “Round Trip” publicado pelo *UCA International Users Group* (Nordell et al., 2012), pois neste caso não se está interessado em discriminar  $t_a$ ,  $t_b$  e  $t_c$ <sup>3</sup>, mas sim em obter o tempo de transferência médio, o qual tem significado maior para a operação do SP.

Os requisitos de tempo para aplicações de proteção e controle se dividem em três classes distintas (Apostolov e Tholomier, 2006; IEC, 2003c):

- Classe P1 - aplicada a *bays* de distribuição ou para casos nos quais um baixo desempenho pode ser aceito, sendo o tempo de transferência igual a 10ms;
- Classe P2 - aplicada a *bays* de transmissão ou em caso contrário por decisão do usuário, sendo o tempo de transferência igual a 3ms;
- Classe P3 - aplicada a *bays* de transmissão onde um desempenho elevado é necessário, sendo o tempo de transferência igual a 3 ms.

Nesta pesquisa utiliza-se a Classe P1, o que implica em um tempo de transferência máximo igual a 10 ms.

A Figura 10 ilustra a lógica desenvolvida, através de portas lógicas, implementada no IED1, a qual gera uma sucessão de 44 mensagens GOOSE com duração de 1s e intervalo de 3s entre as mesmas, conforme ilustra a Figura 11, para cada patamar de ocupação de banda caracterizado na Tabela 3. É possível ajustar a lógica de forma a executar sucessivos testes com as características mencionadas anteriormente. Além disso, cada mensagem possui uma estampa de tempo única atribuída por um relógio GPS.

Resumidamente, a lógica desenvolvida funciona da seguinte forma:

<sup>3</sup> As três componentes do tempo de transferência entre IEDs:  $t_a$  - Tempo entre o IED 1 colocar um dado no topo da sua pilha de comunicação e a mensagem correspondente ser enviada para a rede;  $t_b$  - Tempo em que a mensagem trafega pela rede;  $t_c$  - Tempo entre o IED 2 retirar a mensagem da rede e extrair o dado da sua pilha de comunicação.

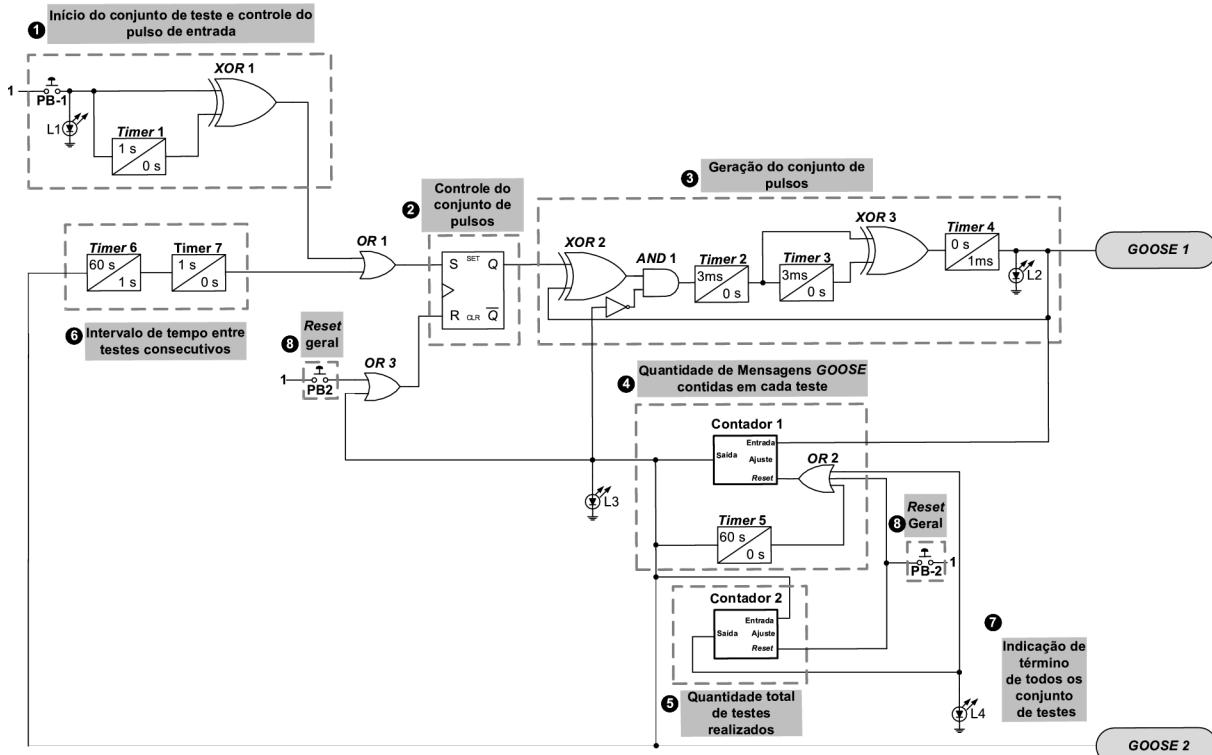


Figura 10 – Lógica digital para geração de mensagens GOOSE. Fonte: Netto (2012)

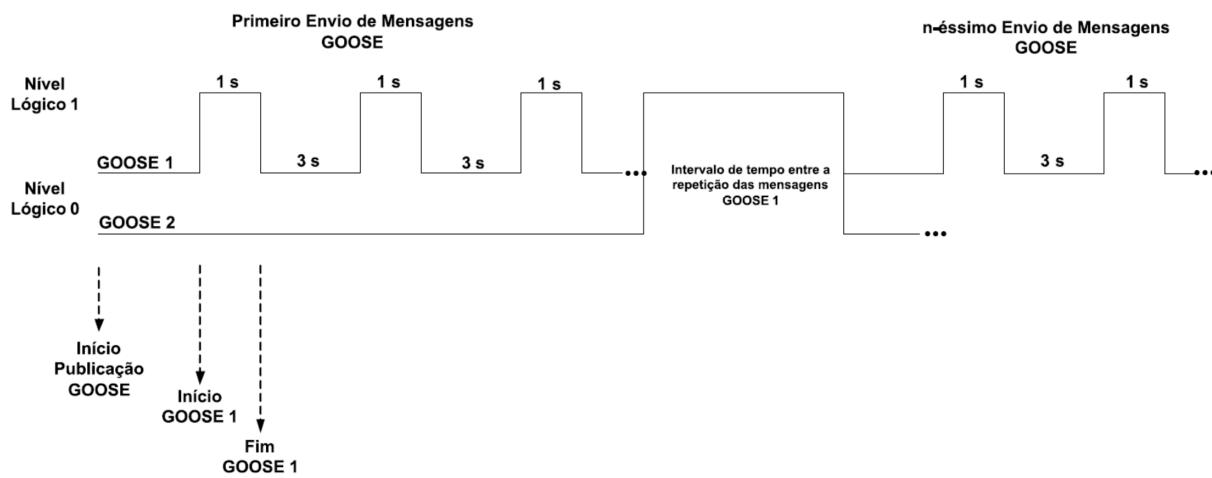


Figura 11 – Saída da lógica desenvolvida. Fonte: Netto (2012)

1. Inicia o envio de mensagens GOOSE a partir do IED 1 quando o botão PB-1 é pressionado. O *timer 1* faz com que as entradas da porta xor 1 fiquem com níveis lógicos distintos por 1 segundo, fazendo com que sua saída vá a nível lógico 1, durante o tempo mencionado, excitando o *flip-flop*;
2. Habilita ou bloqueia o envio de mensagens GOOSE através das entradas set e reset do *flip-flop*;
3. Estabelece a cadência e duração das mensagens GOOSE. Quando a porta xor 2 estiver com uma de suas entradas em nível lógico 1, e a outra em nível lógico 0, o *timer 2* será ativado através da porta *and 1*, fazendo com que a porta xor 3, após 3s, receba nível lógico 1. Como sua outra entrada está em nível lógico 0, sua saída será ativada publicando uma mensagem GOOSE 1. Decorrido o tempo de 1s ajustado para o *timer 4*, cessa o envio da mensagem GOOSE 1.
4. O contador 1 determina a quantidade de mensagens enviadas, neste caso ajustado para 44. Após o limite ajustado ser atingido a saída desse contador é ativada e através da porta *or 3* o *flip-flop* será bloqueado, encerrando a publicação das mensagens GOOSE. Além disso, a saída do contador 1 serve para bloquear o bloco funcional 3 e estabilizar a lógica desenvolvida, iniciar um novo conjunto de publicação de mensagens GOOSE após 1 minuto, conforme o ajuste dos *timers 6* e *7*, zerar o valor acumulado no contador 1 pelo timer 5, incrementar o contador 2 e gerar uma mensagem GOOSE 2, a qual indica o término da publicação de 44 mensagens GOOSE 1;
5. Contador que define a quantidade máxima de repetições das 44 mensagens GOOSE 1 definidas anteriormente;
6. Botão PB-2 a partir do qual o funcionamento da lógica desenvolvida é encerrado permanentemente, fazendo com que todos os contadores zerem os valores acumulados.

As sinalizações presentes na lógica para geração das mensagens GOOSE podem ser descritas conforme segue:

- Led L1, indica o início de um conjunto de teste;
- Led L2, indica o envio de uma mensagem GOOSE1;
- Led L3, indica o intervalo entre conjuntos de teste consecutivos (mensagem GOOSE2);
- Led L4, indica o término de todos os conjuntos de teste.

Para o IED 2, as sinalizações significam, respectivamente:

- Led L1, indica a recepção de uma mensagem GOOSE1;
- Led L2, indica o intervalo entre conjuntos de teste consecutivos (mensagem GOOSE2).

O nó lógico (NL) escolhido para cada mensagem transmitida foi o GGPIO, conforme estabelecido no padrão IEC61850. A Tabela 4 apresenta a associação das mensagens GOOSE1 e GOOSE2 para esse NL.

Tabela 4 – Ajuste dos pesos no mecanismo de QoS.

Tipo	Referência	Estrutura NL
$GOOSE_{1,x,y}$	bloco 3	$IED_1.LD_1.GGPIO_1.ST.Ind_1.stVal$
$GOOSE_{2,x,y}$	bloco 4	$IED_1.LD_1.GGPIO_1.ST.Ind_2.stVal$
$GOOSE_{1,x,y}$	L1	$IED_2.LD_2.GGPIO_1.ST.Ind_1.stVal$
$GOOSE_{2,x,y}$	L2	$IED_2.LD_2.GGPIO_1.ST.Ind_2.stVal$

### 3.3 Resultados e Discussões Referentes à Porção Experimental do Trabalho

Nesta seção são descritos os resultados para as situações operativas caracterizadas anteriormente. A Figura 12 apresenta o fluxograma que representa o aplicativo computacional desenvolvido para análise dos dados experimentais. Este aplicativo foi feito através da linguagem de computação técnica MatLab® R2010a dispondo de várias funções nativas da mesma, como, por exemplo, *fopen*, *fscanf*, *mean*, *max*, *min*, dentre outras (Gilat, 2006; Chapman, 2006; Matsumoto, 2006).

Através do seu uso, são calculados o tempo de transferência médio, o desvio padrão para o tempo de transferência médio, o valor máximo e mínimo para o tempo de transferência e as perdas de mensagens GOOSE para cada teste executado.

Com esses dados, os gráficos correspondentes a cada grandeza são traçados e o comportamento do IED em estudo analisado. Quanto aos gráficos, cabe dizer que suas abscissas foram definidas de acordo com os valores discretos apresentados na Tabela 3. A partir desses foi obtido o parâmetro de dimensionamento proposto.

#### 3.3.1 Resultados para o Perfil Zero

A Figura 13 mostra os resultados para o ensaio realizado no perfil zero da Tabela 2 em relação ao tempo de transferência médio e seu desvio padrão vs. a ocupação

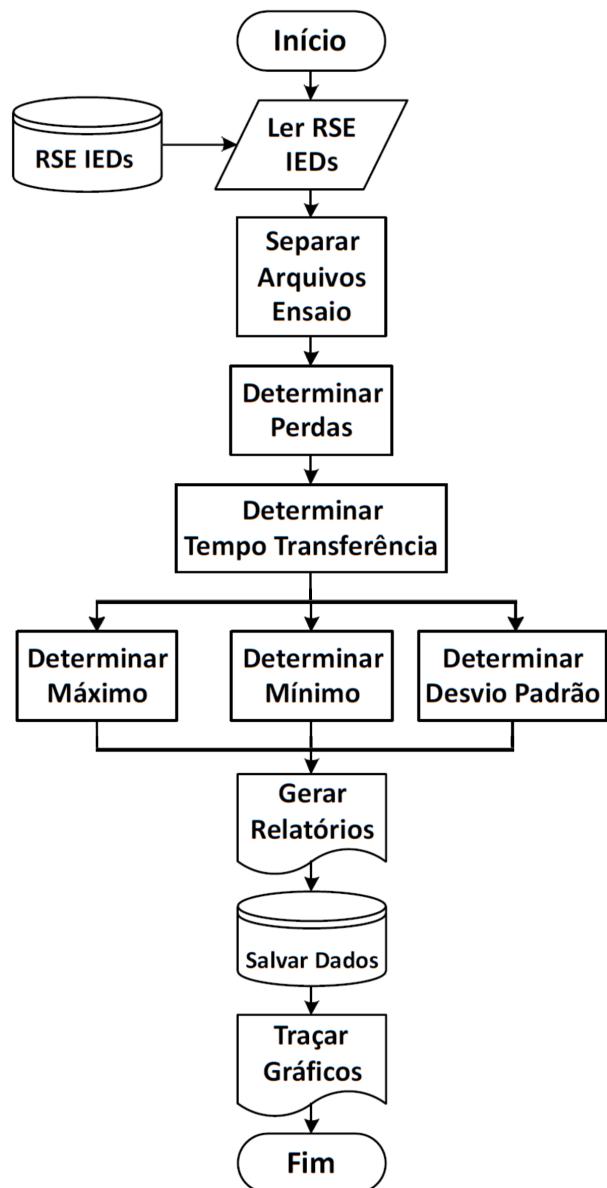


Figura 12 – Representação esquemática para o aplicativo de análise dos dados. Fonte: Netto (2012)

percentual da banda do IED em estudo. Observa-se duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência médio e desvio padrão. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios iguais a 4,46ms e 0,74ms para o tempo de transferência médio e desvio padrão, respectivamente. Esses valores não violam o limite de 10ms definido para a classe P1 do padrão IEC 61850, descrita na subseção 3.2.2. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores que extrapolam a referência estabelecida. Para esse intervalo, o tempo de transferência médio passa de 4,46ms para 129 ms, enquanto que o desvio padrão médio passa de 0,74ms para 211,29ms. O limiar entre as duas regiões foi definido de forma a se obter apenas valores iguais a ou muito próximos de 0 para as o tempo de transferência e o percentual de perdas, em todos os perfis.

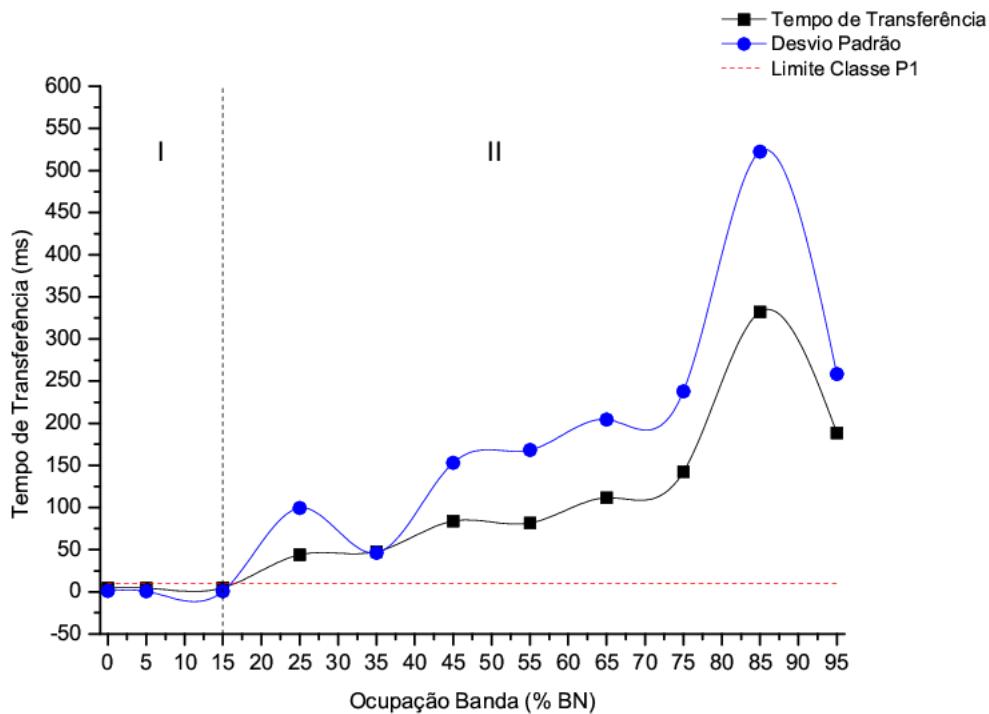


Figura 13 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 0. Fonte: Netto (2012)

A Figura 14 apresenta os resultados para o ensaio realizado no perfil zero da Tabela 2 em relação aos valores máximos e mínimos obtidos para o tempo de transferência vs. a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Novamente se observa a existência de duas regiões com comportamento distinto para os valores máximo e mínimo do tempo de transferência. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e apresenta valores médios de 6,03ms e 3,2ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios que passam de 6,03ms para 729,31ms e de 3,2ms para 3,71ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente.

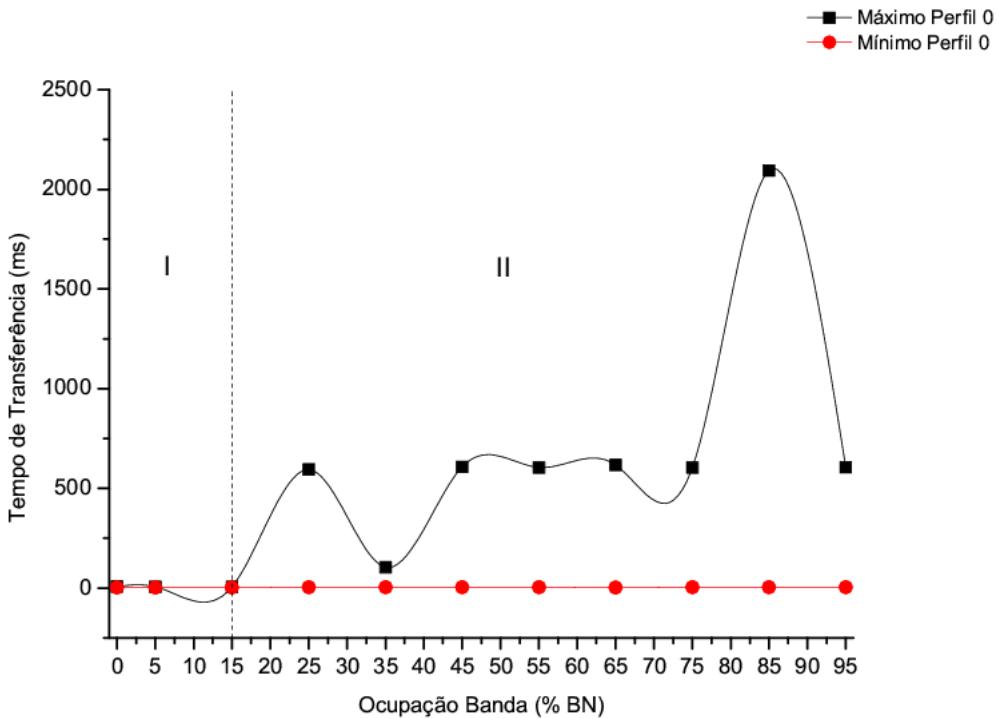


Figura 14 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 0. Fonte: Netto (2012)

A Figura 15 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil zero da Tabela 2 e, como os demais resultados, apresenta duas regiões com comportamento distinto para as perdas ocorridas no IED2. Observa-se que para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2, I, não há perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2, II, as perdas aumentam para 45,73%, em média.

Os resultados para os demais perfis tem seus valores sumarizados nas tabelas 5 e 6, enquanto seus gráficos são disponibilizados para consulta no Anexo A.

### 3.3.2 Comentários Finais

As variações observadas nos resultados descritos podem ser explicadas devido ao acúmulo de atrasos de processamento, transmissão e de formação de filas nos dispositivos de rede. Um componente crucial do atraso fim-a-fim são os atrasos aleatórios de fila no switch Ethernet. Por causa desses atrasos variáveis dentro da rede, o tempo decorrido entre o momento em que uma mensagem é publicada pelo IED 1 e o momento em que é recebida pelo IED 2 pode variar de mensagem para mensagem (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007).

As Tabelas 5 e 6 apresentam de forma consolidada os resultados referentes a todos os perfis testados. Nota-se que, para a região I, o perfil P1 apresenta quatro das cinco quantidades utilizadas para avaliação com os menores valores registrados.

