

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ALCIDES ORTEGA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES DE COMUNICAÇÃO
WIRELESS EM APLICAÇÕES DE *SMART GRID***

Ilha Solteira

2015

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALCIDES ORTEGA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES DE COMUNICAÇÃO
WIRELESS EM APLICAÇÕES DE *SMART GRID***

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP - Câmpus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Orientador: Prof. Dr. Ailton Akira Shinoda

Coorientador: Prof. Dr. Fabrizio Granelli

Ilha Solteira

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

O771a Ortega, Alcides .
Análise de desempenho de redes de comunicação wireless em aplicações de Smart Grid / Alcides Ortega. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
126 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação , 2015

Orientador: Ailton Akira Shinoda

Co-orientador: Fabrizio Granelli

Inclui bibliografia

1. DNP3. 2. Protocolo. 3. NS-2. 4. Smart Grid. 5. TCP/IP.

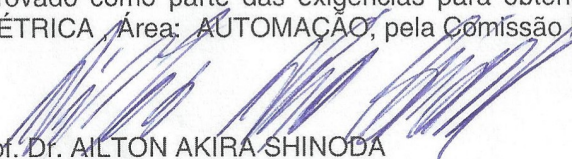
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise de Desempenho de Redes de Comunicação Wireless em Aplicações de Smart Grid

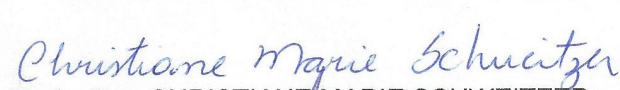
AUTOR: ALCIDES ORTEGA

ORIENTADOR: Prof. Dr. AILTON AKIRA SHINODA

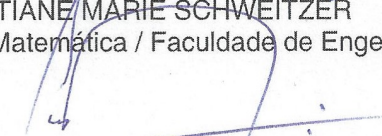
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. AILTON AKIRA SHINODA

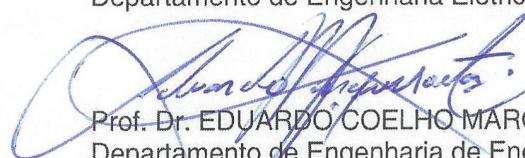
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dra. CHRISTIANE MARIE SCHWEITZER

Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGINA DE OLIVEIRA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. EDUARDO COELHO MARQUES DA COSTA

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica / Escola Politécnica Universidade de São Paulo


Prof. Dr. JOÃO HENRIQUE KLEINSCHMIDT

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas / Universidade Federal do ABC

Data da realização: 29 de setembro de 2015.

Dedico aos meus queridos pais, Felix Ortega e Liberata Arce, a minha esposa Aleciana Vasconcelos Ortega e ao meu filho Daniel Vasconcelos Ortega que tiveram paciência e me possibilitaram mais essa conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora Aparecida por toda força espiritual necessária para viver e ultrapassar os obstáculos existentes neste tipo de conquista.

À Família sempre presente nos momentos mais difíceis e a paciência por aguentar toda minha ausência neste período.

Ao Professor Dr. Ailton Akira Shinoda, pela compreensão e por ter se mostrado um exemplo de orientador, na elaboração deste trabalho. Agradeço por sua dedicação, seus ensinamentos e por toda sua paciência no desenvolvimento da pesquisa e experimentos.

Ao Professor Dr. Fabrizio Granelli, meu orientador no estágio do doutorado sanduíche na *Università degli Studi di Trento* no departamento DISI-Dipartimento di *Ingegneria e scienza dell'informazione*, Trento-Italia, pela oportunidade e orientação durante o curso de meus estudos.

Ao Professor Dr. Tokio, em nome de todos os docentes, discentes e técnico-administrativos do programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, pela ajuda, companheirismo e excelente prestação de serviços oferecida. Com certeza, o meu período vivenciado neste ambiente de pesquisa trouxe-me muitas alegrias.

Agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte com a bolsa sanduíche no exterior e à Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS) pelo suporte, na forma de concessão de afastamento para qualificação, no desenvolvimento deste trabalho de tese.

À banca examinadora que analisará o conteúdo deste trabalho contribuindo com sugestões.

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo,
qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim”
(Chico Xavier)