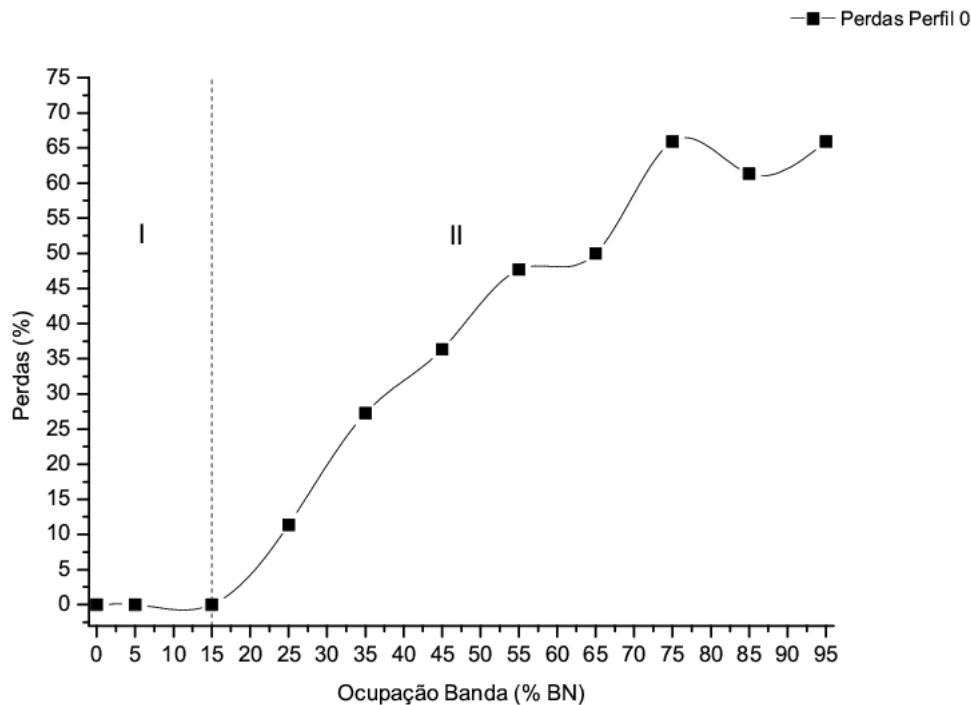


Figura 15 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 0. Fonte: Netto (2012)

Enquanto que, para a região II, o perfil P3 apresenta três das cinco quantidades caracterizadas com os menores valores registrados. Logo, constata-se que a configuração de pesos para o tipo de técnica de formação de fila utilizada influencia nos valores do tempo de transferência e perda de mensagens GOOSE.

Tabela 5 – Comparação entre os resultados para cada perfil caracterizado (Região I).

	$\overline{TT}$ (ms) <sup>1</sup>	$\sigma$ (ms) <sup>2</sup>	Máx. (ms) <sup>3</sup>	Min. (ms) <sup>4</sup>	Perda média (%)
P0	4,46	0,74	6,03	3,20	Zero
P1	4,36	0,69	5,96	2,86	Zero
P2	4,46	0,75	5,90	3,46	Zero
P3	4,56	0,76	6,50	3,10	Zero
P4	4,43	0,77	6,10	3,16	Zero
P5	5,26	5,44	8,53	3,03	Zero
P6	4,46	0,81	6,10	3,20	Zero
P7	4,50	0,76	5,86	3,26	Zero

<sup>1</sup>  $\overline{TT}$  = Tempo de transferência médio;

<sup>2</sup>  $\sigma$  = Desvio padrão para  $\overline{TT}$ ;

<sup>3</sup> Max. = Valor máximo para o tempo de transferência;

<sup>4</sup> Min. = Valor mínimo para o tempo de transferência;

A constatação das regiões mencionadas é um dado relevante para a especificação dos IED, pois, o limiar entre as áreas I e II pode ser traduzido em um parâmetro de dimensionamento e avaliação para dispositivos distintos, sendo o de melhor desempenho o que possuir a maior região de operação desejável, ou seja, aquele capaz de

Tabela 6 – Comparação entre os resultados para cada perfil caracterizado (Região II).

	$\overline{TT}$ (ms) <sup>1</sup>	$\sigma$ (ms) <sup>2</sup>	Máx. (ms) <sup>3</sup>	Min. (ms) <sup>4</sup>	Perda média (%)
P0	129	211,29	729,31	3,71	45,73
P1	88,72	150,44	539,60	4,17	48,57
P2	94,51	152,21	531,11	3,86	48,57
P3	78,21	105,36	289,90	3,97	49,71
P4	103,01	151,82	478,66	3,97	46,59
P5	109,77	165,64	595,20	4,18	48,57
P6	106,38	203,71	827,73	4,26	48,57
P7	88,98	133,48	468,71	3,71	52,92

<sup>1</sup>  $\overline{TT}$  = Tempo de transferência médio;

<sup>2</sup>  $\sigma$  = Desvio padrão para  $\overline{TT}$ ;

<sup>3</sup> Max. = Valor máximo para o tempo de transferência;

<sup>4</sup> Min. = Valor mínimo para o tempo de transferência;

manter o tempo de transferência abaixo da referência determinada, para um maior valor percentual de ocupação de sua banda nominal.

Outro dado relevante são os tempos de máximo e mínimo obtidos, pois a partir desses é possível coordenar o SP de forma apropriada. Uma vez detectada em qual região de operação o IED está, caso seja necessário, um novo grupo de ajustes pode ser ativado, mantendo o SP seletivo. Dessa forma, o parâmetro obtido pode ser usado em conjunto com o SNMP para compor um sistema de monitoramento da operação do IED no que diz respeito ao desempenho das mensagens GOOSE.

Quanto aos resultados referentes às perdas, vê-se que, mesmo com o mecanismo de repetição das mensagens GOOSE, nem todas, a partir do limiar de 15%, são entregues.

O método de ensaio utilizado é generalista e pode ser utilizado no PIT – Programa de Inspeção e Ensaio (conjunto de ensaios realizados em um IED antes de este ser colocado em operação) dos IED.



# 4 Sistema Preditivo de Monitoramento de Banda

Neste capítulo será descrito o desenvolvimento do sistema preditivo de monitoramento de banda para redes de IEDs a partir do parâmetro de dimensionamento obtido no Capítulo 3, bem como os resultados relativos a sua utilização.

## 4.1 Introdução

Conforme as discussões feitas nos capítulos anteriores, para o novo modelo do SEP, a rede de comunicação de dados representa um elemento relevante para o bom desempenho do SP (Farhangi, 2010). Contudo, seu funcionamento pode ser comprometido devido a anomalias, como, por exemplo, defeitos em *softwares*, uso abusivo de recursos da rede, falhas em equipamentos, erros em configurações e ataques (Zarpelão, 2010).

Dessa forma, para que a rede de comunicação de dados opere de forma estável, com bom desempenho e que satisfaça aos requisitos de qualidade estabelecidos por seus usuários, é necessário estabelecer um sistema de gerenciamento de redes (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007).

Neste trabalho é proposto um sistema preditivo de monitoramento de ocupação de banda baseado na utilização do SNMP e em Redes Neurais Artificiais (RNAs) para monitorar de forma permanente a interface de rede de IEDs utilizados em um SAS, de modo a diminuir a influência de uma anomalia na rede de comunicação do SAS sobre a operação daqueles equipamentos. Este sistema fará uso do parâmetro de dimensionamento obtido no Capítulo 3.

A partir desse monitoramento preditivo serão obtidos para o SP maior confiabilidade e desempenho, pois qualquer alteração na ocupação da banda dos IEDs será observada fornecendo subsídios para um melhor acompanhamento do funcionamento da rede de comunicação de dados sobre a qual ele foi estabelecido.

## 4.2 Sistema Preditivo Desenvolvido

O sistema de monitoramento preditivo de ocupação de banda foi desenvolvido com o uso das bibliotecas NET-SNMP, versão 5.7, e Fast Artificial Neural Network (FANN), versão 2.2.0, através da linguagem de programação C (Nissen, 2012; Hardaker,

2012). Esse sistema fornece uma abordagem proativa para a gestão de desempenho e falha na rede de comunicação utilizada, com o objetivo de indicar qualquer irregularidade iminente relativa a ocupação de banda dos IED. Dessa forma é possível tomar ações corretivas, com certa antecedência, visando a manter o bom desempenho dos IEDs em rede. A Figura 16 apresenta o fluxograma básico para o sistema proposto.

De forma resumida, cada elemento que constitui o sistema proposto realiza as seguintes tarefas:

- Parâmetro de Dimensionamento: A partir do parâmetro de dimensionamento obtido neste trabalho é possível aplicá-lo como elemento indicador para monitorar o desempenho das mensagens GOOSE;
- Tráfego Medido: Pelo uso do SNMP é possível obter o tráfego instantâneo de cada IED e armazená-lo sob a forma de uma série temporal para posterior utilização;
- Cálculo Ocupação Banda: A partir da medição de tráfego realizada é possível calcular a ocupação da largura de banda do IED e armazená-la em forma de uma série temporal;
- Previsão Ocupação Banda: Será projetada uma RNA que recebe como entrada a série temporal referente à ocupação de banda do IED para prever o próximo valor da ocupação
- Determinação Região Operação: Através da comparação entre o valor futuro da banda do IED e o parâmetro de dimensionamento, é determinada em qual região de operação o mesmo se encontra;
- Diagnóstico: Se o valor da banda for menor que o limiar, então a operação ocorre na região I, caso contrário, na região II, e uma possível anormalidade deve ser reportada e investigada pela operação da SE. Os valores de ocupação referentes à última ocorrência serão armazenados para análise posterior.

#### 4.2.1 Medição de Tráfego e Cálculo da Banda Utilizada

Através do protocolo SNMPv1 foram medidas, em intervalos de 1s, as MIBs *IfInOctets* e *IfOutOctets*, que determinam todos os octetos (*bytes*) que entram e saem de uma interface, respectivamente. Também foi utilizada a MIB *IfSpeed* para determinar o valor da banda nominal da interface a ser monitorada (McCloghrie e Rose, 1991).

Essas medições foram obtidas através do Switch Ethernet utilizado na monitoragem laboratorial, pois os IEDs, em sua maioria, não possuem o protocolo SNMP implementado.

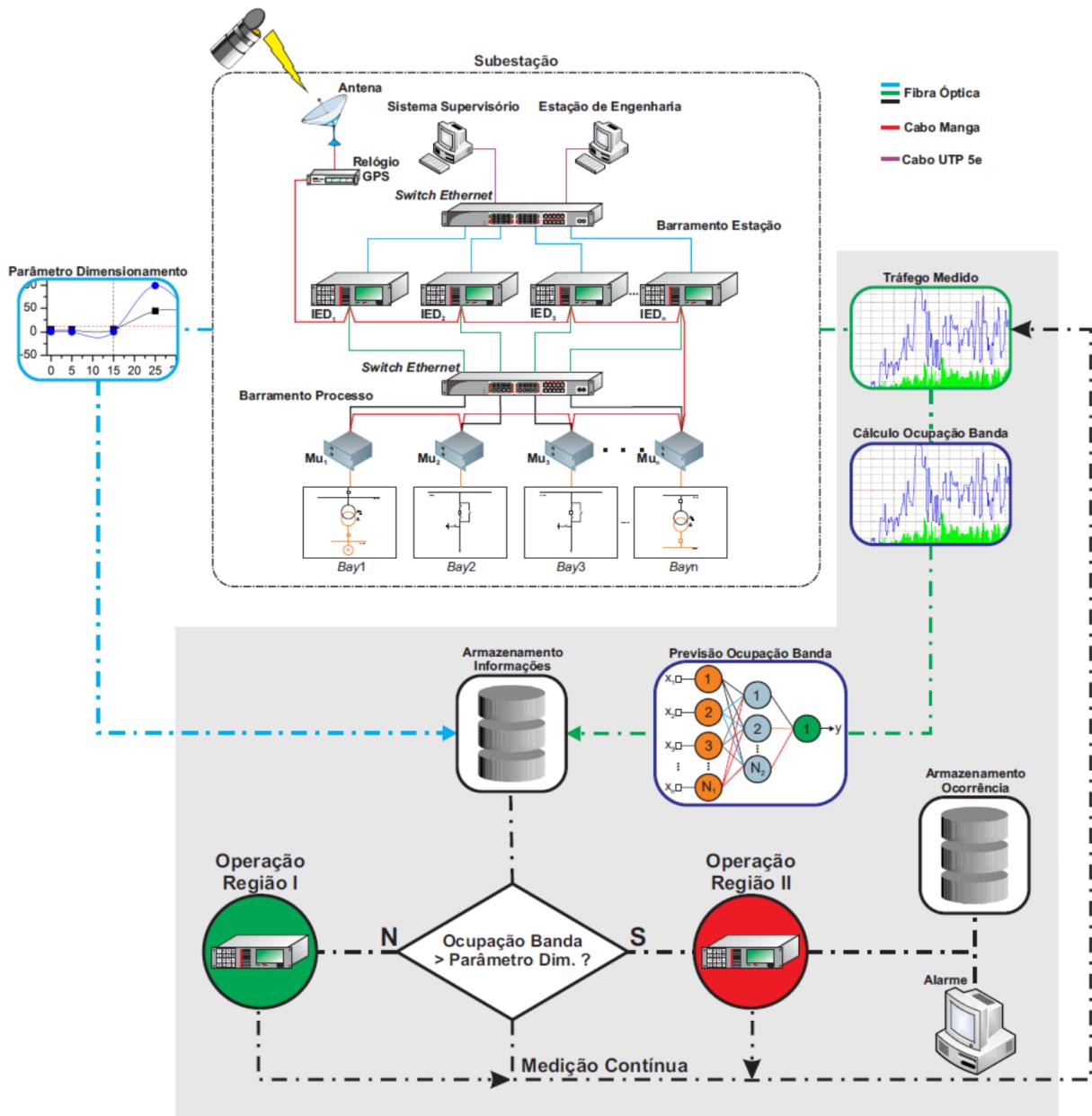


Figura 16 – Concepção para o sistema preditivo de banda. Fonte: Netto (2012)

A partir desses valores foi calculada a ocupação percentual de banda para cada interface monitorada. O cálculo, para uma interface operando em modo full-duplex pode ser realizado com os dados que entram ou saem de cada interface, de acordo com as Equações 4.1 e 4.2 (Mauro e Schmidt, 2005).

$$B_{E\%} = \frac{\Delta_{ifInOctets} \times 8 \times 100}{\Delta_t \times ifSpeed} \quad (4.1)$$

$$B_{S\%} = \frac{\Delta_{ifOutOctets} \times 8 \times 100}{\Delta_t \times ifSpeed} \quad (4.2)$$

para as quais:  $B_{E\%}$  = Ocupação percentual da banda calculada com os dados que entram na interface;  $B_{S\%}$  = Ocupação percentual da banda calculada com os dados que saem da interface;  $\Delta_t$  = Intervalo de tempo no qual a MIB utilizada é medida;  $\Delta_{ifInOctets}$  = Diferença entre dois valores consecutivos para a MIB utilizada contidos no intervalo de tempo  $\Delta_t$ ;  $\Delta_{ifOutOctets}$  = Diferença entre dois valores consecutivos para a MIB utilizada contidos no intervalo de tempo  $\Delta_t$ ;  $ifSpeed$  = Valor nominal de banda para a interface monitorada.

Esses valores compõe uma série temporal, a qual foi janelada, e então apresentada como grandeza de entrada para a RNA que fez a predição da ocupação percentual de banda.

O tamanho da janela escolhida é igual a cinco amostras com passo fixo de deslocamento de uma amostra. A Figura 17 ilustra o janelamento realizado.

#### 4.2.2 Predição da Ocupação de Banda

Nesta seção será descrito o projeto da RNA a ser utilizada para prever o próximo valor de ocupação percentual de banda a partir dos dados obtidos segundo a Seção 4.2.1.

A predição da ocupação percentual de banda foi realizada através de uma RNA com a arquitetura TDNN do tipo concentrada (Haykin, 2001). Essa arquitetura foi escolhida devido a sua simplicidade computacional.

A predição obtida é de um passo à frente, ou seja, o valor da ocupação percentual de banda para o próximo instante de tempo medido será obtida. No caso desta pesquisa será fornecido o valor de banda referente ao próximo segundo.

Os padrões de treinamento e teste para a RNA foram obtidos a partir da montagem em laboratório do aparato apresentado na Figura 18. Esta montagem foi utilizada também para testar o funcionamento do sistema proposto. Neste esquema, foram medidos 19 patamares ( $N=19$ ) de carregamento da rede com as características definidas na seção 5.2, então formatados segundo a Figura 18 e o Algoritmo 1.

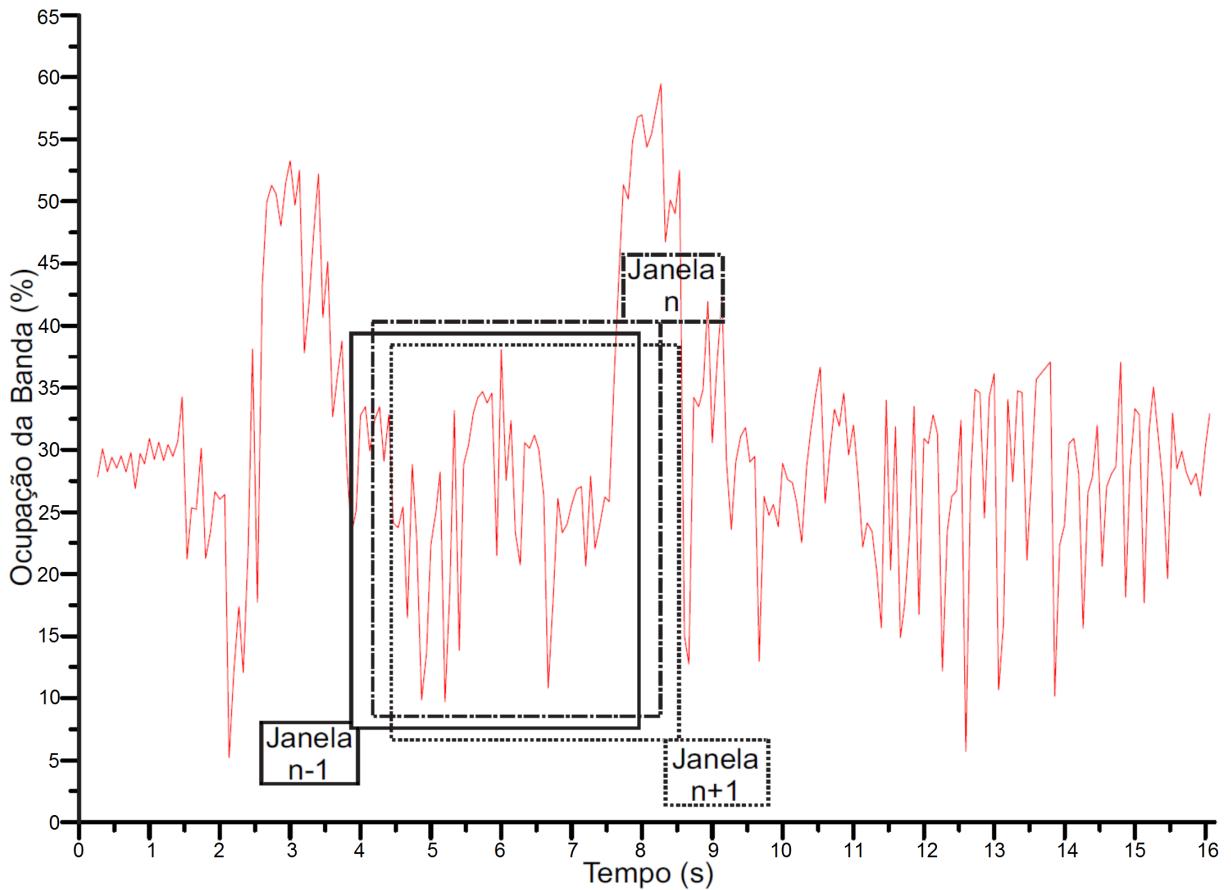


Figura 17 – Janelamento da série temporal para apresentação à RNA.

Para a finalidade de análise de tráfego, a topologia em estrela é a melhor representação pois os IEDs estão interconectados através de um único enlace de rede.

Foram utilizados 1.754 (40%) padrões para treinamento e 2.610 (60%) padrões para teste da RNA, os quais contém valores de ocupação de banda entre 5 e 95% do valor nominal da interface monitorada. Os dados de entrada foram normalizados segundo o teorema de Tales, o qual pode ser observado na Equação 4.3 (da Silva et al., 2010):

$$z = \frac{x - x^{\min}}{x^{\max} - x^{\min}} \quad (4.3)$$

para a qual:  $z$  = valor convertido para o domínio proporcional 0 e 1;  $x$  = Valor a ser convertido;  $x^{\min}$  = Menor valor  $x$ ;  $x^{\max}$  = Maior valor de  $x$ .