RESUMO

Nos últimos anos têm-se percebido que o atual sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica tradicional tornou-se insuficiente e ultrapassado para suprir toda a demanda. Com isso houve um forte crescimento nas pesquisas sobre um conceito com novas tecnologias para modernizar ou construir a rede de energia elétrica em seus aspectos de infraestrutura, disponibilidade, sustentabilidade e confiabilidade. Este novo conceito trata-se do *smart grid* que propõe uma tecnologia baseada na automação, comunicação, monitoração e controle da rede elétrica, a qual permite implantação de estratégias de controle e otimização da rede de forma eficiente perante as atualmente utilizadas. As tecnologias aplicadas no *smart grid* englobam muitos sistemas. Entre esses sistemas estão topologia de comunicação, circuitos e interfaces eletrônicas, na qual dificulta a construção de um cenário real para realizar estudos e pesquisas de qual sistema de comunicação é o mais adequado para as aplicações no *smart grid*. Os equipamentos são muito onerosos e dependendo da extensão e quantidade de dispositivos que serão implantados, tornam impossíveis as realizações em cenário de campo. Para sanar esses problemas são utilizados os softwares de simulação que são ferramentas convenientes nesses casos e comumente empregadas na área de pesquisa, para realizar a análise e o desempenho de um sistema. Uma rede de comunicação envolvendo aplicações críticas, como é o caso da transmissão e distribuição de energia elétrica, deve ser altamente confiável, extremamente segura e resiliente a falhas. Para realizar análises de desempenho de uma rede de comunicação *wireless* a ser utilizado em aplicações *smart grid* com resultados desejáveis, é preciso realizar simulações para poder prever qualquer eventualidade de possíveis falhas. De todos os simuladores existentes o mais indicado foi o NS-2, um simulador à evento discreto de redes com código aberto que facilita a criação de cenários de redes de comunicação, levando em consideração os protocolos envolvidos sejam em tecnologias de redes cabeadas ou sem fio. Este software oferece suporte à simulação de um grande número de tecnologias de rede e faz um detalhamento de suas características e funcionalidades por meio da implementação de modelos de sistemas de redes, nos quais apresenta resultados das simulações. A contribuição dessa tese foi a implementação de um *patch* para o NS-2 possibilitando a realização de simulações do protocolo de comunicação DNP3 sobre redes cabeadas e *wireless* em aplicações *smart grid* sob sistemas operacionais livres com um custo zero comparado com laboratórios com equipamentos reais.

Palavras-chave: DNP3. Protocolo. NS-2. *Smart Grid*. TCP/IP.

ABSTRACT

In recent years have realized that the current system of generation, transmission and distribution of electric power has become traditional and outdated to meet the entire demand. With that there was a strong growth in research on a concept with new technologies to modernize or build the electric power grid in its aspects of infrastructure, availability, sustainability and reliability. This new concept that is the smart grid that proposes a technology based on automation, communication, monitoring and control of the power grid, which allows implementation of control strategies and grid optimization efficiently before the currently used. The technology applied in smart grid includes many systems. Among these are communication topology systems, circuits and electronic interfaces, which makes it difficult to build a real scenario to carry out studies and researches of which system is best suited for applications in the smart grid. The equipment is very expensive and depending on the extent and amount of devices that will be deployed, make impossible the achievements in the field setting. To remedy these problems are used simulation software that are convenient tools in these cases and commonly employed in the area of research, to conduct the analysis and performance of a system. A communication network involving critical applications, such as electric power transmission and distribution must be highly reliable, extremely safe and resilient. To perform analyses of performance of a wireless communication network to be used in smart grid applications with desirable results, you need to perform simulations in order to anticipate any eventuality of possible failures. Of all existing simulators as indicated was the NS-2, a discrete event simulator for open source networks that facilitates the creation of communication networks scenarios, taking into account the protocols involved in wired or wireless technologies. This software supports the simulation of a large number of network technologies and detailing its features and functionality through the implementation of models of network systems, in which presents results of the simulations. The contribution of this thesis was to implement a patch for NS-2 enabling the realization of simulations of DNP3 communication protocol on wired networks and wireless in smart grid applications under free operating systems with a zero cost compared with real equipment laboratories.

Keywords: DNP3. Protocol. NS-2. Smart grid. TCP/IP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Como funciona a <i>smart grid</i> .	25
Figura 2 – Arquitetura de um sistema <i>smart grid</i> .	26
Figura 3 – Diagrama de blocos – sistema SCADA.	28
Figura 4 – Arquitetura do sistema SCADA.	30
Figura 5 – Níveis de camadas e o tipo ponto de entrada/ saída.	32
Figura 6 – Construção de uma mensagem DNP3.	33
Figura 7 – Esquema de segmentação de mensagem na camada de aplicação.	33
Figura 8 - Sequência <i>polled</i> com confirmação de dados na camada de enlace.	35
Figura 9 - Sequência de resposta da mensagem não solicitada.	35
Figura 10 – Componentes do fragmento da camada de aplicação.	36
Figura 11 – Componentes do cabeçalho do fragmento da mensagem solicitada.	36
Figura 12 – Componentes do cabeçalho da mensagem de resposta.	36
Figura 13 – Componentes de um quadro na camada pseudotransporte.	37
Figura 14 – Componentes do cabeçalho de um quadro na camada pseudotransporte.	37
Figura 15 – Componentes de um quadro na camada de enlace.	38
Figura 16 – Componentes do cabeçalho de um quadro na camada de enlace.	38
Figura 17 – Resumo de pacotes nas camadas do protocolo DNP3.	40
Figura 18 - Topologia ponto a ponto.	40
Figura 19 - Topologia multiponto.	41
Figura 20 - Topologia hierárquica.	41
Figura 21 - Topologia concentrador tipo I.	41
Figura 22 - Topologia concentrador tipo II.	41
Figura 23 - Diagrama de estação Mestre e Escravo.	42
Figura 24 – Topologia típica de uma rede onde se usa o DNP3 sobre TCP/IP.	44
Figura 25 – Encapsulamento do DNP3 sobre TCP/IP.	45
Figura 26 – DNP3 sobre TCP/IP.	47
Figura 27 - C++ e OTcl: a dualidade.	50
Figura 28 – Estrutura do NS-2.	51
Figura 29 - Arquitetura geral do NS-2.	51
Figura 30 – Organizador de eventos.	52
Figura 31 – Componente de rede enlace.	53
Figura 32 – Exemplo de fluxo de pacotes entre nós.	54