A formação dos conjuntos de treinamento e teste representa uma etapa importante no projeto de uma RNA pois, a partir da reunião de informações representativas das situações prováveis pelas quais as variáveis necessárias a modelagem do problema podem ser submetidas, a rede será capaz de extrair o conhecimento necessário desse conjunto a generalizar as soluções, fornecendo respostas adequadas para cada

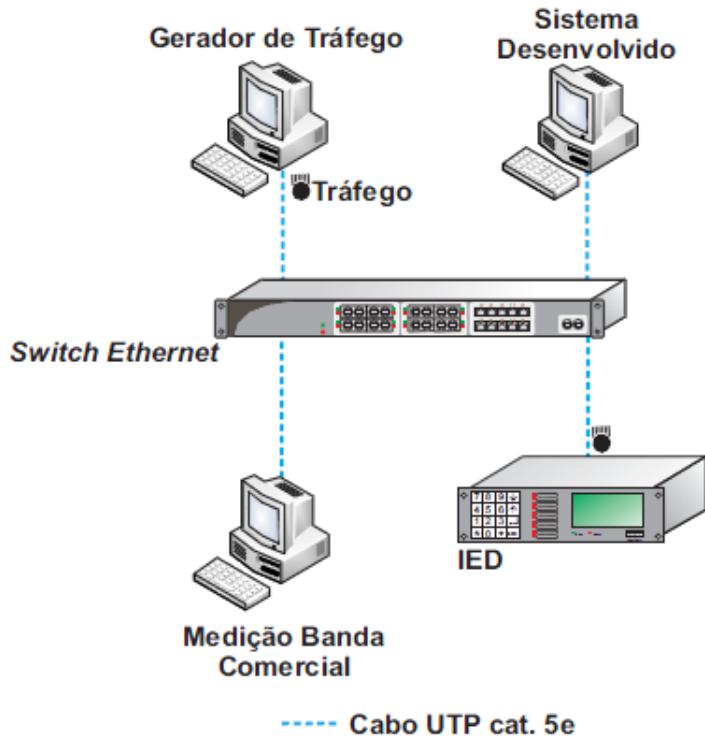


Figura 18 – Esquema laboratorial utilizado. Fonte: Netto (2012)

novo padrão apresentado (da Silva et al., 2010).

A Figura 19 e o algoritmo da Figura 20 apresentam a forma pela qual foram formatados os arquivos de treinamento e teste. Para cada patamar de tráfego medido, inicialmente, é verificado se os dados obtidos estão dentro de uma faixa de valores representativos. Essa ação é necessária para retirada de valores espúrios dos futuros conjuntos de treinamento e teste. Em seguida as amostras são normalizadas, através do teorema de tales, e os valores máximos e mínimos de cada patamar de banda medido são determinados. A partir disso, é utilizado o algoritmo da Figura 20 para separar o conjunto de treinamento, contendo uma janela de dados com os valores máximos e mínimos de cada patamar medido do conjunto de teste correspondente. Esse algoritmo ainda trata algumas situações relativas à formação dos conjuntos de treinamento, conforme a Figura 21.

Para a Figura 19:  $N$  = Número de patamares de ocupação de banda utilizados no processo de treinamento e teste;  $K_{min}$  = Posição da menor amostra relativa ao vetor de  $Amostras_K$ ;  $K_{max}$  = Posição da maior amostra relativa ao vetor de  $Amostras_K$ ;  $K$  = Posição da amostra relativa ao vetor de  $Amostras_K$ ;  $L$  = Tamanho do vetor de  $Amostras_K$ ;  $P$  = Valor nominal do patamar de ocupação  $N$ ;  $Amostras_K$  = Valor da amostra na posição  $K$  relativa ao vetor de amostras do patamar  $N$ .

Para o algoritmo da Figura 20, tem-se:

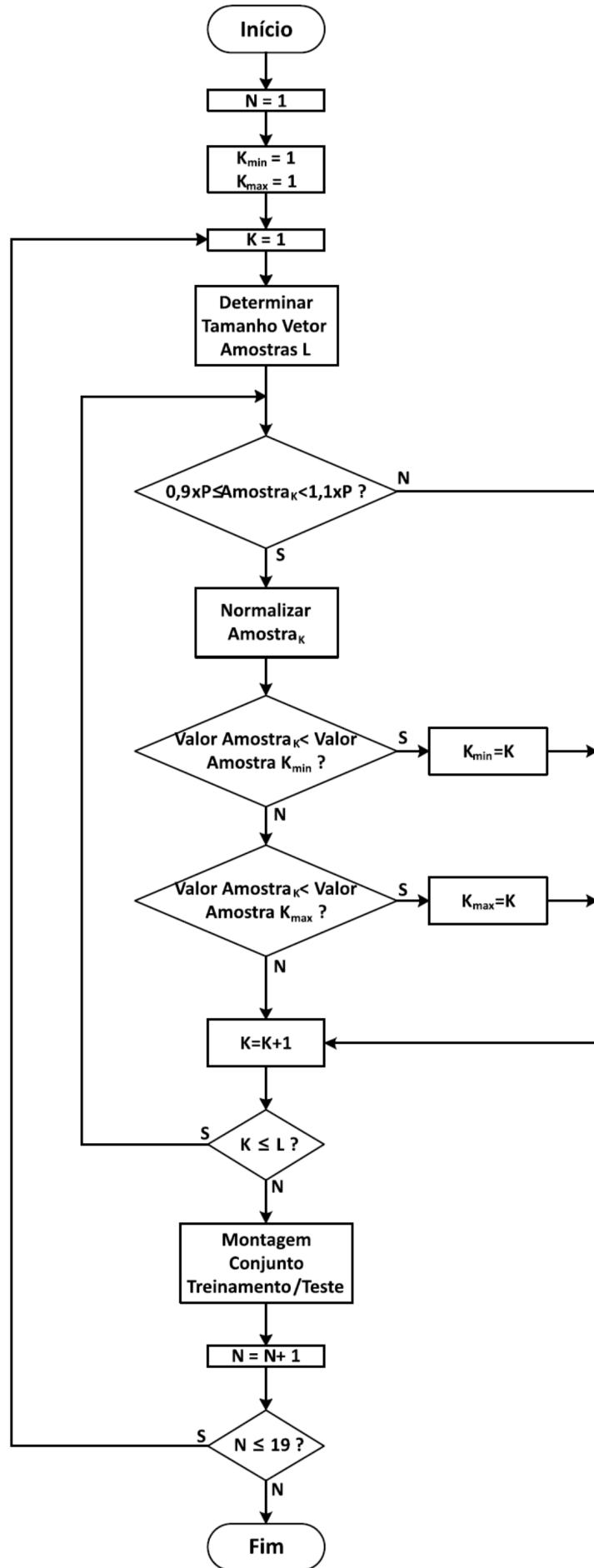


Figura 19 – Formação dos conjuntos de treinamento e teste para a RNA. Fonte: Netto (2012)

**Início**

```

Dados: Vetor de AmostrasK com Tamanho L para o patamar N;
se  $K_{max} < K_{min}$  então // 1
  |  $K_{temp} = K_{max}$ ;
  |  $K_{max} = K_{min}$ ;
  |  $K_{min} = K_{temp}$ ;
fim
enquanto  $K_{min} < 0,4 \times L/4$  faça // 2
  |  $K_{min} = K_{min} + 1$ ;
fim
enquanto  $K_{max} + 0,4 \times L/4 > L$  faça // 3
  |  $K_{max} = K_{max} - 1$ ;
fim
enquanto  $K_{max} - 0,4 \times L/4 < K_{min} + 0,4 \times L/4$  faça // 4
  | se  $K_{min} - 0,4 \times L/4 < L - (K_{max} + 0,4 \times L/4)$  então // 5
  |   |  $K_{max} = K_{max} + 1$ ;
  | senão
  |   |  $K_{min} = K_{min} - 1$ ;
  | fim
fim
Resultado: Conjunto de Treinamento = {[ $K_{min} - 0,4 \times L/4$ ;  

 $K_{min} + 0,4 \times L/4$ ]; [ $K_{max} - 0,4 \times L/4$  ;  $K_{max} + 0,4 \times L/4$ ]};

Resultado: Conjunto de Teste = {[1 ;  $K_{min} - 0,4 \times L/4$ ] + [ $K_{min} + 0,4 \times L/4$  ;  $K_{max} - 0,4 \times L/4$ ] + [ $K_{max} + 0,4 \times L/4$  ; L]};

Fim

```

Figura 20 – Montagem Conjuntos Treinamento/Teste. Fonte: Netto (2012)

1. Se  $K_{max} < K_{min}$ , troca-se seus valores. Para as etapas abaixo, não importa qual deles realmente é o índice da maior ou da menor amostra, apenas se deseja que ambas estejam presentes no conjunto de treinamento. Nesse caso, para não ter que executar duas vezes cada instrução (uma para  $K_{max} < K_{min}$  e outra para  $K_{min} \geq K_{max}$ ), é forçado que  $K_{max} < K_{min}$ , usando uma variável temporária  $K_{temp}$  para armazenar  $K_{max}$  enquanto efetuamos a troca;
2. Se a faixa dos valores em torno de  $K_{min}$  excede a primeira posição;
3. Se a faixa dos valores em torno de  $K_{max}$  excede a última posição;
4. Se as faixas de  $K_{min}$  e  $K_{max}$  se sobrepõem;
5. Se  $K_{min}$  está mais próximo de 1 do que  $K_{max}$  de L.

Na Figura 21, tem-se uma representação visual dos procedimentos realizados pelo Algoritmo. Os retângulos representam os vetores que armazenam o conjunto de todas as amostras. A barra vertical à esquerda representa a posição do vetor indexada por  $K_{min}$ , e a barra vertical à direita representa a posição indexada por  $K_{max}$ .

1. A faixa de amostras ao redor de  $K_{min}$  excede os limites inferiores do vetor, sendo necessário aumentar  $K_{min}$  até que toda sua faixa de amostras esteja compreendida numa área válida do vetor.
2. A faixa de amostras ao redor de  $K_{max}$  excede os limites superiores do vetor, sendo necessário diminuir  $K_{max}$  até que toda sua faixa de amostras esteja compreendida numa área válida do vetor.
3. As duas faixas de amostras se sobrepõem. Como a distância de  $K_{max}$  a L é maior que a distância de  $K_{min}$  a 1, aumentamos  $K_{max}$  até que não haja mais sobreposição.
4. As duas faixas de amostras se sobrepõem. Como a distância de  $K_{min}$  a 1 é maior que a distância de  $K_{max}$  a L, diminuímos  $K_{min}$  até que não haja mais sobreposição.
5. Representação do que seria uma configuração válida do vetor de amostras para gerar o vetor de treinamento e o de teste.

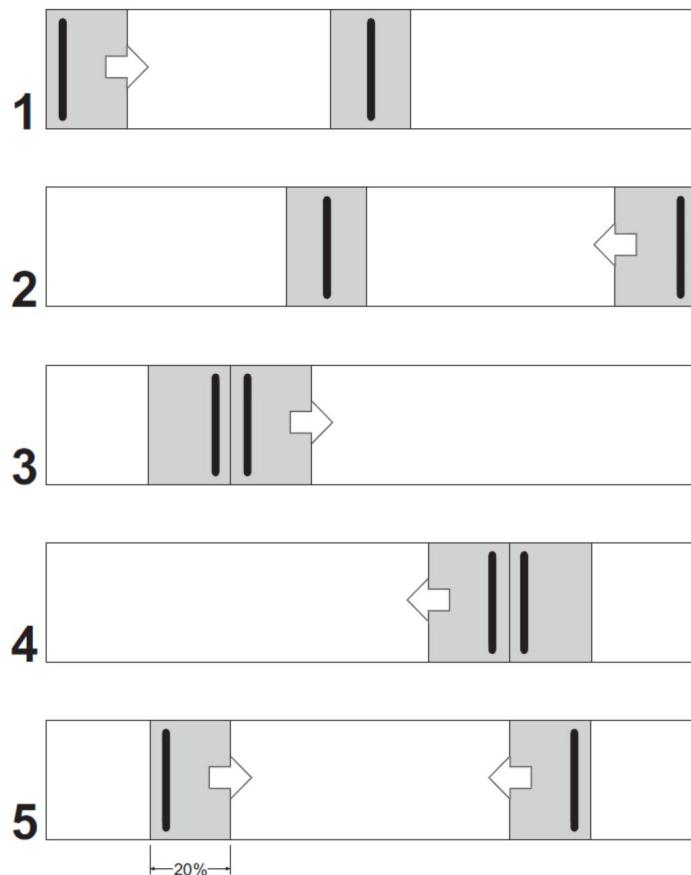


Figura 21 – Representação para a separação dos valores que compõe os conjuntos de treinamento/teste. Fonte: Netto (2012)

Os dados de treinamento foram aplicados ao algoritmo de treinamento *Resilient-Propagation* (Rprop), com *momentum* ( $\alpha$ ) igual a 0,3, taxa de aprendizagem ( $\eta$ ) igual a 0,02 e função de ativação sigmoide ( $\beta = 0,5$ ) para todas as camadas neurais (Riedmiller. 1994).

A topologia obtida possui cinco entradas na primeira camada, correspondentes aos cinco últimos valores de ocupação de banda medidos entre intervalos de 1s na rede de comunicação de dados, em ordem cronológica e normalizados para o intervalo [-1, 1], dez neurônios na primeira camada escondida, quinze neurônios na segunda camada escondida e um neurônio na camada de saída, correspondente ao valor de ocupação de banda previsto para o próximo segundo, conforme a Figura 22. Esta topologia foi obtida de maneira experimental, testando-se diversas configurações distintas a fim de se obter um resultado otimizado.

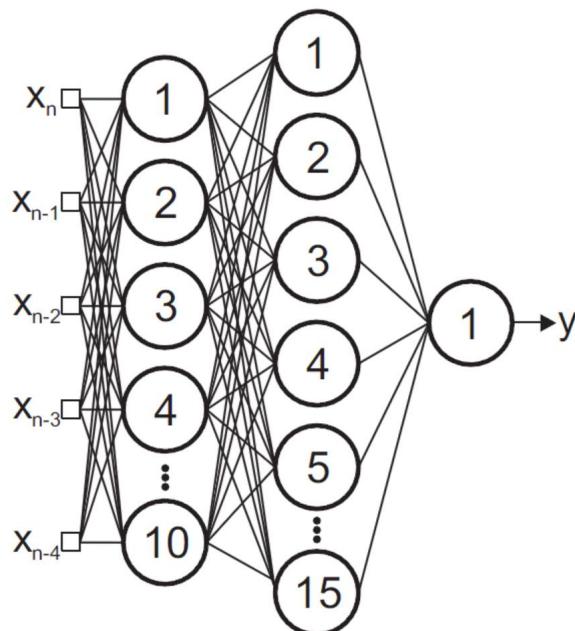


Figura 22 – Topologia para a RNA utilizada. Fonte: Netto (2012)

#### 4.2.3 Registro de Ocorrência

O valor da ocupação percentual de banda previsto pela RNA é comparado com um limiar previamente ajustado pelo usuário. Quando o valor de banda for superior ao limiar definido, então, um registro de ocorrência é gerado para posterior análise, conforme a Figura 23.

```
*****
Relatório Ocorrência Rede IEDs
*****
Data: 01/01/2012
Horário: 13:20:05
Interface Monitorada: IED1 - IP:192.168.0.31 - Porta: A1
*****
Horário (HH:MM:SS) MIB Valor Banda (%)
-----
13:19:57 IfOutOctets 65,23
13:19:58 IfOutOctets 65,47
13:19:59 IfOutOctets 66,60
13:20:00 IfOutOctets 66,53
13:20:01 IfOutOctets 65,79
13:20:02 IfOutOctets 66,43
13:20:03 IfOutOctets 68,17
13:20:04 IfOutOctets 67,08
13:20:05 IfOutOctets 67,21
13:20:06 IfOutOctets 66,23
13:20:07 IfOutOctets 66,67
.
.
.
-----
Fim Ocorrência
*****
```

Figura 23 – Exemplo de relatório de ocorrência. Fonte: Netto (2012)

## 4.3 Resultados e Discussões

Nesta seção são apresentados os resultados referentes a medição e predição de ocupação percentual de banda através do sistema desenvolvido.

#### 4.3.1 Medição e Cálculo do Percentual de Ocupação de Banda

Foi utilizado o aplicativo de software WAN Killer, versão 9.2.0.47, para geração do tráfego utilizado para ocupar a interface do IED monitorado, conforme a Figura 18 (Solarwinds, 2009).

Para criar esse tráfego foi utilizado o protocolo da camada de transporte UDP. Cada pacote enviado foi configurado com tamanho igual a 1496 bytes e a quantidade de pacotes por segundo gerados foi ajustada para representar o carregamento percentual da velocidade nominal do enlace utilizado, neste caso 100Mbps (Forouzan, 2007).

O monitoramento da ocupação percentual de banda foi realizado através do *SNMP Real Time Graph*, versão 9.2.0.47, e do sistema desenvolvido nesta pesquisa, com o intuito de comparar os resultados obtidos com aqueles provenientes de uma ferramenta comercial (Solarwinds, 2009).

A análise dos resultados da determinação da ocupação percentual de banda, apresentados na Tabela 7, mostra que o sistema desenvolvido mediu corretamente os valores de banda caracterizados, além disso seu desempenho é tão bom quanto aquele obtido com a ferramenta comercial utilizada, pois o erro relativo médio de validação da

medição é igual a 0,55%.

Tabela 7 – Comparação da ocupação percentual de banda nominal (BN).

Métrica	5%		15%		25%		35%		45%		55%		65%		75%	
	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.
$\bar{x}$	5,12	5,15	15,32	15,36	25,42	25,60	35,42	35,67	45,84	46,07	55,97	56,29	66,73	66,99	76,02	76,60
s	0,0029	0,0032	0,11	0,13	0,34	0,22	0,45	0,32	0,35	0,53	0,51	0,67	1,18	1,006	0,43	0,70
Min	5,033	5,058	14,90	14,56	22,59	24,54	31,67	34,55	45,045	42,72	53,73	52,10	63,74	64,44	74,72	75,39
Max	5,230	5,24	15,80	15,79	26,19	26,32	36,60	36,74	46,73	47,61	58,22	57,71	69,59	69,96	76,88	78,44

Para a qual:  $\bar{x}$ =Valor médio da ocupação percentual de banda; s = Desvio padrão para a ocupação percentual de banda; Min=Menor valor para ocupação de banda; Max=Maior valor para ocupação de banda; Des.=Sistema desenvolvido; Com.=Sistema comercial.

#### 4.3.2 Predição do Percentual de Ocupação de Banda

Nesta seção são discutidos os resultados da predição obtida com a RNA projetada. Esses são divididos em gráficos que comparam o valor desejado da série temporal para um patamar de carregamento e aquele obtido com a RNA, bem como o histograma de erro relativo percentual correspondente a cada patamar de predição da rede.

As Figuras 24 e 25 apresentam o resultado da predição de banda para todo o conjunto de teste utilizado. Quanto à qualidade da predição, a partir da análise da Figura 25, observa-se que 91,30% das amostras da série temporal apresentadas à RNA possuem um erro relativo de validação inferior a 3%, enquanto 8,24% das amostras utilizadas possuem um erro entre 5 e 10%, e apenas 0,456% das amostras da série temporal possuem um erro superior a 10%.

As Figuras 26 e 27 apresentam os resultados da predição realizada pela RNA projetada para o patamar de 35% de ocupação da interface do IED monitorado, a fim de exemplificar como foram analisados individualmente os diferentes patamares.

A Tabela 8 resume os resultados referentes à predição de ocupação de banda. Observa-se que a RNA foi capaz, a partir do conjunto de treinamento, de modelar o comportamento da série temporal que representa a ocupação percentual de banda relativa à interface do IED monitorado, pois a tendência da série que descreve tal ocupação foi adequadamente generalizada.

Tabela 8 – Percentual de acerto da predição.