Figura 33 – Formato padrão do arquivo de saída do <i>trace</i> .	55
Figura 34 – Diagrama de estado da estação remota.	57
Figura 35 – Diagrama de estado da estação central.	58
Figura 36 – Diagrama de classe do sistema.	60
Figura 37 – Definição de uma estação <i>Master</i> e estação Remota no ambiente NS-2.	65
Figura 38 - Cenário de simulação da arquitetura multiponto.	66
Figura 39 – Pacote TCP/IP simplificado.	66
Figura 40 - Transmissão de uma mensagem não solicitada	69
Figura 41 - Transmissão de uma mensagem não solicitada e uma função de leitura.	71
Figura 42 - Transmissão de uma mensagem não solicitada e uma função de leitura sem <i>timeout</i> .	72
Figura 43 - Cenário de mensagem não solicitada e função diferente de leitura.	74
Figura 44 - Cenário de reinício por parte da estação remota.	76
Figura 45 - Interligação do imóvel ao sistema <i>smart grid</i> .	78
Figura 46 - Topologia do cenário de simulação da rede cabeada com dados heterogêneos.	79
Figura 47 - Perdas de pacotes com aumento do tráfego no <i>link</i> .	80
Figura 48 - Estação <i>Outstation1</i> enviando pacotes para a estação <i>Master</i> .	82
Figura 49 – Vazão de pacotes.	83
Figura 50 – Histograma do resultado da simulação de atraso.	83
Figura 51 – Histograma do resultado da simulação de <i>jitter</i> .	84
Figura 52 - Blocos de construção do sistema AMI.	85
Figura 53 - Unidade consumidora com medidores inteligentes.	86
Figura 54 - Topologia da rede e conexões.	87
Figura 55 - Estatística média de vazão dos pacotes transmitidos do nó <i>wired</i> W(0) até os nós <i>wireless</i> .	89
Figura 56 - Estatísticas média de vazão de pacotes da primeira simulação do cenário 3.	90
Figura 57 - Resultado do tempo de atraso da primeira simulação do cenário 3.	91
Figura 58 - Resultado do <i>jitter</i> da primeira simulação do cenário 3.	91
Figura 59 - Resultado do tempo de atraso da segunda simulação do cenário 3.	92
Figura 60 - Resultado do <i>jitter</i> da segunda simulação do cenário 3.	93
Figura 61 - Estatísticas média de vazão da terceira simulação do cenário 3.	94
Figura 62 - Resultado do atraso da terceira simulação do cenário 3.	94
Figura 63 - Resultado do <i>Jitter</i> da terceira simulação do cenário 3.	95
Figura 64 - Cenário de uma quadra de um bairro com <i>smart meters</i> .	96

Figura 65 - A área da simulação e a posição de cada nó.....	97
Figura 66 - Estações <i>Outstation</i> enviando pacotes para a estação <i>Submaster</i>	98
Figura 67 - Estatísticas média de vazão da dez <i>Outstation's</i> do cenário 4.	99
Figura 68 – Atraso das <i>Outstation's</i> com até um salto.....	100
Figura 69 – Atraso dos <i>Outstation's</i> com até dois saltos.	101
Figura 70 – Atraso das <i>Outstation's</i> com até três saltos.	101
Figura 71 - <i>Jitter</i> das <i>Outstation</i> com até um salto.	102
Figura 72 - <i>Jitter</i> das <i>Outstation</i> com até dois saltos.	103
Figura 73 - <i>Jitter</i> dos <i>Outstation</i> com até três saltos.....	103
Figura 74 – A área da simulação e a localização de cada nó.	105
Figura 75 – Estações remotas enviando pacotes para a estação <i>Master</i>	105
Figura 76 – Estações remotas enviando dados através de saltos para estação <i>Master</i>	106
Figura 77 – Estatística média de vazão dos <i>Outstations</i>	107
Figura 78– Atraso das <i>Outstation</i> com salto simples.....	108
Figura 79 – Atraso das <i>Outstation</i> com até dois saltos.	108
Figura 80 – <i>Jitter</i> das <i>Outstation</i> com até um salto.....	109
Figura 81 – <i>Jitter</i> das <i>Outstation</i> com até dois saltos.....	110
Figura 82 – Área da simulação e a posição de cada <i>Outstation</i>	111
Figura 83 – Estações <i>Outstations</i> enviando pacotes para a estação <i>Master</i>	112
Figura 84 – Tempo de <i>delay</i> dos <i>Outstation</i> com salto simples.....	113
Figura 85 – Tempo de <i>delay</i> dos <i>Outstation</i> com até dois saltos.	114
Figura 86 – Tempo de <i>delay</i> dos <i>Outstation</i> com até três saltos.....	114
Figura 87 – Tempo de <i>delay</i> dos <i>Outstation</i> com até quatro saltos.	115
Figura 88 – <i>Jitter</i> dos <i>Outstations</i>	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Mensagem não Solicitada: Resultados	70
Tabela 2. Mensagem não Solicitada e função de leitura.....	72
Tabela 3. Resultado do arquivo <i>trace</i> do ns-2	73
Tabela 4. Mensagem não solicitada e função diferente de leitura.....	75
Tabela 5. <i>Restart</i> por parte da estação remota.....	76
Tabela 6. Requisitos de <i>delay</i> para transmissão de mensagem.	77
Tabela 7. Parâmetros assumidos da rede do cenário 1.	79
Tabela 8. Parâmetros da Rede modelada do cenário 2.	82
Tabela 9. Parâmetros da rede modelada do cenário 3.	86
Tabela 10. Parâmetros da rede <i>ad-hoc</i> modelada do cenário 4.	97
Tabela 11. Início da transmissão dos pacotes DNP3 do cenário 4.	98
Tabela 12. Parâmetros da rede modelada do cenário 5.	104
Tabela 13. Parâmetros da rede modelada do cenário 6.	111