Banda Nominal (BN) = 100Mbps					
Erro (%)	15% BN	35% BN	55% BN	75% BN	95% BN
$\leq 3$	88,72	150,44	539,60	4,17	48,57
$> 3$	94,51	152,21	531,11	3,86	48,57

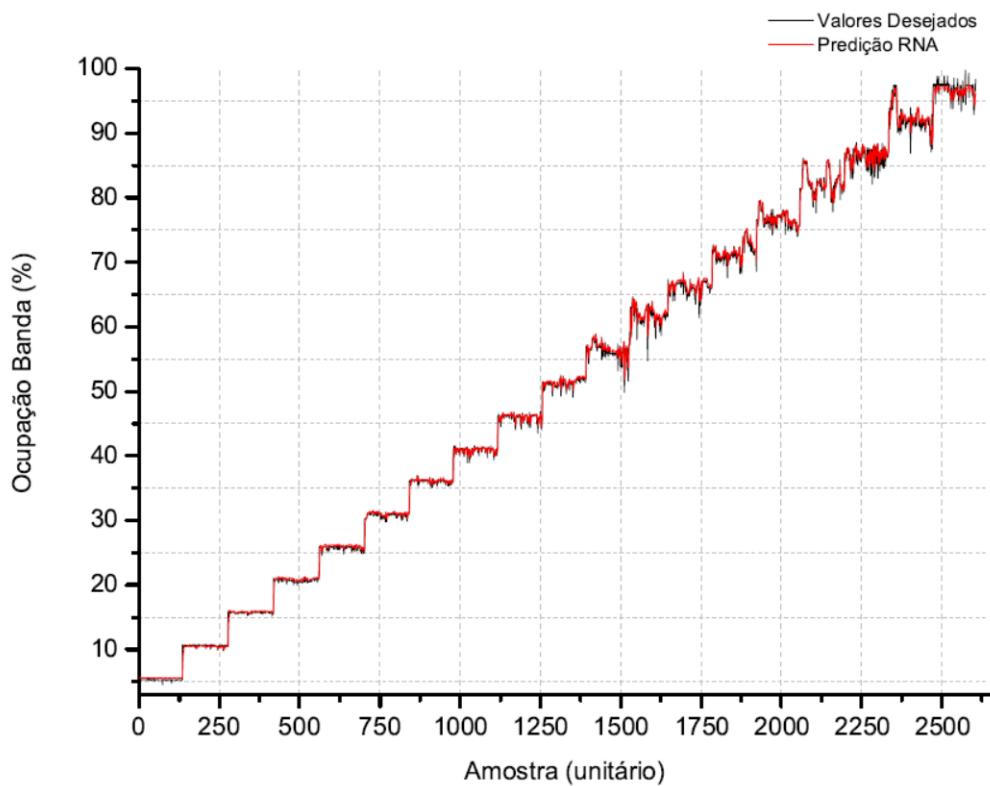


Figura 24 – Resultado da predição para todo o conjunto de teste. Fonte: Netto (2012)

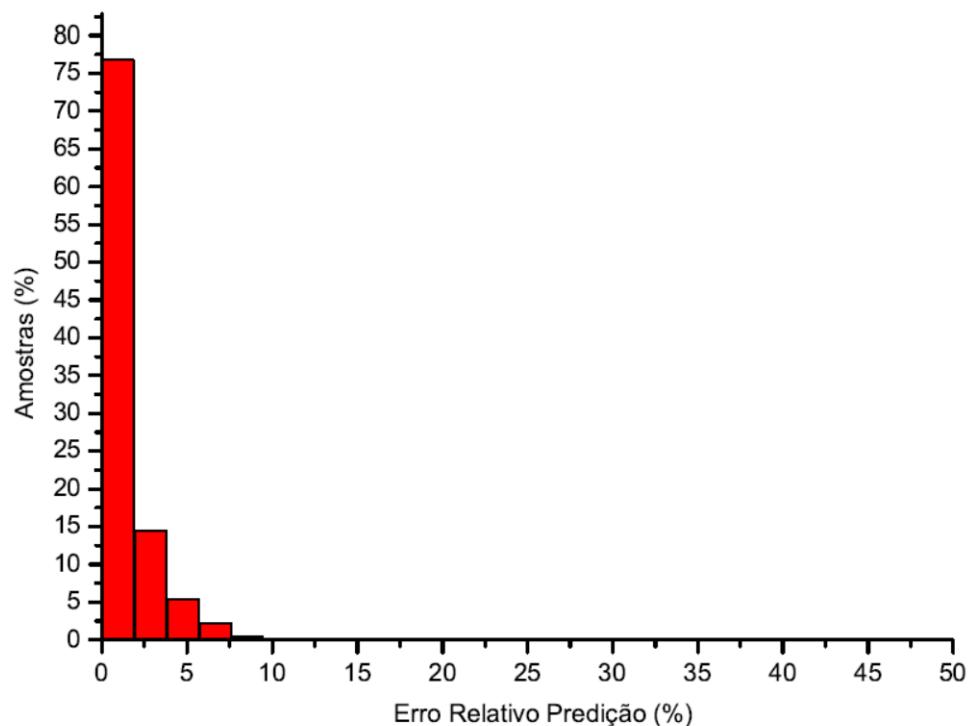


Figura 25 – Histograma para o erro relativo percentual da predição de banda para todo o conjunto de teste. Fonte: Netto (2012)

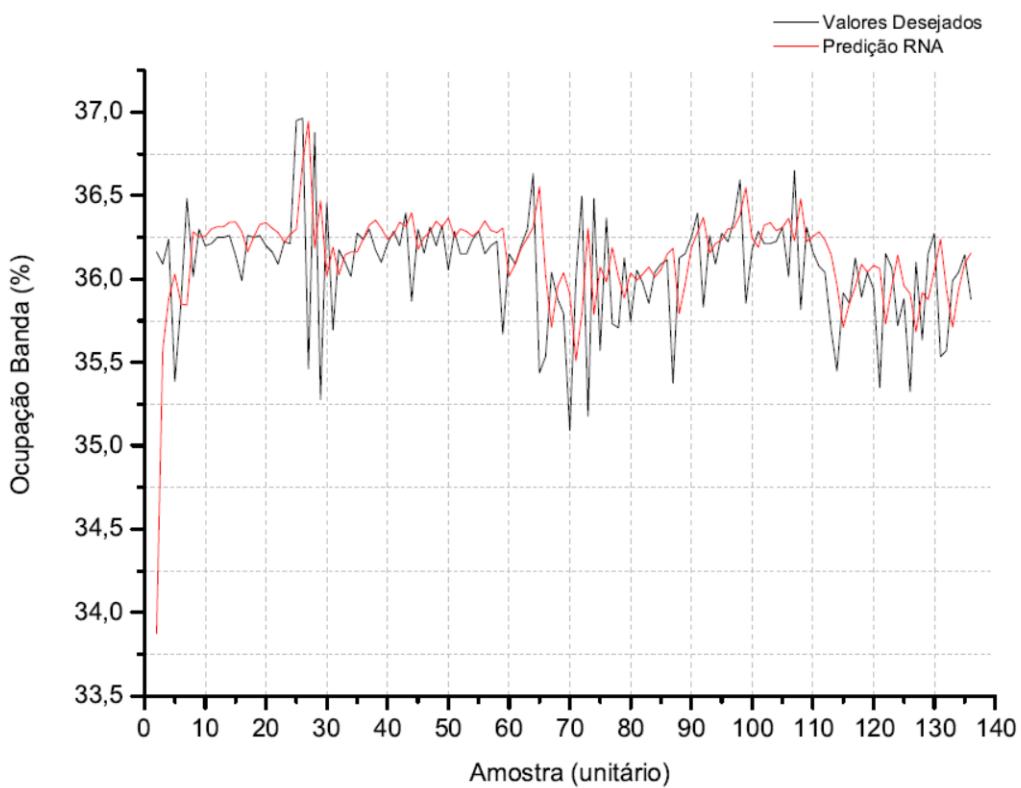


Figura 26 – Resultado da predição para 35% de ocupação de banda. Fonte: Netto (2012)

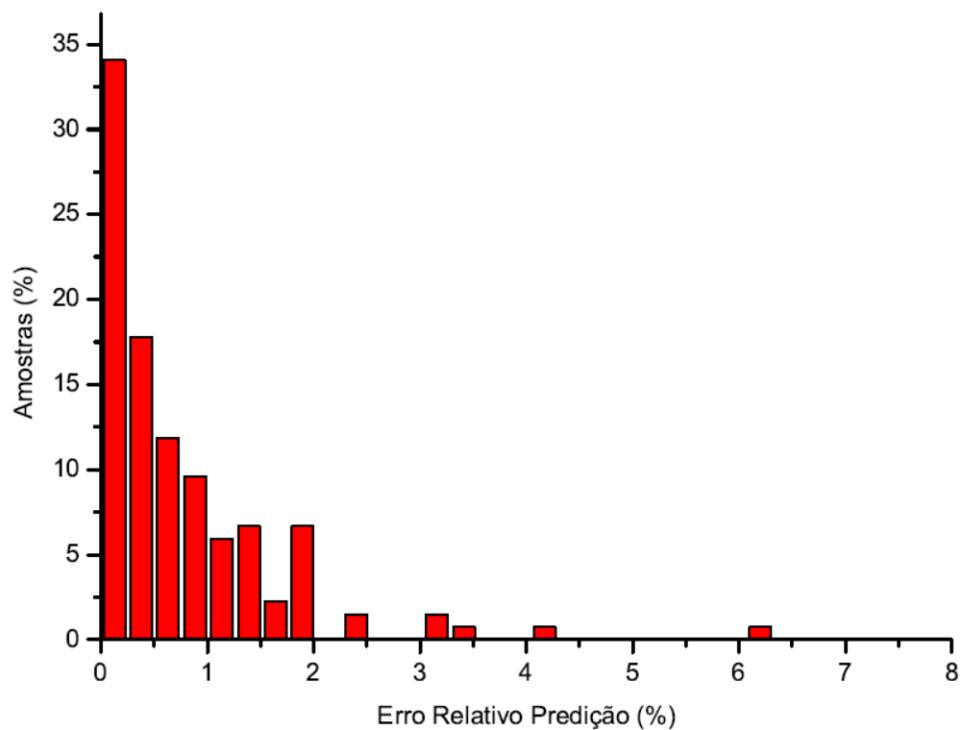


Figura 27 – Histograma para o erro relativo percentual referente a predição de 35% de ocupação de banda. Fonte: Netto (2012)

## 4.4 Interface Gráfica

Foi desenvolvida uma interface gráfica para agregar o sistema de predição de banda apresentado, com o objetivo de facilitar a visualização da ocupação de banda, sua predição, inserção do parâmetro de dimensionamento obtido e a análise de ocorrências. Essa interface tem como diretrizes principais assegurar ao usuário facilidade na utilização e boa organização do aplicativo desenvolvido. Para tanto, foi utilizado o *framework Qt Creator IDE*, versão 2.4.1, e *Qt libraries*, versão 4.8.1., mediante a linguagem de programação C++ (*Frameworks*, 2012). Como compilador, utilizou-se o GCC (GNU *Compiler Collection*) versão 4.3.6.

Segundo Barbosa (2010), as principais características do framework utilizado são:

1. Ser multiplataforma, tornando possível o desenvolvimento de aplicativos para desktops, sob os sistemas operacionais Windows, Linux/X11 e Mac OS X, e dispositivos móveis como *smartphones* e *tablets*;
2. Possuir um ambiente integrado para projeto, desenvolvimento, depuração, simulação e documentação de aplicações;
3. Fornecer suporte às linguagens C++ e JavaScript, de forma a aproveitar intrinsecamente as características das mesmas;
4. Possuir um conjunto completo de classes e métodos prontos para serem utilizados mesmo na programação não gráfica;
5. Possuir grande documentação, exemplos e base de usuários.

A seguir, será apresentada a interface gráfica desenvolvida, com foco em seus principais elementos de interação com o usuário.

A tela inicial do sistema, apresentada na Figura 28, possui os menus *Arquivo*, *Editar*, *Ajuda*, a barra de tarefas principal do sistema desenvolvido e sua área de trabalho. Nesta, é possível iniciar o monitoramento de uma interface, a predição de ocupação de banda, inserir o parâmetro de dimensionamento, verificar a região de operação do IED, iniciar a gravação de dados pelo usuário e encerrar o aplicativo.

A Figura 29 apresenta a seleção do agente SNMP a ser monitorado. Nesta tela é inserido o endereço IP do agente e escolhida a MIB utilizada para medição. Nesta versão do sistema de monitoramento apenas as MIBs *IfInOctets* e *IfOutOctets* estão disponíveis.



Figura 28 – Tela inicial para o sistema desenvolvido. Fonte: Netto (2012)

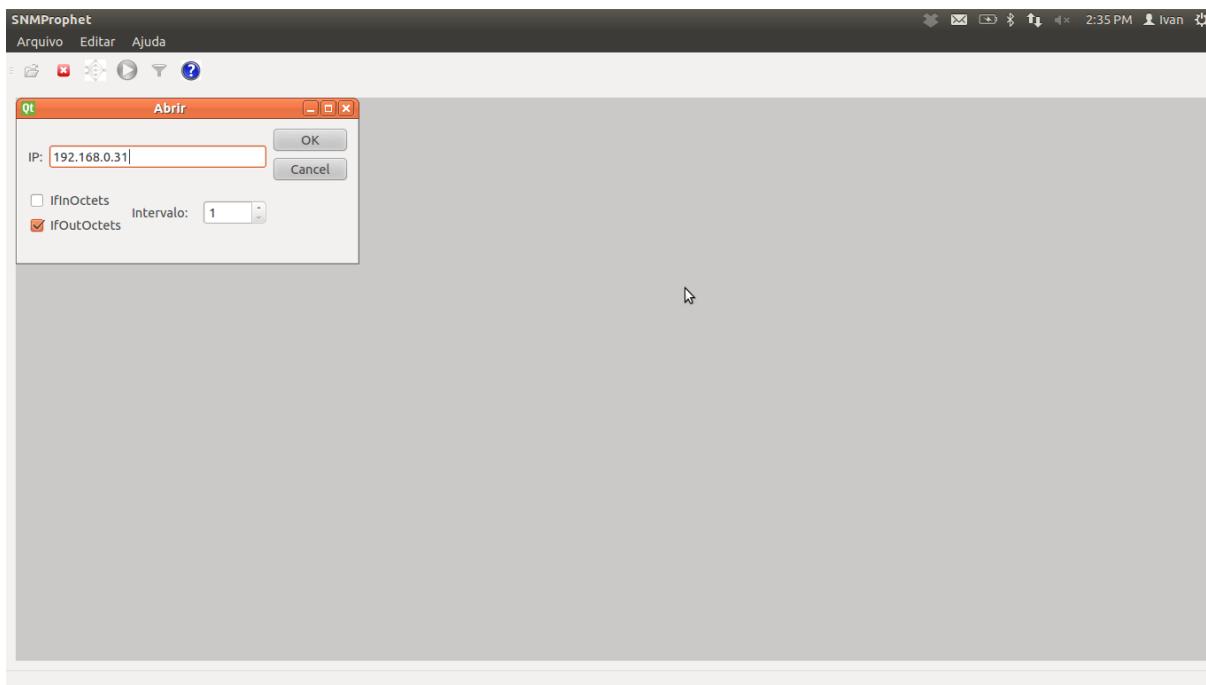


Figura 29 – Seleção do agente a ser monitorado. Fonte: Netto (2012)

Uma vez escolhido o agente a ser acompanhado e a MIB a ser utilizada, serão listadas todas as interfaces disponíveis para monitoramento, conforme a Figura 30. Neste aplicativo é possível observar mais de uma interface ao mesmo tempo.

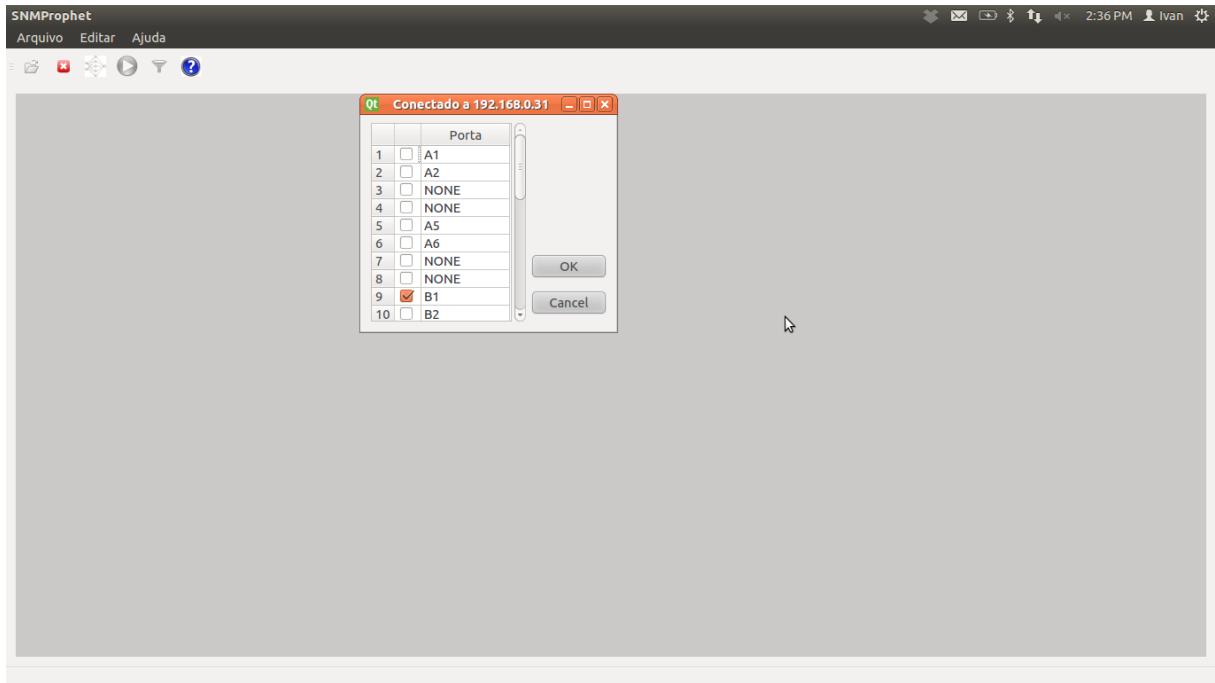


Figura 30 – Seleção da interface a ser monitorada. Fonte: Netto (2012)

Realizados os passos anteriores é exibida a medição da interface selecionada para um determinado agente, conforme a Figura 61. Esta tela contém o título do gráfico, endereço IP do agente, nome da interface monitorada, legenda para a MIB medida, uma barra de estado que apresenta o valor instantâneo da ocupação de banda com sua estampa de tempo correspondente e o gráfico de medição propriamente dito (Ocupação de banda vs Tempo). Como mais de uma interface pode ser medida ao mesmo tempo, mais de um gráfico pode ser apresentado simultaneamente.

A predição da ocupação de banda é feita em um gráfico análogo ao da medição, apresentado na Figura 61, porém separado daquele, conforme a Figura 62.

Após o início do monitoramento de uma interface é possível inserir o parâmetro de dimensionamento obtido, conforme a Figura 63, para determinar em qual região de operação o IED se encontra. Tanto os valores medidos quanto aqueles preditos para a ocupação de banda podem ser comparados com o parâmetro de dimensionamento obtido. Além disso, o usuário nomeia um arquivo que fará o registro de ocorrência, conforme mencionado na Item 4.5.3.

A Figura 64 apresenta a tela de monitoramento da região de operação do IED. Ela contém a estampa de tempo e o valor de ocupação percentual de banda da interface

monitorada, além de sinalizar em qual região o IED está operando. A partir dos dados contidos nesta tela é gerado o relatório de ocorrência.

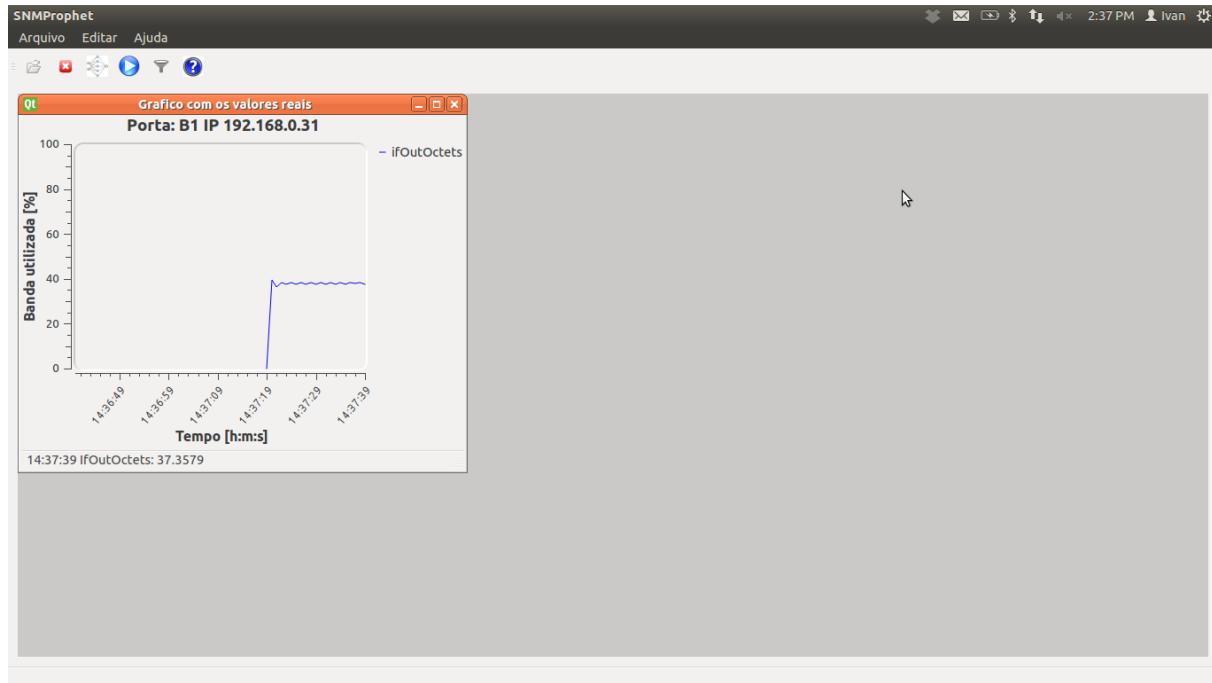


Figura 31 – Medição da interface monitorada. Fonte: Netto (2012)

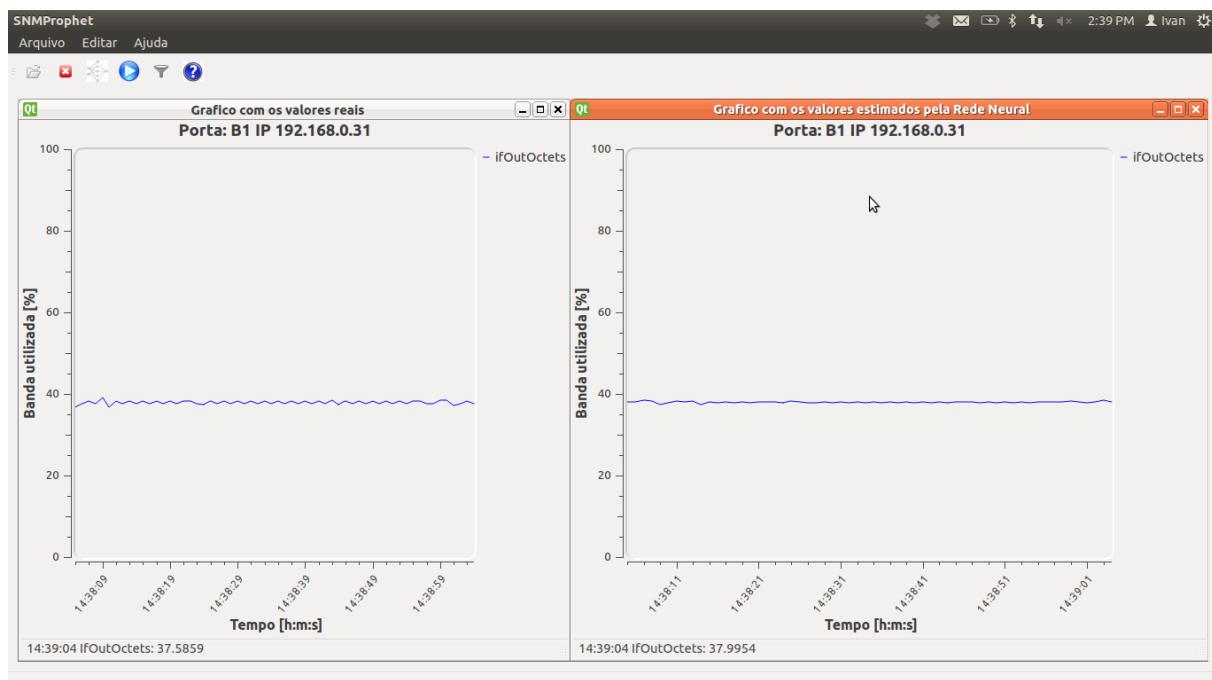


Figura 32 – Predição para a interface monitorada. Fonte: Netto (2012)

Por fim, a Figura 35 apresenta a funcionalidade de gravação implementada. Uma vez iniciada a medição, é permitido ao usuário gravar dados que sejam de



Figura 33 – Inserção do parâmetro de dimensionamento. Fonte: Netto (2012)

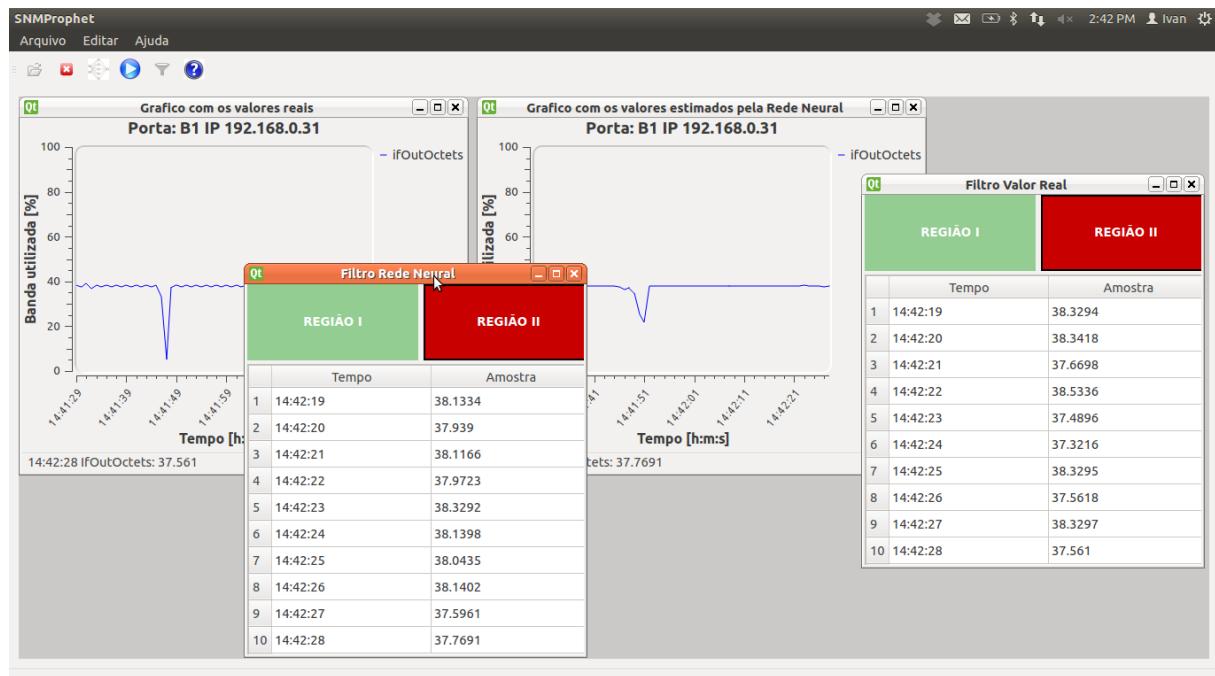


Figura 34 – Monitoramento na região de operação 2. Fonte: Netto (2012)

seu interesse, como os valores atuais da ocupação de banda ou os valores futuros obtidos pela predição da RNA. Além disso, o usuário pode escolher um intervalo de amostragem, o qual pode ser diferente do intervalo usado na medição, e o número de amostras que irão compor esse registro.

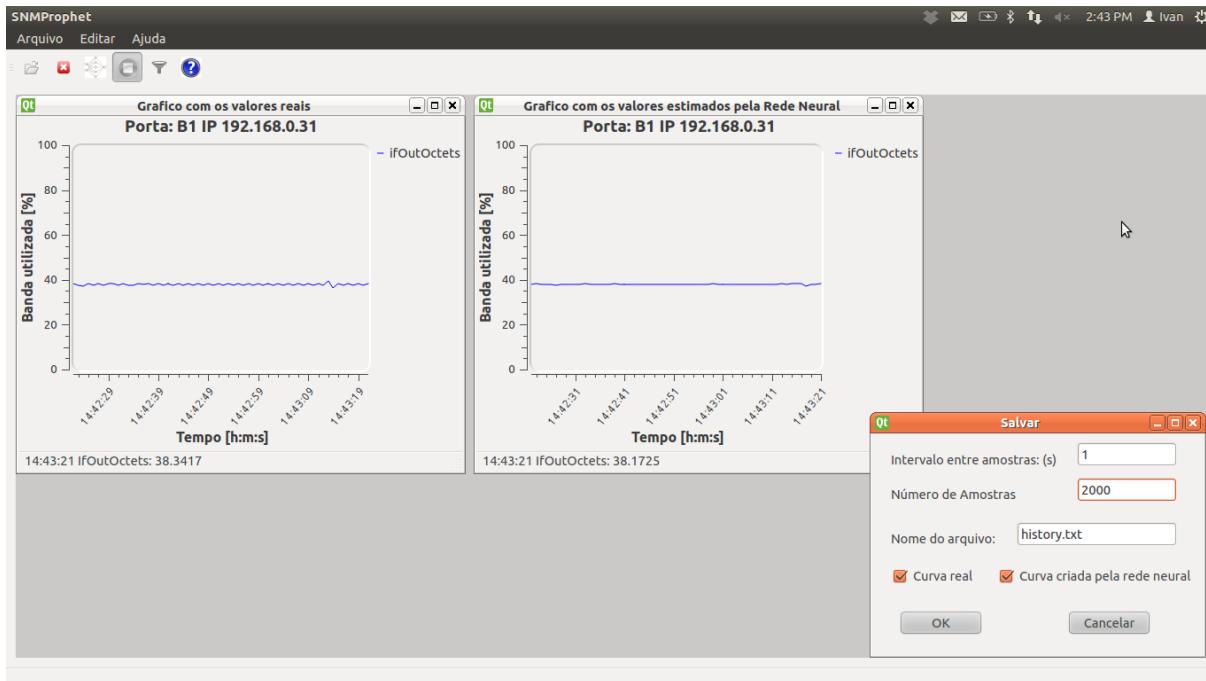


Figura 35 – Gravação de dados pelo usuário. Fonte: Netto (2012)

## 4.5 Comentários Finais

O parâmetro de dimensionamento estudado neste trabalho foi utilizado como elemento discriminante para o desempenho do tempo de transferência de mensagens GOOSE. A partir desse dado foi desenvolvido o sistema preditivo apresentado.

As bibliotecas NET-SNMP, libFANN e o *framework Qt Creator IDE* e *Qt libraries* são adequadas para o sistema desenvolvido, devido a sua constante atualização, estabilidade, características e documentação disponíveis. Além disso, essas bibliotecas são gratuitas e executadas no sistema operacional GNU/Linux em uma plataforma de *hardware* do tipo PC, tornando o sistema em questão uma alternativa de baixo custo para o tipo de monitoramento desejado.

A interface com o usuário não requer treinamento extensivo e possui todos os elementos necessários a utilização do sistema preditivo proposto, o que facilita o monitoramento da rede.

Os resultados, tanto da medição quanto da predição foram corretos e apresentaram bom desempenho, pois tanto o erro de medição quanto o erro de predição são

baixos, 0,55% e 3% (para 91,30% das amostras), respectivamente. Dessa forma, vê-se que o sistema desenvolvido é adequado a seu propósito.



# 5 Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre os resultados dos ensaios e sobre o sistema preditivo de monitoramento de banda desenvolvido.

## 5.1 Comentários Finais Sobre o Parâmetro de Dimensionamento

Desde que o padrão IEC 61850 começou a ser fornecido comercialmente, incluído em IEDs, o número de SEs que o utilizam, em âmbito mundial, tem aumentado a cada ano devido aos benefícios e possibilidades trazidas consigo. Dessa forma, esta pesquisa se insere em um tema contemporâneo de grande interesse pelos profissionais envolvidos com atividades relativas ao SEP e contribui para a construção do conhecimento sobre aquele padrão de comunicação.

Esta pesquisa apresentou um parâmetro de dimensionamento e avaliação de desempenho para as mensagens GOOSE, obtido através da análise das grandezas de interesse definidas, que são o desvio padrão, o valor máximo, o valor mínimo e a média para o tempo de transferência, além da contabilização do total de mensagens extraviadas. Esse parâmetro representa relevante contribuição para aplicações práticas do padrão IEC 61850.

Os resultados exprimem o comportamento do tempo de transferência sob as condições caracterizadas. Em linhas gerais, observa-se na Seção 3.3 a existência de duas regiões com comportamentos distintos para o tempo de transferência, desvio padrão, valores máximo e mínimo e perda de mensagens, conforme as discussões apresentadas.

A primeira região representa uma área de operação desejável, para a qual não há perda de pacotes, com baixo desvio padrão e sem infração da referência determinada pelo padrão IEC61850 para o tempo de transferência. A outra representa uma área de operação não desejável, para a qual existe violação da referência estabelecida, perda acentuada de mensagens e alto desvio padrão e valor máximo, implicando em possível degradação do funcionamento do SP, tal como perda de coordenação e seletividade.

A constatação das regiões mencionadas é um dado relevante para a especificação dos IEDs, pois, o limiar entre as regiões I e II pode ser traduzido em um parâmetro de dimensionamento e avaliação para dispositivos distintos, sendo o de

melhor desempenho o que possuir a maior região de operação desejável, ou seja, aquele capaz de manter o tempo de transferência abaixo da referência determinada, para um maior valor percentual de ocupação de sua banda nominal.

O estabelecimento do aparato experimental visto no Capítulo 2 representa uma contribuição de interesse para estudos relativos ao padrão IEC 61850 por ser constituído por dispositivos comerciais aplicados à construção de SPs e do SASs, de modo que, quaisquer aproximações e/ou imprecisões encontradas em estudos similares conduzidos em ambiente de simulação computacional aqui não existem, fazendo com que os resultados sejam fidedignos ao que se pode encontrar em uma instalação real.

A metodologia utilizada para a realização das análises apresentadas no Capítulo 2 é de fácil implantação e utilização e pode compor o PIT dos IEDs. Essa metodologia desenvolvida é generalista e representa uma relevante contribuição deste trabalho, pois, a partir de seu uso, importantes informações de dimensionamento e escolha de IEDs estão disponíveis para utilização em projetos de SP.

Pelos resultados, constata-se que a configuração de pesos para o tipo de técnica de formação de fila utilizada influencia nos valores do tempo de transferência e perda de mensagens GOOSE e, além disso, os valores máximos e mínimos são úteis para auxiliar os projetistas de SP a determinar os ajustes da proteção, em relação à sua coordenação e seletividade.

## 5.2 Comentários Finais sobre o Sistema Preditivo

Constatado o efeito prejudicial da ocupação da banda nominal dos IEDs sobre o desempenho do SP é possível desenvolver um sistema de monitoramento da operação dos mesmos a partir do parâmetro obtido. Este monitoramento se faz imperativo no alerta à operação da SE a respeito de qualquer irregularidade iminente para a consequente tomada de ações pertinentes a permanência de desempenho adequado, bem como alto grau de confiabilidade do SP.

Um sistema como o apresentado é relevante pois, de forma automática, permite acompanhar a utilização da banda em uma determinada interface e, caso essa ultrapasse um limiar pré-definido, a operação da SE é alertada e pode verificar tal ocorrência. Além disso, a abordagem proativa, obtida pelo uso da RNA, é um diferencial para o sistema desenvolvido, pois é capaz de indicar qualquer irregularidade iminente relativa à ocupação de banda dos IEDs. Caso a parte do trabalho relativa à predição via RNA seja explorada mais a fundo para que se possa predizer a ocupação de banda para períodos maiores, esta característica pode vir a auxiliar na tomada de medidas corretivas antecipadas.

As bibliotecas NET-SNMP, FANN e o *framework Qt Creator* IDE e *Qt libraries* são adequadas para o sistema desenvolvido, devido a sua constante atualização, estabilidade, características e documentação disponíveis. Além disso, essas bibliotecas são gratuitas e executadas no sistema operacional GNU/Linux em uma plataforma de *hardware* do tipo PC, tornando o sistema em questão uma alternativa de baixo custo para o tipo de monitoramento desejado.

A etapa de medição do sistema desenvolvido apresentou desempenho tão bom quanto o aplicativo comercial utilizado, conforme os resultados da Tabela 7, validando desta forma a implementação realizada.

A RNA desenvolvida foi capaz de prever adequadamente o comportamento da série temporal que caracteriza a ocupação percentual de banda do IED monitorado, fornecendo um erro de estimativa inferior a 3% para 91,30% das amostras apresentadas. O que mostra que a RNA projetada é capaz de fornecer uma previsão de ocupação de banda com bom desempenho, agregando uma funcionalidade importante para o sistema desenvolvido. A partir dessa previsão, um sistema de controle sobre as configurações da rede pode ser desenvolvido e ações automáticas podem ser tomadas visando a manter os IEDs operando na região I.

A interface gráfica, conforme discutido, mostrou-se adequada para agregar o sistema de previsão desenvolvido tornando a interação com o usuário facilitada através dos recursos apresentados, de modo a tornar a análise de uma ocorrência mais eficiente.

## 5.3 Continuidade da Pesquisa

Como continuidade desta pesquisa é proposto:

- Obter uma topologia ótima de RNA que consiga predizer, com precisão satisfatória, valores de ocupação de banda para intervalos maiores que 1s;
- Estender as análises apresentadas no Capítulo 2 para outros IEDs;
- Desenvolver novos métodos e ferramentas para ensaios de IEDs no contexto do padrão IEC 61850;
- Estudar outras técnicas de previsão de séries temporais;
- Desenvolver métricas para monitorar o desempenho das mensagens GOOSE;
- Estudar a viabilidade da implementação do SNMP nos IEDs;
- Propor novas técnicas de gerenciamento para redes de IEDs;

- Aprimorar a interface gráfica;
- Agregar novas funcionalidades ao sistema desenvolvido, como um filtro de pacotes;
- Desenvolver um sistema de controle aplicado às configurações do switch *Ethernet* a partir do monitoramento desenvolvido;
- Tornar o sistema desenvolvido multiplataforma.

## 6 Referências Bibliográficas

Apostolov, A.; Tholomier, D. Impact of IEC 61850 on power system protection. In Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, pp. 1053 –1058. (2006).

Barbosa, D. Sistema Híbrido Inteligente para o Monitoramento e Proteção de Transformadores de Potência. Tese (doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos - São Paulo. (2010).

Blackburn, J. L.; Domin, T. J. Protective Relaying Principles and Applications (3 ed.). Boca Raton: CRC Press. (2007).

Case, J.; Davin, J.; Fedor, M.; Schoffstall, M. Internet network management using the simple network management protocol. pp. 156 - 159. (1989).

Case, J.; Fedor, M.; Schoffstall, M.; Davin, J. Simple Network Management Protocol (SNMP). RFC 1157 (Historic). (1990). <<http://www.ietf.org/rfc/rfc1157.txt>>.

Chapman, S. J. Programação em Matlab para Engenheiros. São Paulo: Thomson Learning. (2006).

Chavan, S.; Jayaprakash, S.; Kumar, V. An open standard protocol for networking of energy meters. Power Delivery, IEEE Transactions on 23 (4), 1749 - 1753. (2008).

Chelluri, S.; Rodas, D.; Harikrishna, A. Integration considerations for large-scale IEC 61850 systems. Technical Report 20100329/TP6418-01, National Thermal Power Corporation Ltd. - NTPC, India. (2010).

Council, R. C. IRIG serial time code formats. Technical Report 200-98, Secretariat Range Commanders Council U.S. Army White Sands Missile Range, New Mexico. (1998).

da Silva, I. N.; Spatti, D. H.; Flauzino, R. A. Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas - Curso Prático. São Paulo: Artliber. (2010).

da Silva Soares, A. Predição de séries temporais econômicas por meio de redes neurais artificiais e transformada wavelet: Combinando modelo técnico e fundamentalista. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos. (2008).

Dillon, T. S.; Niebur, D. (Eds.) Neural Networks Applications in Power Systems. London: CRL Publishing Ltd. ISBN: 0 9527874 0 7. (1996).

Elmore, W. A. Protective Relaying Theory and Applications (2 ed.). New York:

Marcel Dekker. (2004).

Erickson, J. Hacking : the art of exploitation. San Francisco: No Starch Press. (2008).

Farhangi, H. The path of the smart grid. Power and Energy Magazine, IEEE 8 (1), 18-28. (2010).

Ferreira, R. E. In: Novatec. Linux: guia do administrador do sistema. 2<sup>a</sup> edição ed. São Paulo: [s.n.]. Capítulo: 23., ISBN 9788575221778. (2008).

Flores, V.; Espinosa, D.; Alzate, J.; Dolezilek, D. Case study: design and implementation of IEC 61850 from multiple vendors at CFE la Venta II. In Protective Relay Engineers, 2007. 60th Annual Conference for, pp. 307 - 320. (2007).

Forouzan, B. A. Data Communications and Networking (4 ed.). New York: McGraw-Hill Higher Education. (2007).

Frameworks, Q. D Qt reference documentation - qt creator. Electronic.. (2012).

Gilat, A. Matlab com Aplicações em Engenharia (2 ed.). Porto Alegre: Bookman. (2006).

Hardaker, W. Net-SNMP Documentation (5.7 ed.). (2012). <<http://www.net-snmp.org/docs/readmefiles.html>>.

Haykin, S. Redes neurais princípios e prática. Porto Alegre: Bookman Editora. (2001).