LISTA DE SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgment</i> - Reconhecimento
ARP	<i>Address Resolution Protocol</i> - Protocolo de Resolução de Endereços
AODV	<i>Ad-hoc On-Demand Distance Vector</i>
APDU	<i>Application Protocol Data Unit</i>
APCI	<i>Application Protocol Control Information</i>
ASDU	<i>Application Service Data Unit</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i> - Taxa de Bit Constante
CONSER	<i>Collaborative Simulation for Education and Research</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> - Checa Erros de Transmissão
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> - Sensor de Portadora de Múltiplo Acesso com Prevenção de Colisão
CTS	<i>Clear to Send</i> - Liberado para Envio
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i> - Função de Coordenação Distribuída
DNP3	<i>Distributed Network Protocol 3.0</i> – Protocolo de Rede Distribuída
DSDV	<i>Destination-Sequenced Distance-Vector Routing</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> - Espalhamento Espectral de Sequência Direta
EPA	<i>Enhanced Performance Architecture</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i> - Protocolo de Transferência de Arquivos
HMI	<i>Human Machine Interface</i> - Interface Homem-Máquina
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i> - Protocolo de Transferência de Hipertexto
ICCP	<i>Inter Control Center Protocol</i> - protocolo de comunicação entre centros de controle
ICSI	<i>International Computer Science Institute</i>

IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i> - Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica
IP	<i>Internet Protocol</i> - Protocolo de Internet
LBNL	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i>
MAC	<i>Media Access Control</i> - Controle de Acesso ao Meio
Mbps	<i>Megabits per second</i> - Megabits por segundo
NS	<i>Network Simulator</i> - Simulador de Redes
NSF	<i>National Science Foundation</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i> - Interconexão de Sistemas Abertos
OTcl	<i>Object-oriented Tool Command Language</i> - Linguagem de Comandos Orientado a Objeto
PHY	<i>Physical Layer</i> - Camada Física
QoS	<i>Quality of Service</i> - Qualidade de Serviço
RTS	<i>Request to Send</i> - Requisição de Envio
SAMAN	<i>Simulation Augmented by Measurement and Analysis for Networks</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> - Controle de Supervisão e Aquisição de Dados
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> - Protocolo de Controle de Transmissão
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
TSDU	<i>Transport Service Data Unit</i>
TTL	<i>Time To Live</i> - Tempo de Vida
UCB	<i>University of California Berkeley</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> - Protocolo de Transmissão de Dados
USC/ISI	<i>University of Southern California/Information Sciences Institute</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Trabalhos Relacionados	20
1.2	Objetivos do Trabalho	22
1.3	Organização do Trabalho	23
2	SMART GRID	24
2.1	Conceitos Básicos do Sistema SCADA	27
2.1.1	<i>Elementos de um Sistema SCADA</i>	28
2.1.2	<i>Interface Operador-Máquina (IOM)</i>	29
2.1.3	<i>Unidade Central (MTU)</i>	29
2.1.4	<i>Unidade Terminal Remota (RTU)</i>	29
2.1.5	<i>Transdutores</i>	29
3	PROTOCOLO DNP3.....	31
3.1	Construção de uma mensagem DNP3	32
3.2	Camada de Aplicação	34
3.3	Camada Pseudotransporte	37
3.4	Camada Enlace de Dados	38
3.5	Camada Física	39
3.6	Topologia do Protocolo	40
3.7	Camadas do Protocolo DNP3	42
3.8	DNP3 sob TCP/IP	43
3.9	Encapsulamento do Protocolo DNP3 sob TCP/IP	44
3.10	Camada de Gerenciamento de Conexão	46
4	O SIMULADOR DE REDES NS-2.....	48
4.1	Histórico do NS	49
4.2	A Linguagem do NS	50
4.3	Objeto Organizador de Eventos	52
4.4	Objeto Componente de Rede	52
4.5	O Arquivo <i>trace</i> da Simulação	54
5	PROTOCOLO DNP3 no NS-2	56
5.1	Implementação do <i>patch</i> para NS-2 na versão 2.35 para rede <i>wireless</i>	56