Hebb, D. O. The organization of behavior: a neuropsychological theory. John Wiley & Sons. (1949).

IEC (2003c). IEC-61850, Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models. Technical Report IEC 61850-5:2003(E), International Electrotechnical Commission.

IEC (2004b). IEC-61850, Part 8.1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Mapping to MMS (ISO 9506-1 e ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3. Technical Report IEC 61850-8-1:2004(E), International Electrotechnical Commission.

IEC (2004c). IEC-61850, Part 9.2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Sampled Values over ISO/IEC 8802-3. Technical Report IEC 61850-9-2:2004(E), International Electrotechnical Commission.

IEEE (2007). IEEE recommended practice for network communication in electric power substations. IEEE Std 1615-2007 , 1-93.

Jiangyi, D.; Yan, N. The design and implementation of multifunction probe based on snmp. pp. 434 - 437. (2009).

Kaneda, K.; Tamura, S.; Fujiyama, N.; Arata, Y.; Ito, H. (2008). Iec61850 based substation automation system. In Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008., pp. 1 - 8.

Kasztenny, B.; Whatley, J.; Udren, E. A.; Burger, J.; Finney, D.; Adamiak, M. IEC 61850 A Practical Application Primer for Protection Engineers. GE Protection & Control Journal. (2006).

Kovács, Z. L. Redes Neurais Artificiais (2 ed.). São Paulo: collegium cognitio. (1996).

Kurose, J. F.; Ross, K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach (5th ed.). USA: Addison-Wesley Publishing Company. (2009).

Mandic, D.; Chambers, J. Recurrent Neural Networks for Prediction: Learning Algorithms, Architectures and Stability (1 ed.). Wiley. (2001).

Matsumoto, E. Y. MATLAB 7: FUNDAMENTOS (2 ed.). São Paulo: ERICA. (2006).

Mauro, D. R.; Schmidt, K. J. Essential SNMP (2 ed.). Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc. (2005).

McCloghrie, K.; Rose, M. Management information base for network management of tcp/ip-based internets mib-ii. Technical Report RFC1213, Internet Engineering Task Force - IETF, Fremont, California, USA. (1991). <<http://www.ietf.org/rfc/rfc1213.txt>>.

Mcculloch, W.; Pitts, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biology 5 (4), 115-133. (1943).

Morettin, P. A.; de Castro Toloi, C. M. Análise de Séries Temporais (2 ed.). São Paulo: Edgard Blucher. (2006).

Netto, U. C. Determinação de um Parâmetro para Monitoramento do Desempenho de Mensagens GOOSE do Padrão IEC 61850 Utilizadas em Subestações de Energia Elétrica. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: Denis Vinicius Coury. (2012).

Nissen, S. Fast Artificial Neural Network Library-Reference Manual for FANN 2.2.0. (2012). <<http://leenissen.dk/fann/html/files/fann-h.html>>.

Nordell, D. et al. Uca international users group. Electronic. (2012).

Olifer, N.; Olifer, V. Computer Networks: Principles, Technologies and Protocols for Network Design. Hoboken, NJ: Wiley. (2006).

Rao, V. B. C++ Neural Networks and Fuzzy Logic. M&T Books. ISBN: 978-1558282988. (1995).

Seifert, R.; Edwards, J. The all-new switch book: the complete guide to LAN switching. technology (2 ed.). Wiley Publishing. (2008).

Riedmiller, M. Rprop-Description and implementation details: Technical Report. Inst. f. Logik, Komplexität u. Deduktionssysteme. (1994).

Sidhu, T.; Yin, Y. Modelling and simulation for performance evaluation of IEC 61850 based substation communication systems. Power Delivery, IEEE Transactions on 22 (3), 1482-1489. (2007).

Sidhu, T.; Injeti, S.; Kanabar, M.; Parikh, P. Packet scheduling of goos messages in IEC 61850 based substation intelligent electronic devices (IEDs), Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, pp. 1 - 8. (2010).

Solarwinds; Solarwinds: Engineer's toolset network traffic generator: WAN Killer. (2009).

Zarpelão, B. B. Detecção de Anomalias em Redes de Computadores. Tese (doutorado), Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas. (2010).

# ANEXO A – Análise Experimental:

## Perfis 1 a 7

### A.1 Resultados para o Perfil 1

A Figura 36 mostra os resultados para o ensaio realizado no perfil 1 da Tabela 2 em relação ao tempo de transferência médio e seu desvio padrão vs a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Observa-se duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência médio e desvio padrão. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios iguais a 4,36ms e 0,69ms para o tempo de transferência médio e desvio padrão, respectivamente. Esses valores não violam o limite da classe P1 do padrão IEC 61850, descrita na subseção 3.2.2. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores que extrapolam a referência estabelecida. Para esse intervalo, o tempo de transferência passa de 4,36ms para 88,72ms, enquanto que o desvio padrão passa de 0,69ms para 150,44ms.

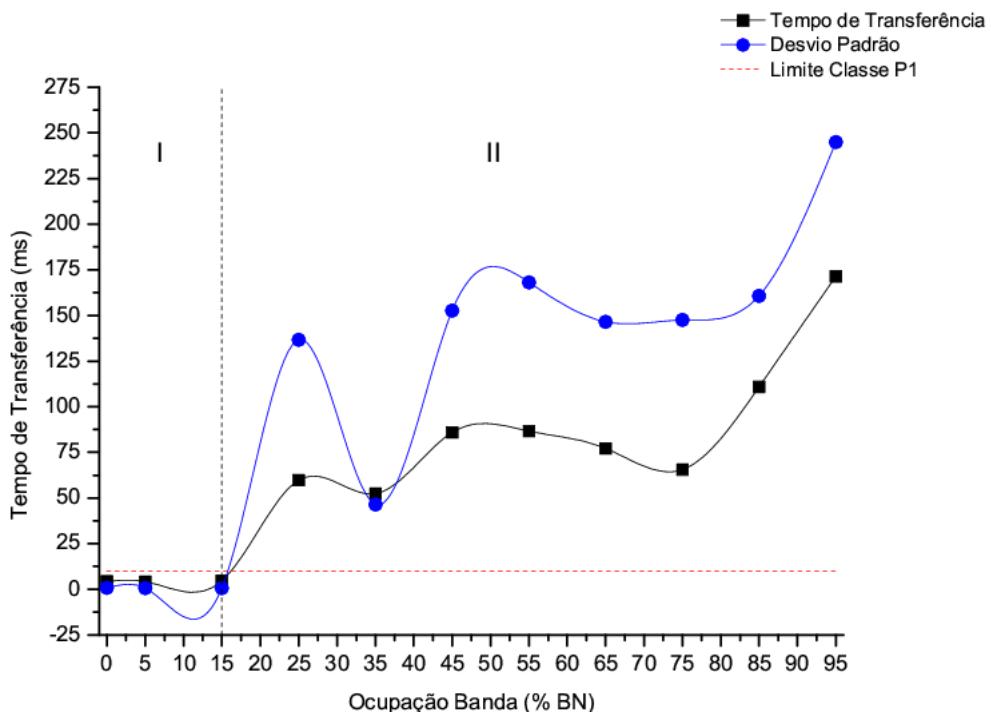


Figura 36 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 1. Fonte: Netto (2012)

A Figura 36 apresenta os resultados para o ensaio realizado no perfil 1 da Tabela 2 em relação aos valores máximos e mínimos obtidos para o tempo de transferência vs a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Novamente se observa a existência

de duas regiões com comportamento distinto para os valores máximo e mínimo do tempo de transferência. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e apresenta valores médios de 5,96ms e 2,86ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios que passam de 5,96ms para 539,6ms e de 2,86ms para 4,17ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente.

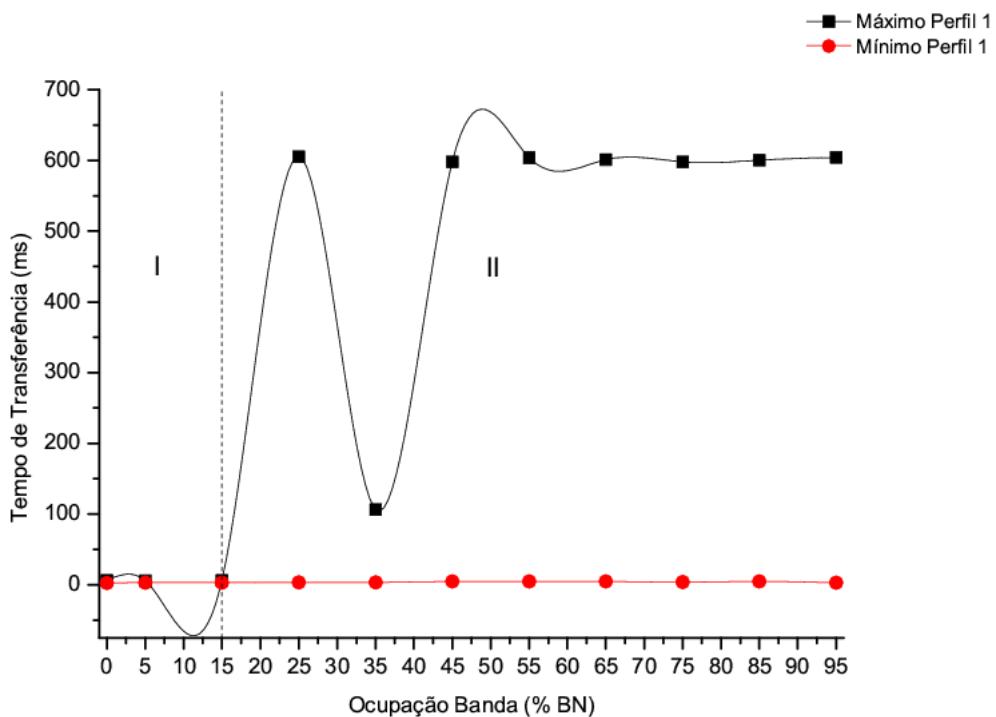


Figura 37 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 1. Fonte: Netto (2012)

A Figura 38 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 1 da Tabela 2 e, como os demais resultados, apresenta duas regiões com comportamento distinto para as perdas ocorridas no IED2. Observa-se que para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2, I, não há perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2, II, as perdas aumentam para 48,57% em média.

## A.2 Resultados para o Perfil 2

A Figura 39 mostra os resultados para o ensaio realizado no perfil 2 da Tabela 2 em relação ao tempo de transferência médio e seu desvio padrão vs a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Observa-se duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência médio e desvio padrão. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios

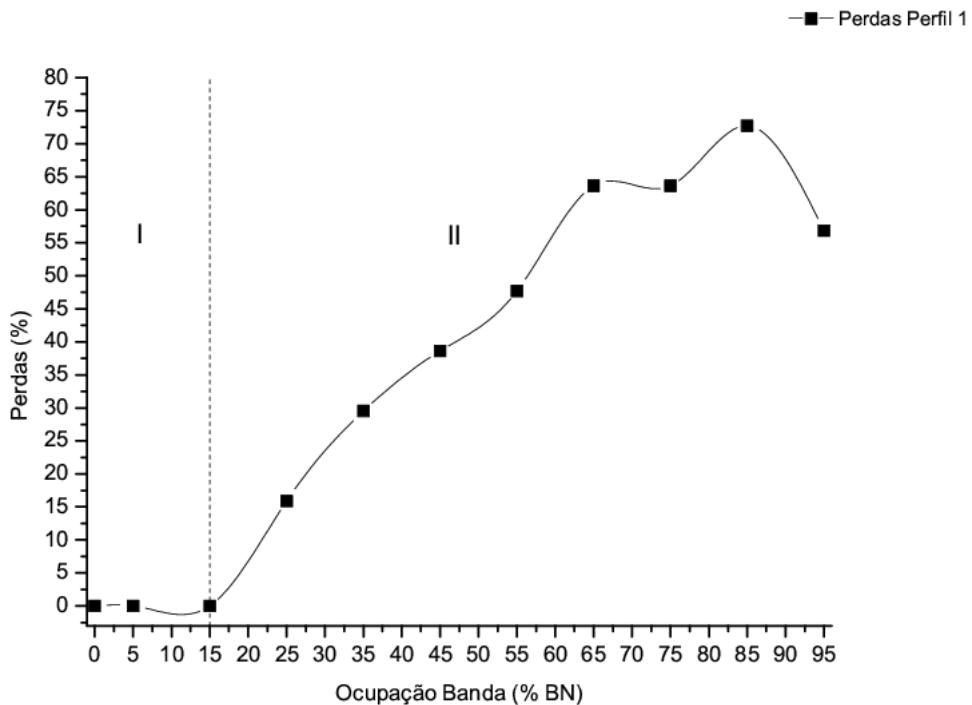


Figura 38 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 1. Fonte: Netto (2012)

iguais a 4,46ms e 0,75ms para o tempo de transferência médio e desvio padrão, respectivamente. Esses valores não violam o limite da classe P1 do padrão IEC 61850, descrita na subseção 3.2.2. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores que extrapolam a referência estabelecida. Para esse intervalo, o tempo de transferência passa de 4,46ms para 94,51ms, enquanto que o desvio padrão passa de 0,75ms para 152,21ms.

A Figura 40 apresenta os resultados para o ensaio realizado no perfil 2 da Tabela 2 em relação aos valores máximos e mínimos obtidos para o tempo de transferência vs a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Novamente se observa a existência de duas regiões com comportamento distinto para os valores máximo e mínimo do tempo de transferência. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e apresenta valores médios de 5,90 e 3,46ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios que passam de 5,90ms para 531,11ms e de 3,46ms para 3,86ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente.

A Figura 41 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 2 da Tabela 2 e, como os demais resultados, apresenta duas regiões com comportamento distinto para as perdas ocorridas no IED2. Observa-se que para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2, I, não há perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do

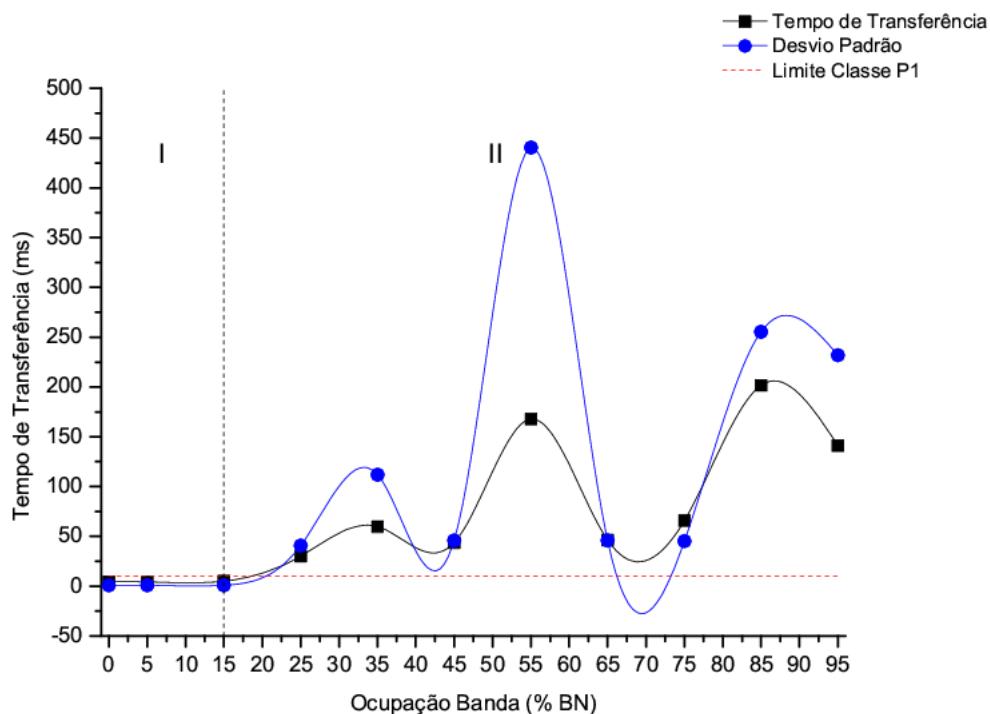


Figura 39 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 2. Fonte: Netto (2012)

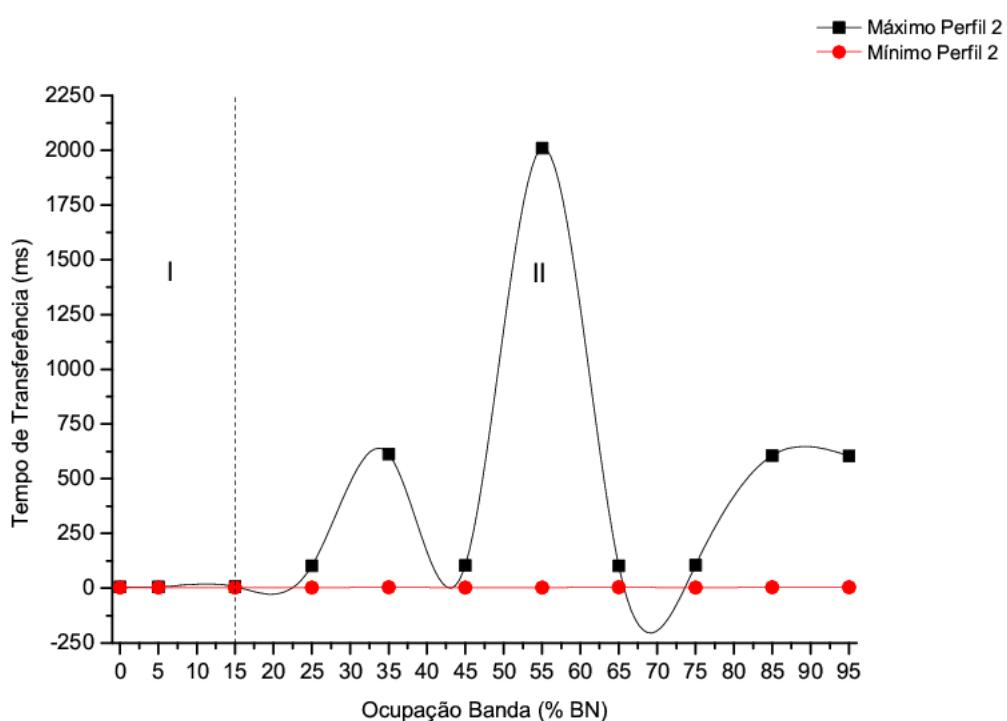


Figura 40 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 2. Fonte: Netto (2012)

IED2, II, as perdas aumentam para 48,57% em média.

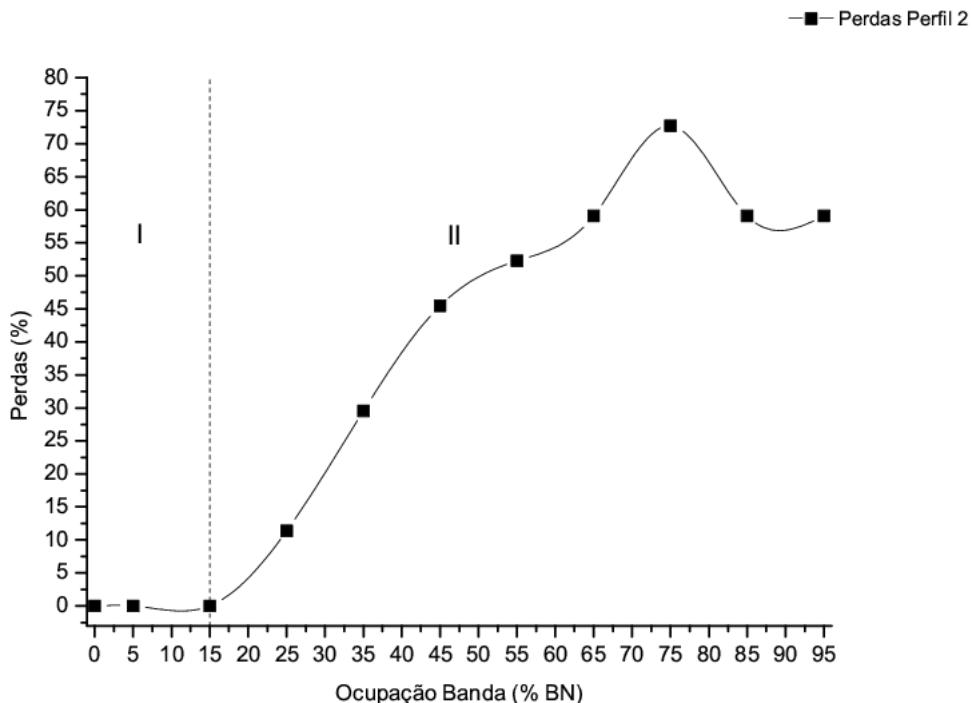


Figura 41 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 2. Fonte: Netto (2012)

### A.3 Resultados para o Perfil 3

A Figura 42 mostra os resultados para o ensaio realizado no perfil 3 da Tabela 2 em relação ao tempo de transferência médio e seu desvio padrão vs a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Observa-se duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência médio e desvio padrão. A primeira, I, comprehende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios iguais a 4,56ms e 0,76ms para o tempo de transferência médio e desvio padrão, respectivamente. Esses valores não violam o limite da classe P1 do padrão IEC 61850, descrita na subseção 3.2.2. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores que extrapolam a referência estabelecida. Para esse intervalo, o tempo de transferência passa de 4,56ms para 78,21ms, enquanto que o desvio padrão passa de 0,76ms para 105,36 ms.