5.2	Diagramas de Estados	57
5.3	Diagrama de Classes	59
6	Simulações e resultados	63
6.1	Transmissão de funções Básicas do Protocolo DNP3 Sobre TCP/IP	68
6.1.1	<i>Transmissão de Mensagem Não Solicitada</i>	<i>68</i>
6.1.2	<i>Transmissão de Mensagem Não Solicitada e uma Função de Leitura.....</i>	<i>70</i>
6.1.3	<i>Transmissão de Mensagem não Solicitada e Função Diferente de Leitura</i>	<i>74</i>
6.1.4	<i>Transmissão de Mensagem de Reinício da Estação Remota.....</i>	<i>75</i>
6.2	Cenários Simulados e Analisados	77
6.2.1	<i>Simulação do cenário 1 com topologia ponto-a-ponto em uma rede cabeada com tráfego heterogêneo</i>	<i>78</i>
6.2.2	<i>Simulação do cenário 2 com topologia multi-ponto em uma rede WLAN IEEE 802.11b ad-hoc em infraestruturas críticas.....</i>	<i>81</i>
6.2.3	<i>Simulação do cenário 3 com topologia multi-ponto em uma rede mista IEEE 802.3 e IEEE 802.11b em aplicações smart meter</i>	<i>84</i>
6.2.4	<i>Simulação do cenário 4 com topologia multi-ponto em uma rede IEEE 802.11b ad-hoc em aplicações smart meter.....</i>	<i>95</i>
6.2.5	<i>Simulação do cenário 5 com topologia multi-ponto em uma rede IEEE 802.11b ad-hoc em aplicações smart grid</i>	<i>104</i>
6.2.6	<i>Simulação do cenário 6 com topologia multi-ponto em uma rede IEEE 802.11g ad-hoc em aplicações smart grid</i>	<i>110</i>
6.2.7	<i>Conclusões dos resultados obtidos das simulações dos cenários</i>	<i>116</i>
7	Conclusões.....	119
	Apêndice A – Artigos Publicados Relacionados ao Presente Trabalho	125

1 INTRODUÇÃO

O sistema convencional de rede elétrica possui um fluxo de energia unidirecional partindo das usinas geradoras para os consumidores. O transporte de energia elétrica é composta de dois sistemas primários: transmissão e distribuição.

A energia elétrica é produzida em grandes e/ou pequenas plantas de geração, transmitida até as subestações de distribuição localizadas em regiões próximas dos consumidores, quando comparadas as subestações de transmissão. As subestações de distribuição fornecem energia elétrica para os consumidores (HASSAN; RADMAN, 2010).

Nos últimos anos, com o aumento crescente da demanda por energia elétrica, as operações dos sistemas elétricos de potência tornaram-se muito complexas com o número crescente de interligações (CORMANE, 2013).

Um dos principais desafios enfrentados pelo setor produtivo elétrico é a crescente necessidade de geração de energia elétrica, para atender toda a demanda com um nível de confiabilidade, qualidade e eficiência. A crescente demanda por energia elétrica é o reflexo do aumento do núcleo populacional principalmente pelo desenvolvimento industrial, obrigando as empresas distribuidoras do setor elétrico a combater às perdas não técnicas de energia elétrica.

As perdas de energia das concessionárias de distribuição do setor elétrico são a diferença entre a energia requerida para suprir as necessidades dos consumidores e a energia efetivamente faturada. Normalmente, essas perdas são classificadas em duas categorias, perdas técnicas e perdas não técnicas.

Perdas técnicas são as perdas inevitáveis relacionadas ao processo de transmissão e distribuição de energia, onde parte da energia é dissipada por efeito *Joule* em cabos e condutores, transformadores de tensão, conservação dos medidores de energia eletromecânicos e vários outros equipamentos que compõem o sistema de energia elétrica.

As perdas não técnicas são consideradas como perdas comerciais em decorrência do uso irregular da energia ocasionado por adulteração e violação dos equipamentos de medição, ligações clandestinas, erros de leitura, fraude no consumo de eletricidade e inadimplências (MEDEIROS, 2013).

De acordo com Medeiros (2013) os prejuízos gerados com as perdas comerciais no Brasil chegam a quase R\$ 7 bilhões por ano, correspondendo a 13% da energia consumida.

Com o objetivo de reduzir as perdas comerciais e as perdas técnicas, o sistema elétrico vem passando por grandes transformações com a aplicação de novas tecnologias em eletrônica de potência e da tecnologia de informação e comunicação (TIC).

Entre as partes principais dos domínios que tradicionalmente compõem o conjunto da rede elétrica como o sistema de geração, transmissão, distribuição e consumidor, o sistema de distribuição é o que está sofrendo uma maior mudança com a implantação das redes inteligentes.

A geração distribuída gera uma grande alteração no sistema unidirecional do fluxo de energia, redistribuição de sistemas, dispositivos de proteção, novos equipamentos de controle e monitoramento, dispositivos de rede de comunicação, regulamentos dos diferentes agentes reguladores do sistema elétrico e seleção de tecnologias de comunicação mais adequada para os tipos de aplicação em *smart grid*.

Toda essa mudança exige novos sistemas de comunicação e o uso das diversas tecnologias disponíveis para executar com maior eficiência as funções de controle e monitoramento dos elementos que compõem a rede de distribuição de uma forma confiável e segura.

A rede de telecomunicação é vital para assegurar o bom funcionamento do sistema em geral, integrando o sistema de geração, centro de controle ao nível de transmissão, automação do sistema de subestação, automação e controle do sistema de distribuição e a *Advanced Metering Infrastructure* (AMI).

O centro de controle com o passar do tempo vem migrando de um modo centralizado para distribuído, caracterizado por utilizar um sistema de monitoramento de *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) sobre o *Internet Protocol* (IP), integração com os *Energy Management System* (EMS) e o *Building Management System* (BMS) em um modelo de gerenciamento de dados em comum (IEEE STD 1815-2010, 2010).

Uma das principais funções do centro de controle é concentrar-se sobre o funcionamento do sistema através do sistema SCADA, compostos por *hardware* e *software* que coletam as informações dos sensores sobre a operação atual do sistema e armazenamento para serem analisados posteriormente por outros aplicativos.

Pode-se definir o sistema SCADA como o funcionamento de um sistema codificado através de um canal de comunicação para prover sinais de controle sobre equipamentos remotos. O sistema de supervisão pode ser combinado com o sistema de aquisição de dados adicionando o uso de sinais codificados sobre canais de comunicação para adquirir as

informações sobre os estados dos equipamentos remotos, para visualizar e armazenar os sinais de funções (IEEE, 1987).

A aplicação do sistema SCADA no setor elétrico consiste de *Remote Terminal Units* (RTUs) e *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) encontrados em dispositivos de rede, tais como banco de capacitores, transformadores, religadores e interruptores em subestações. A estação central está localizada no centro de controle e atua como um agente para monitorar e controlar o funcionamento das operações da rede elétrica.

A função principal de uma subestação de distribuição é a redução de tensão a níveis dos consumidores e fornecer isolamento de potenciais falhas do sistema. A automação do sistema de distribuição ofereceu novos recursos, tais como a emissão de alarmes, a automação dos interruptores de alimentadores, melhoria na detecção de falhas, isolamento e restauração de falhas que por sua vez reduz a duração e frequência da interrupção de energia elétrica.

Através da auto recuperação da rede de energia elétrica (*self-healing*), isolar a interrupção de energia em setores menores afetando um mínimo de usuários e restaurando o sistema através de circuitos alternativos na rede de energia elétrica, todas essas operações são realizadas de forma autônomas e monitorada através do centro de controle (AGUERO, 2012).

Os protocolos de comunicação existentes atualmente que atendem os requisitos de comunicação no sistema SCADA, são o *Distributed Network Protocol version 3* (DNP3), *International Electrotechnical Commission* (IEC-60870-5) e um novo protocolo ainda em desenvolvimento IEC-61850. Os protocolos DNP3 e IEC-60870-5 são padrão e amplamente utilizado para a comunicação entre dispositivos e são recomendados para comunicação entre os dispositivos de automação pelas organizações como a *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e *Electric Power Research Institute* (EPRI) (IEEE STD 1379-2000, 2001)-(IEEE STD C37.1-2007 (Revision of IEEE STD C37.1-19, 2008).

A norma do protocolo de comunicação DNP3 foi desenvolvida para otimizar a transmissão de dados e de comandos entre dois dispositivos RTUs ou IEDs ou entre o centro de controle do sistema SCADA com as estações remotas. É um protocolo padrão aberto mantido pelo comitê *DNP3 User Group* responsável pela melhoria e atualização das documentações ou recomendações.

Os objetivos principais do DNP3 são:

- Garantir a alta integridade dos dados: ao estar em um ambiente sujeito as interferências eletromagnéticas, o protocolo prevê retransmissões de dados em nível de aplicação e enlace.

- Flexibilidade: em nível de aplicação pode-se obter três classes de objetos com funcionalidades diferentes.
- Funções múltiplas: oferece funções de operação como mensagens por eventos, mensagens solicitadas e mensagens não solicitadas, aumentando a eficiência da rede de comunicação.

A aplicação dentro do sistema SCADA representa um dos sistemas com maior sensibilidade à latência e a confiabilidade de dados. O estudo destes parâmetros permite o desenvolvimento de novos sistemas que atendam aos requisitos, com a adição de novas funcionalidades na rede de distribuição.