A Figura 43 apresenta os resultados para o ensaio realizado no perfil 3 da Tabela 2 em relação aos valores máximos e mínimos obtidos para o tempo de transferência vs a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Novamente se observa a existência de duas regiões com comportamento distinto para os valores máximo e mínimo do tempo de transferência. A primeira, I, comprehende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e apresenta valores médios de 6,5ms e 3,1ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente. A segunda região, II, é determinada pelo

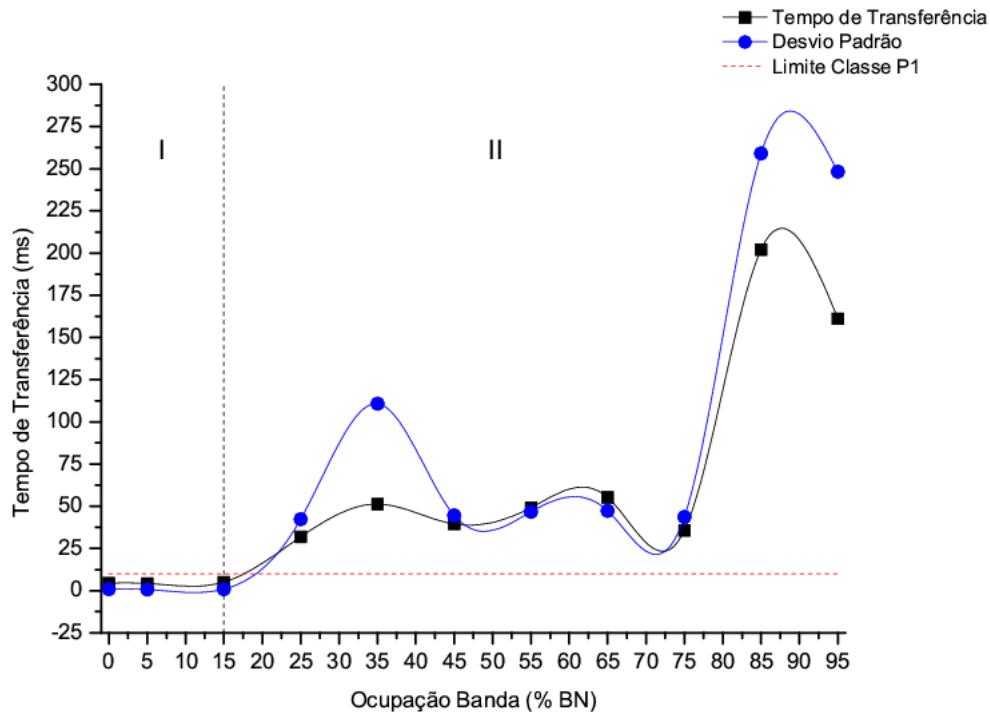


Figura 42 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 3. Fonte: Netto (2012)

intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios que passam de 6,5ms para 289,9ms e de 3,1 para 3,97ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente.

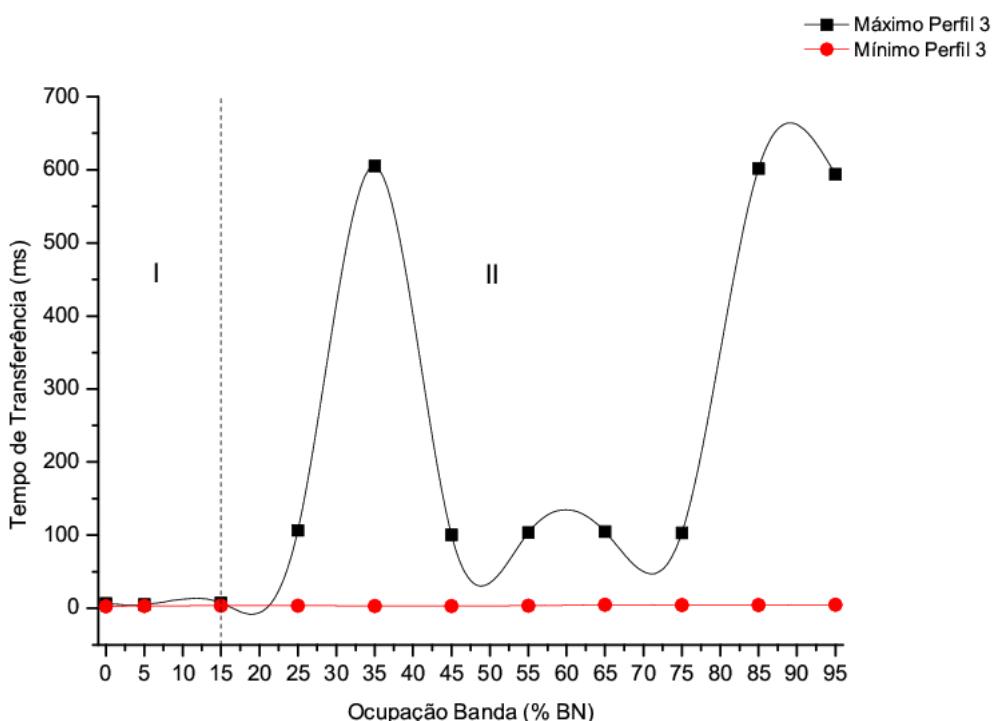


Figura 43 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 3. Fonte: Netto (2012)

A Figura 44 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 3 da Tabela 2 e, como os demais resultados, apresenta duas regiões com comportamento distinto para as perdas ocorridas no IED2. Observa-se que para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2, I, não há perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2, II, as perdas aumentam para 49,71% em média.

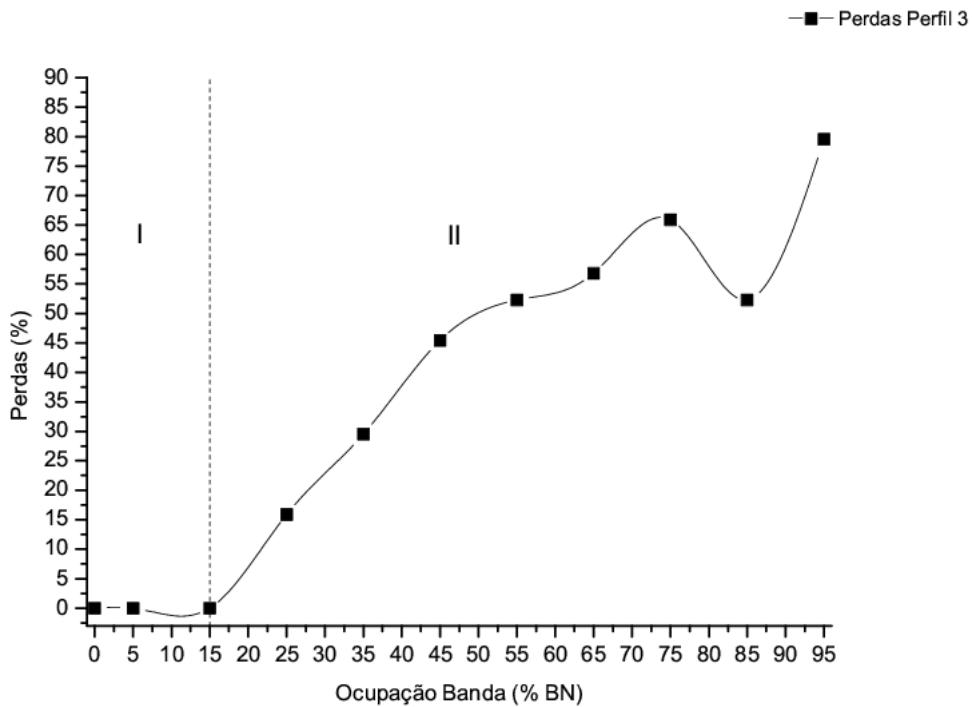


Figura 44 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 3. Fonte: Netto (2012)

## A.4 Resultados para o Perfil 4

A Figura 45 mostra os resultados para o ensaio realizado no perfil 4 da Tabela 2 em relação ao tempo de transferência médio e seu desvio padrão vs a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Observa-se duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência médio e desvio padrão. A primeira, I, comprehende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios iguais a 4,43 e 0,77ms para o tempo de transferência médio e desvio padrão, respectivamente. Esses valores não violam o limite da classe P1 do padrão IEC 61850, descrita na subseção 3.2.2. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores que extrapolam a referência estabelecida. Para esse intervalo, o tempo de transferência passa de 4,43 para 103,01 ms, enquanto que o desvio padrão passa de 0,77 para 151,82 ms.

A Figura 46 apresenta os resultados para o ensaio realizado no perfil 4 da Tabela 2 em relação aos valores máximos e mínimos obtidos para o tempo de transferência vs

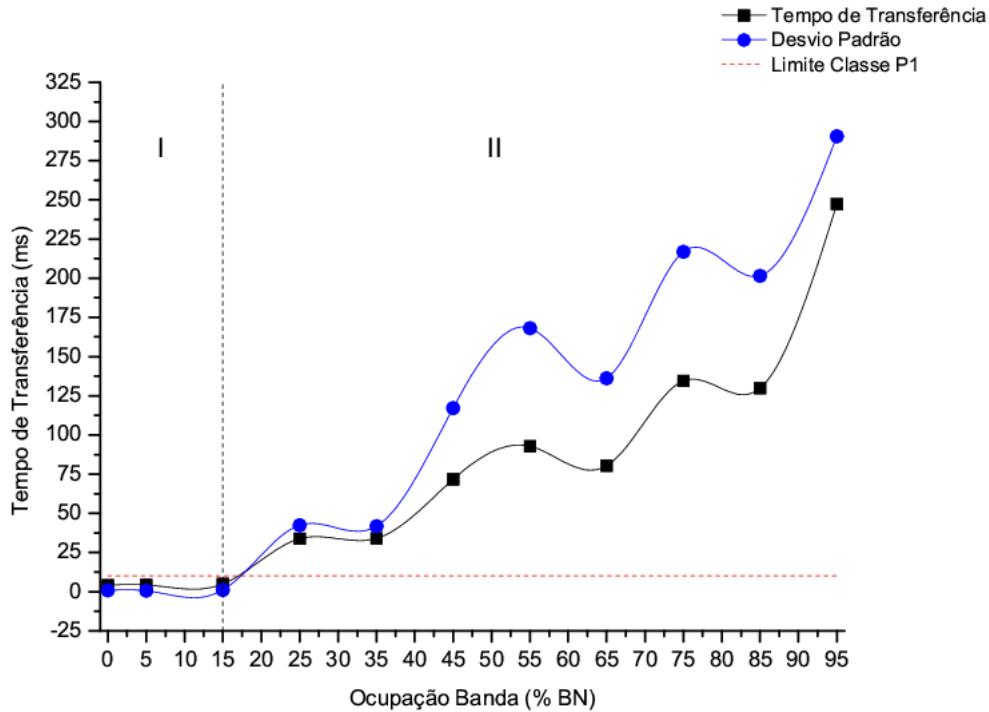


Figura 45 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 4. Fonte: Netto (2012)

a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Novamente se observa a existência de duas regiões com comportamento distinto para os valores máximo e mínimo do tempo de transferência. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e apresenta valores médios de 6,1ms e 3,16ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios que passam de 6,1ms para 478,66ms e de 3,16 para 3,97ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente.

A Figura 47 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 4 da Tabela 2 e, como os demais resultados, apresenta duas regiões com comportamento distinto para as perdas ocorridas no IED2. Observa-se que para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2, I, não há perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2, II, as perdas aumentam para 46,59% em média.

## A.5 Resultados para o Perfil 5

A Figura 48 mostra os resultados para o ensaio realizado no perfil 5 da Tabela 2 em relação ao tempo de transferência médio e seu desvio padrão vs a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Observa-se duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência médio e desvio padrão. A primeira, I, compreende

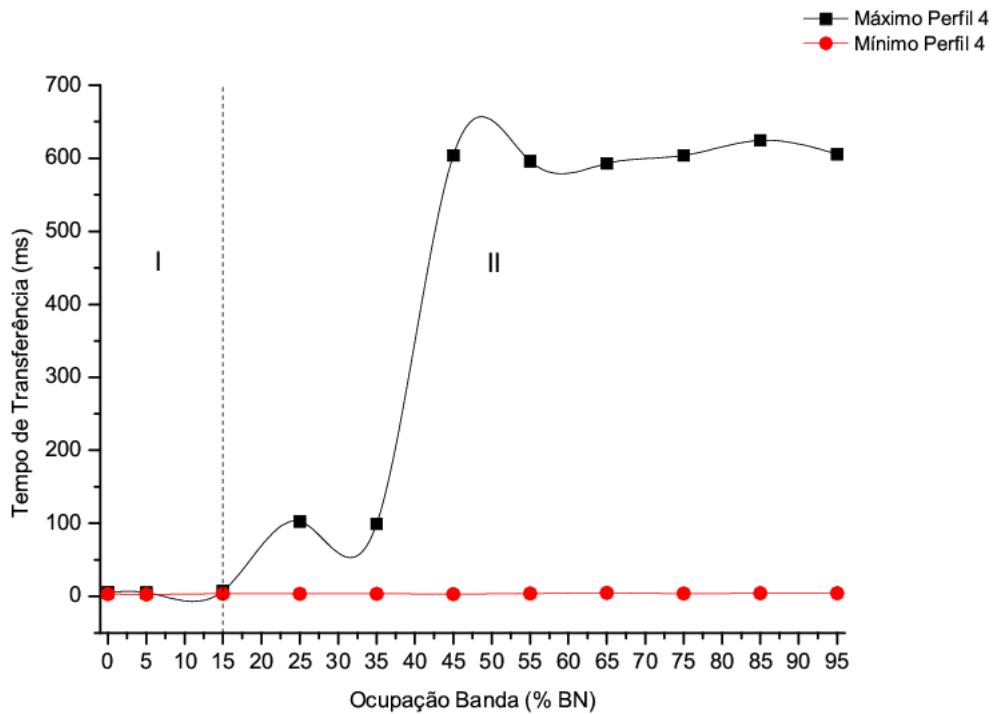


Figura 46 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 4. Fonte: Netto (2012)

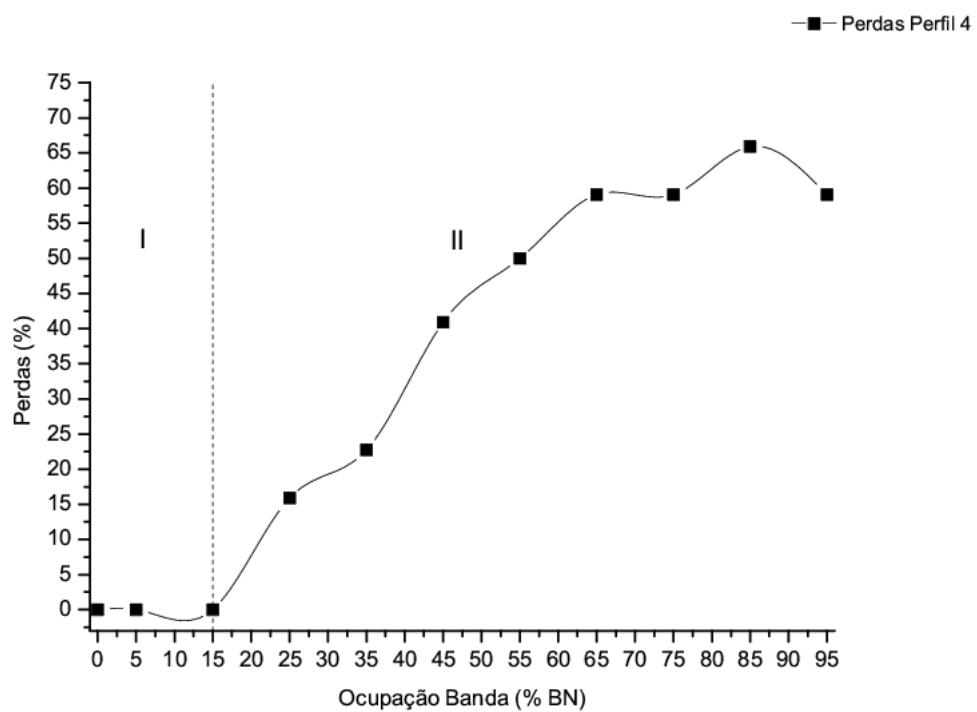


Figura 47 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 4. Fonte: Netto (2012)

o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios iguais a 5,2ms6 e 5,44ms para o tempo de transferência médio e desvio padrão, respectivamente. Esses valores não violam o limite da classe P1 do padrão IEC 61850, descrita na subseção 3.2.2. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores que extrapolam a referência estabelecida. Para esse intervalo, o tempo de transferência passa de 5,26ms para 109,77ms, enquanto que o desvio padrão passa de 5,44ms para 164,64 ms.

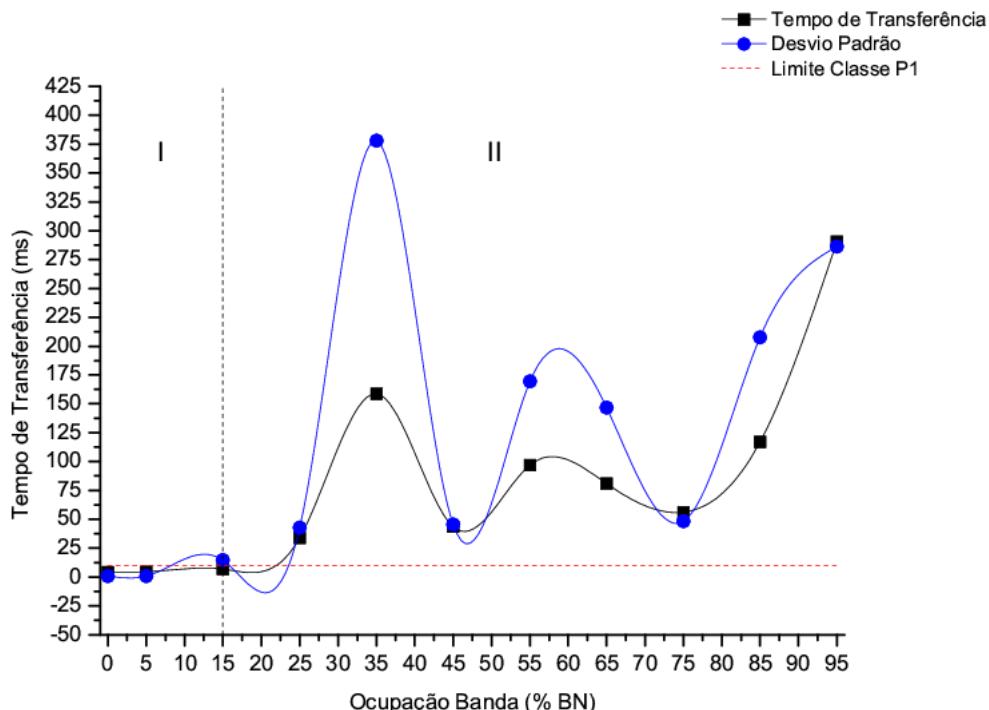


Figura 48 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 5. Fonte: Netto (2012)

A Figura 49 apresenta os resultados para o ensaio realizado no perfil 5 da Tabela 2 em relação aos valores máximos e mínimos obtidos para o tempo de transferência vs a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Novamente se observa a existência de duas regiões com comportamento distinto para os valores máximo e mínimo do tempo de transferência. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e apresenta valores médios de 8,53ms e 3,03ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios que passam de 8,53ms para 595,2ms e de 3,03ms para 4,18ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente.