A implementação desses protocolos se aplica tanto no interior de uma subestação quanto ao centro de controle onde são empregados diferentes tipos de tecnologias de comunicação. Em uma subestação, geralmente há um controle distribuído em um canal de comunicação RS485, RS232, rede local (LAN) ou fibra ótica.

Na comunicação entre dispositivos em nível de automatização do sistema de distribuição são empregados principalmente uma rede celular *General Packet Radio Services* (GPRS) ou *High Speed Packet Access* (HSPA), seguida pela banda livre não licenciada com frequência de 900 MHz, *Wireless Local Area Network* (WLAN), banda licenciada, redes de longa distância, *Wide Area Network* (WAN) ou uma opção potencial do uso de tecnologias de comunicação via satélite. Embora as tecnologias de comunicação via satélite não atendam os parâmetros de qualidade, a sua aplicação é necessária devido à sua cobertura universal em locais remotos, onde a implantação de um outro tipo de tecnologia é impraticável.

O *smart grid* é a aplicação de tecnologia da informação no sistema elétrico, modernizando o sistema de distribuição de energia, através da integração e infraestrutura de rede automatizada no sistema de comunicação. Envolve a instalação de sensores nas linhas de transmissão da rede de energia elétrica, com um sistema de comunicação segura e confiável em duas vias estabelecidas. A rede inteligente monitorada torna-se uma rede mais eficiente, protegendo os seus elementos interligados desde o gerador central com uma rede de alta tensão até o sistema de distribuição ao usuário final (SINHA et al., 2011).

A parte de monitoração e controle da rede inteligente é realizada através do protocolo de comunicação denominado DNP3, uma arquitetura em camadas. Seguindo o modelo *Open System Interconnection* (OSI), compreendido por 7 camadas, o DNP3 adere a um protocolo simplificado de três camadas, proposto pela IEC para implementações mais simples, chamado de *Enhanced Performance Architecture* (EPA). Criado para utilização em aplicações de grande porte, comunicação segura, com moderada velocidade e baixa/média transmissão de

dados. A vantagem deste protocolo é a sua flexibilidade, permitindo o seu emprego em qualquer plataforma de *hardware*, além da grande variedade de comando para ser utilizado dependendo da aplicação escolhida (IEEE P1815/D11, April 2012 - Approved Draft, 2012).

Idealmente, uma rede de comunicação em aplicações *smart grid* deve ser altamente confiável, extremamente segura e tolerante à falhas. Uma ferramenta que pode auxiliar na análise de desempenho da rede a ser implantada, ainda nas fases iniciais do projeto, é um simulador de rede à evento discreto como o *Network Simulator* (NS-2) incorporando o DNP3 através do encapsulamento. Isso permite o estudo de vários cenários e resultados que só poderiam ser obtidos em testes de laboratório (em pequena escala) ou testes de campo. A vantagem da simulação dos estudos de casos é a economia de tempo, custo financeiro e equipamentos. Optou-se pelo NS-2 porque é amplamente empregado na área acadêmica por suas características, como código aberto e a possibilidade de adição de novas funções na sua biblioteca.

1.1 Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta uma base necessária para entender os conceitos que se relacionam com os protocolos de comunicação do sistema de energia elétrica, a recente evolução do uso da tecnologia de informação e comunicação no sistema de energia elétrica. A energia elétrica é uns dos meios mais importantes para o desenvolvimento da sociedade humana. Uma falha no sistema de transmissão de energia elétrica, com interrupções de energia elétrica, pode causar enormes prejuízos às indústrias e fábricas (HEYDT; VITTAL; PHADKE, 2000).

O sistema de energia elétrica é considerado uma infraestrutura crítica. O sistema elétrico pode ficar vulnerável em face de possíveis anormalidades do sistema causado por falhas de controle, sistema de comunicação ou proteção, falhas de operação humana. Portanto, manter o fornecimento de energia estável e confiável, com qualidade, é uma função muito importante do projeto do sistema elétrico.

A tecnologia de informação e comunicação desempenha um papel crucial no sistema de eletrônica de potência (ADAMIAK; PREMIERLANI, 1999). Nas aplicações do sistema SCADA, medições remotas, monitoramento, controle e proteção são fundamentais para o bom funcionamento do sistema elétrico e manter um sistema confiável e com estabilidade (HEYDT et al., 2001).

Inicialmente, a maioria das TIC empregadas no sistema elétrico tradicional era aplicada localmente tendo em foco as ações de controle no nível de subestação, pela falta de infraestrutura de comunicação confiável e eficiente com alta velocidade e largura de banda (ADAMIAK; REDFERN, 1998).

Atualmente com o avanço da tecnologia no setor de redes de computadores e também na área do setor de eletrônica de potência, surgem várias investigações sobre a integração da TIC no sistema de energia elétrica, com a finalidade de tornar as redes elétricas tradicionais numa rede inteligente, eficiente, segura, tolerante a falhas com auto recuperação, é reduzir as perdas técnicas bem como eliminar as perdas comerciais.