A Figura 50 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 5 da Tabela 2 e, como os demais resultados, apresenta duas regiões com comportamento distinto para as perdas ocorridas no IED2. Observa-se que para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2, I, não há perda

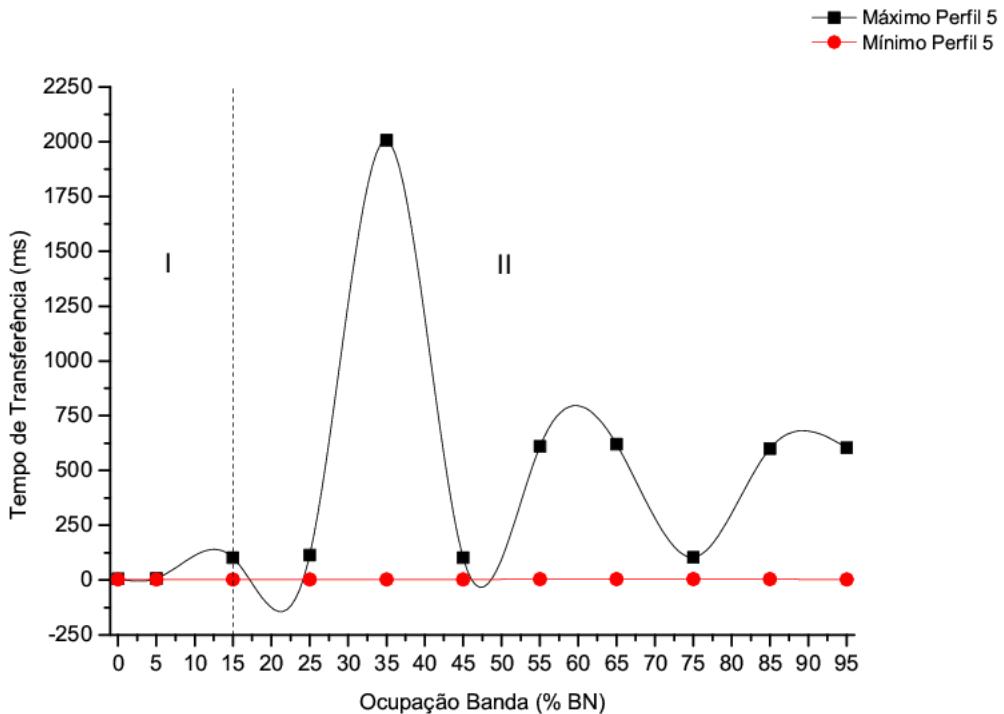


Figura 49 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 5. Fonte: Netto (2012)

de mensagens, porém para o intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2, II, as perdas aumentam para 48,57% em média.

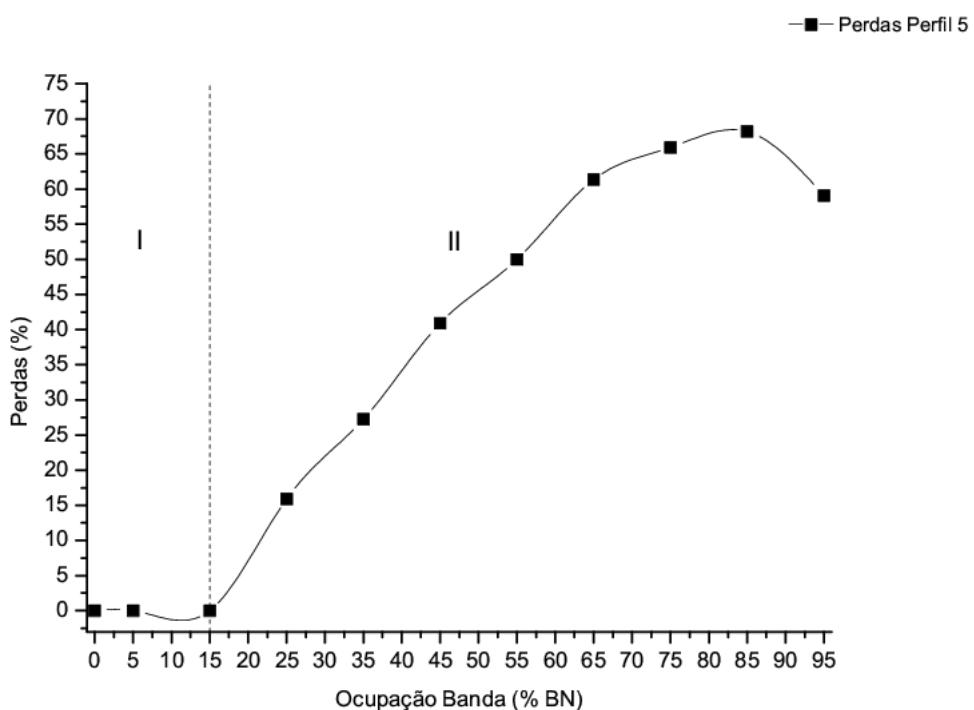


Figura 50 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 5. Fonte: Netto (2012)

## A.6 Resultados para o Perfil 6

A Figura 51 mostra os resultados para o ensaio realizado no perfil 6 da Tabela 2 em relação ao tempo de transferência médio e seu desvio padrão vs a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Observa-se duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência médio e desvio padrão. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios iguais a 4,46ms e 0,81ms para o tempo de transferência médio e desvio padrão, respectivamente. Esses valores não violam o limite da classe P1 do padrão IEC 61850, descrita na subseção 3.2.2. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores que extrapolam a referência estabelecida. Para esse intervalo, o tempo de transferência passa de 4,46ms para 106,38 ms, enquanto que o desvio padrão passa de 0,81ms para 203,78 ms.

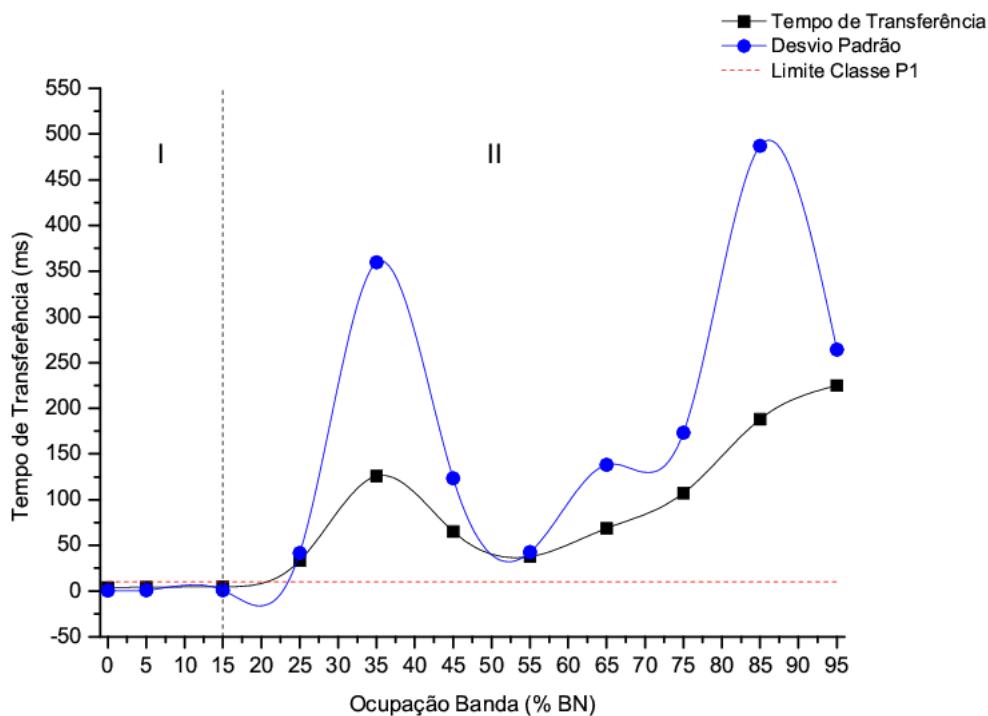


Figura 51 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 6. Fonte: Netto (2012)

A Figura 52 apresenta os resultados para o ensaio realizado no perfil 6 da Tabela 2 em relação aos valores máximos e mínimos obtidos para o tempo de transferência vs a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Novamente se observa a existência de duas regiões com comportamento distinto para os valores máximo e mínimo do tempo de transferência. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e apresenta valores médios de 6,10ms e 3,20ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios

que passam de 6,10ms para 827,73ms e de 3,20ms para 4,26ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente.

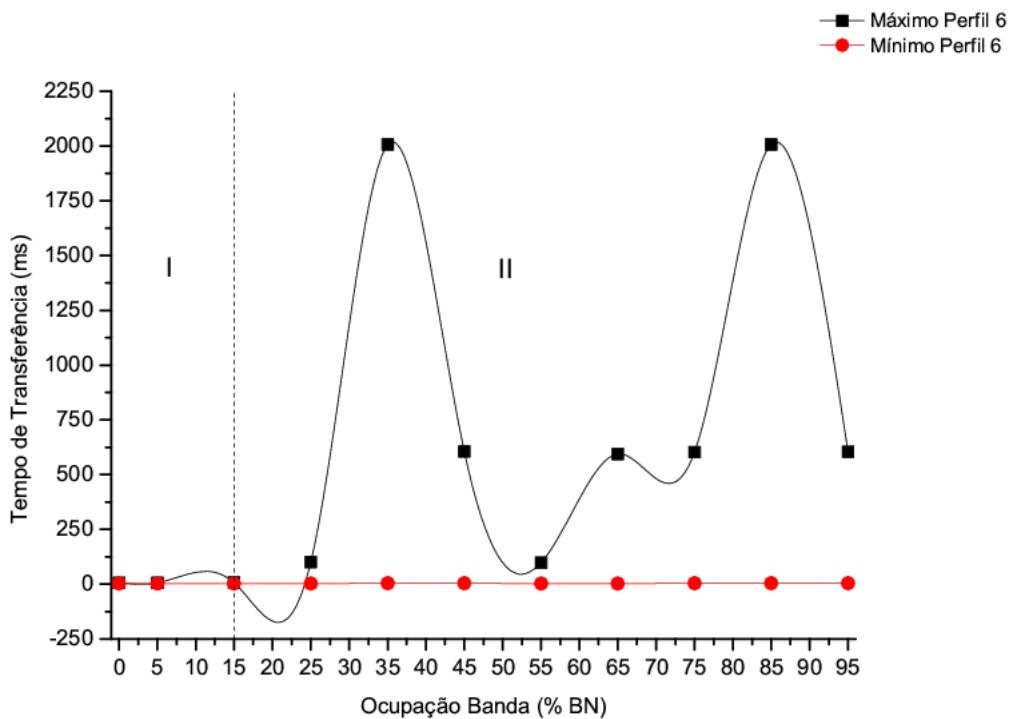


Figura 52 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 6. Fonte: Netto (2012)

A Figura 53 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 6 da Tabela 2 e, como os demais resultados, apresenta duas regiões com comportamento distinto para as perdas ocorridas no IED2. Observa-se que para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2, I, não há perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2, II, as perdas aumentam para 48,57% em média.

## A.7 Resultados para o Perfil 7

A Figura 54 mostra os resultados para o ensaio realizado no perfil 7 da Tabela 2 em relação ao tempo de transferência médio e seu desvio padrão vs ocupação percentual da banda do IED em estudo. Observa-se duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência médio e desvio padrão. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios iguais a 4,50ms e 0,76ms para o tempo de transferência médio e desvio padrão, respectivamente. Esses valores não violam o limite da classe P1 do padrão IEC 61850, descrita na subseção 3.2.2. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores que extrapolam a

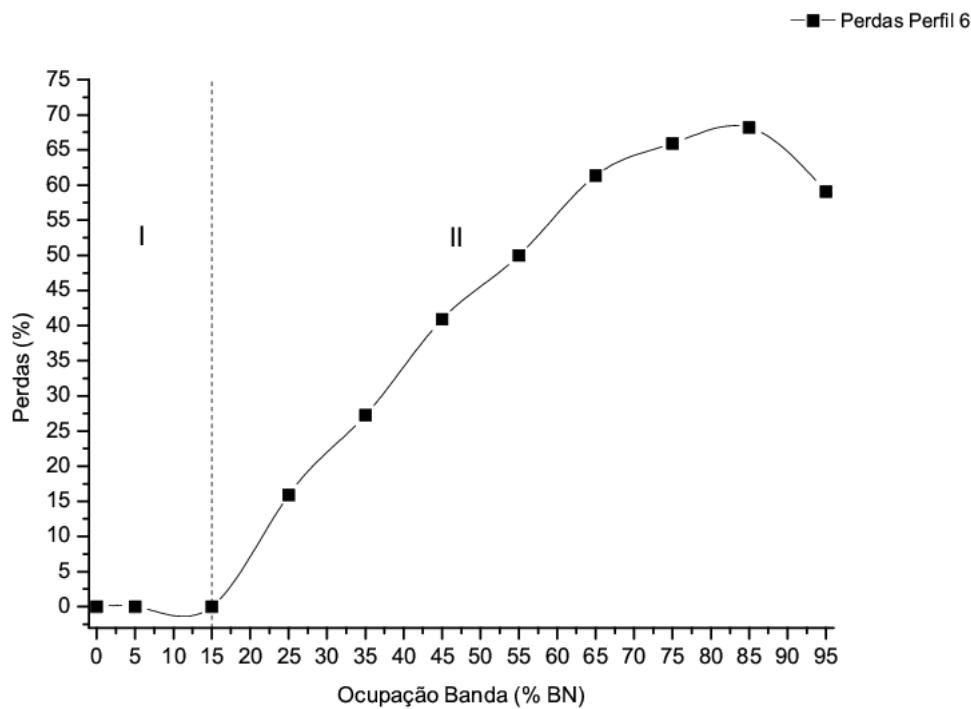


Figura 53 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 6. Fonte: Netto (2012)

referência estabelecida. Para esse intervalo, o tempo de transferência passa de 4,50ms para 88,98 ms, enquanto que o desvio padrão passa de 0,76ms para 133,48 ms.

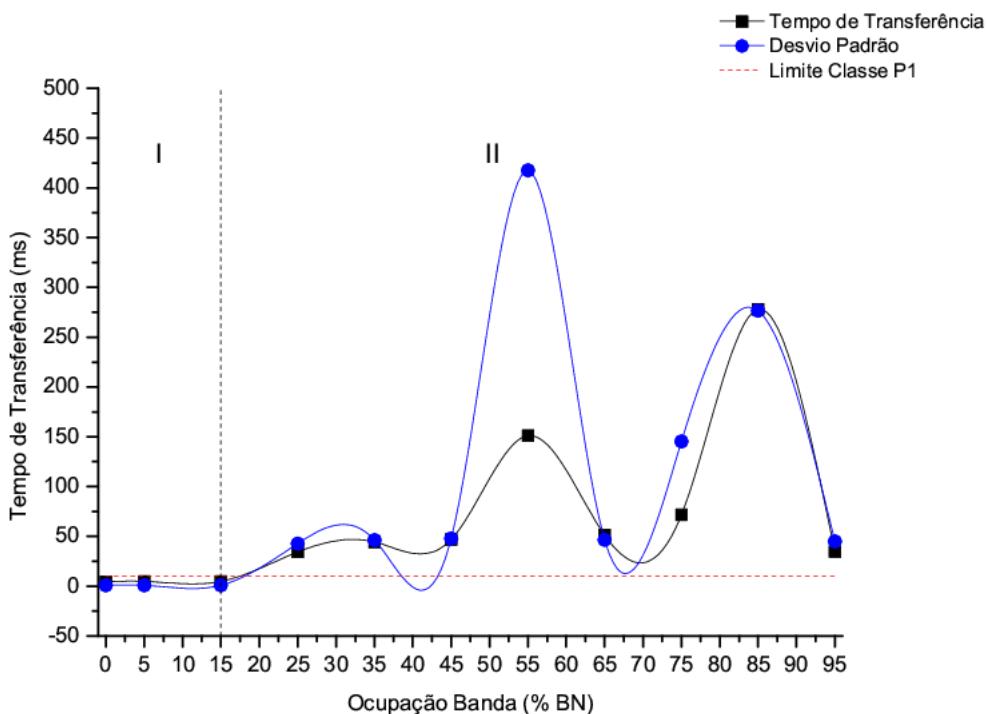


Figura 54 – Tempo de Transferência e Desvio padrão para o perfil 7. Fonte: Netto (2012)

A Figura 55 apresenta os resultados para o ensaio realizado no perfil 7 da Tabela 2 em relação aos valores máximos e mínimos obtidos para o tempo de transferência vs

a ocupação percentual da banda do IED em estudo. Novamente se observa a existência de duas regiões com comportamento distinto para os valores máximo e mínimo do tempo de transferência. A primeira, I, compreende o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2 e apresenta valores médios de 5,86ms e 3,26ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente. A segunda região, II, é determinada pelo intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2 e contém valores médios que passam de 5,86ms para 468,71ms e de 3,26ms para 3,71ms para os valores máximos e mínimos, respectivamente.

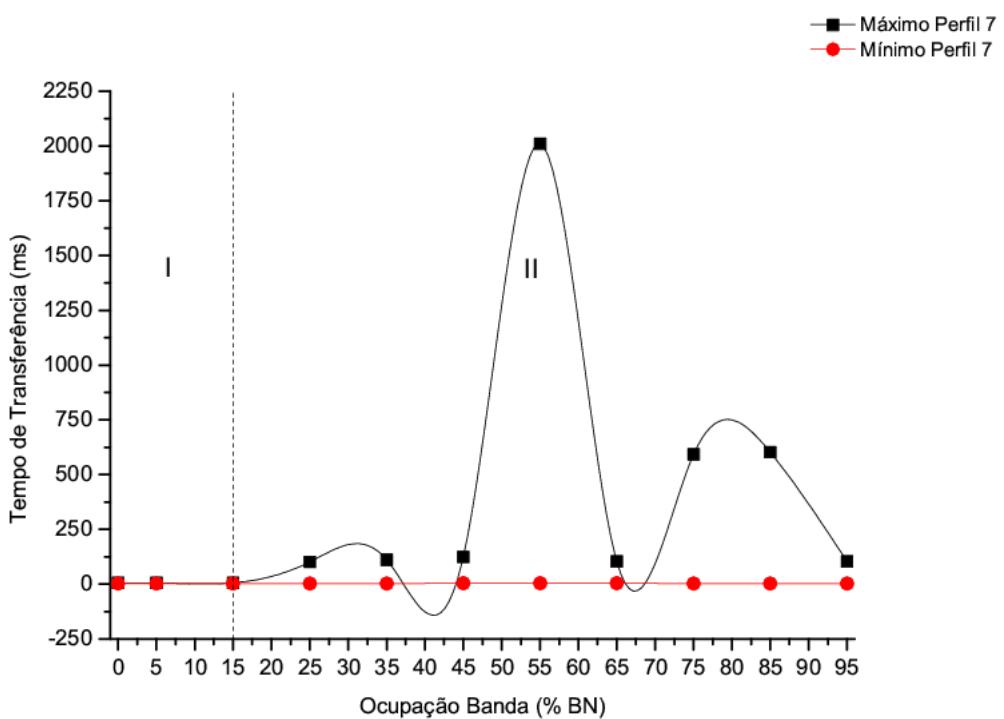


Figura 55 – Valores máximos e mínimos para o tempo de transferência perfil 7. Fonte: Netto (2012)

A Figura 56 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 7 da Tabela 2 e, como os demais resultados, apresenta duas regiões com comportamento distinto para as perdas ocorridas no IED2. Observa-se que para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda do IED2, I, não há perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15% e 95% de ocupação de banda do IED2, II, as perdas aumentam para 52,92% em média.

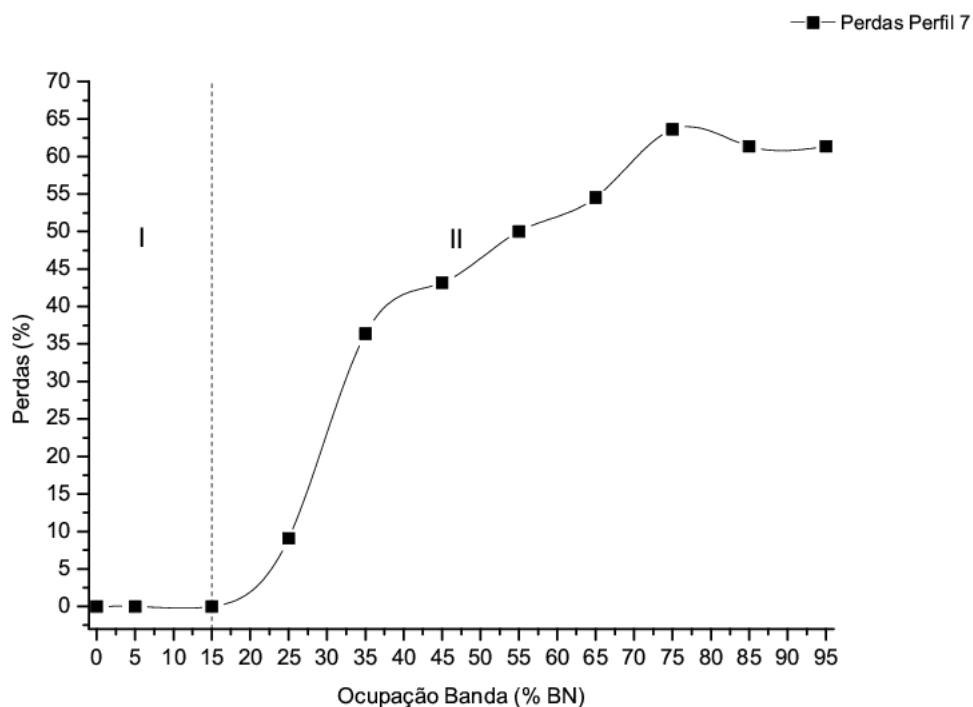


Figura 56 – Percentual de perdas para o IED2 perfil 7. Fonte: Netto (2012)