De acordo com (LU et al., 2011) a *smart grid* é a próxima geração do sistema de energia elétrica que incorpora a infraestrutura com a tecnologia de informação. Nas aplicações em *smart grids*, dispositivos elétricos são interligados para suportar uma grande variedade de mecanismos inteligentes, tais como a proteção de relé e reposta à demanda. Para habilitar esses mecanismos, as informações devem ser entregues em tempo hábil através do protocolo de redes.

Para abordar as questões de latência nas redes de comunicação (LU et al., 2011) estabeleceu uma micro *smart grid*, para mensurar o desempenho de latência de um protocolo predominante do sistema SCADA, o DNP3 sob TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*). Os resultados de (LU et al., 2011) mostram que, apesar do DNP3 sob TCP/IP ser amplamente considerado como um protocolo de comunicação de *smart grid*, não pode ser utilizado em aplicações que exigem um atraso menor que 16 ms em micro rede, tais como a proteção de relés. Os mecanismos de confiabilidade do DNP3 são semelhantes ao TCP e constatou-se que o desempenho de latência com a sobreposição induz a um aumento de latência de 50% a 80%. Mas os resultados indicam que o atraso no DNP3 sob TCP/IP pode ser otimizado, pois é um protocolo de comunicação leve e essencial para tempos críticos em aplicações de *smart grid*.

O sistema de redes inteligentes apresenta interconexões onipresentes de equipamentos elétricos para permitir os fluxos bidirecionais de eletricidade e de informação para diversas aplicações de gerenciamento de energia inteligente, tais como a proteção precisa dos relés e resposta a demanda em tempo hábil. Para cumprir essas interconexões de equipamentos, uma infraestrutura de comunicação é vital para a *smart grid*.

De acordo com (LU; WANG; MA, 2013) há extensas pesquisas sobre diferentes *layouts* de infraestrutura de comunicação no *smart grid* por levantamentos de tecnologias de transmissão de dados viáveis, seja cabeada ou sem fio, tais como o PLC (*Power Line*

Communication) e redes celulares. No entanto, no sentido de uma solução de uma comunicação operável, compatível com o custo e eficiência, ainda há necessidade de mais exemplos práticos e uma maior compreensão em relação aos requisitos de comunicação, protocolos aplicáveis e desempenhos do sistema.

Em seu trabalho, Lu, Wang e Ma (2013), realizaram um estudo de caso de um projeto de demonstração de *smart grid*, o gerenciamento de entrega de energia elétrica renovável futura (FREEDM). Foram investigados cenários de comunicação, esclarecendo os requisitos de comunicação explícitas em caso de uso do FREEDM, adotando o protocolo de comunicação predominante DNP3 sob TCP/IP, para estabelecer conexões entre dispositivos elétricos para a troca de informações em um ambiente de pequena escala, dentro de um cenário real, para mensurar o desempenho de entrega de mensagens da infraestrutura baseado no DNP3.

1.2 Objetivos do Trabalho

Uma rede de comunicação envolvendo aplicações críticas, como é o caso da transmissão e distribuição de energia elétrica, deve ser altamente confiável, extremamente confiável e resiliente a falhas. Para realizar análises de desempenho de uma rede de comunicação a ser implantada com os resultados desejáveis, é preciso realizar vários testes e estudos em laboratórios com cenários similares onde serão instalados o qual dificulta a construção de um cenário real para realizar tais pesquisas. Além dos equipamentos serem muito onerosos e dependendo da extensão e quantidade de dispositivos que serão implantados, tornam impossíveis as realizações em cenário real para poder prever qualquer eventualidade de possíveis falhas. A melhor opção para resolver os problemas de custos e de extensão é utilizar os softwares de simulação que são ferramentas convenientes nesses casos e comumente empregadas na área de pesquisa, para realizar a análise e o desempenho de um sistema. O objetivo principal deste trabalho é implementar o protocolo de comunicação DNP3 no simulador de rede NS-2 para realizar simulações sob redes sem fio e cabeadas, também em redes mistas, baseado no aplicativo já existente o NS-2 do TCP com as características de transmitir dados das aplicações HTTP. O NS-2 é o simulador de redes mais utilizado no meio acadêmico e nas grandes empresas de telecomunicações, permite criar todo tipo de topologia de rede e analisar qualquer protocolo, para essa pesquisa são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar os conceitos do sistema de *smart grid*;
- Realizar análises de desempenho de rede de comunicação sem fio envolvendo aplicações *smart grid*, através de resultados obtidos de simulações de cenários;
- Realizar simulações em redes mistas com tráfego de dados heterogêneos.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

- ✓ Capítulo 2 – *smart grid* – detalha o sistema e a arquitetura, bem como as tecnologias que compõem cada uma de suas partes;
- ✓ Capítulo 3 – Protocolo DNP3 – descreve o funcionamento do protocolo, as divisões dos níveis de camada de comunicação, topologias utilizadas e o encapsulamento sobre uma rede TCP/IP;
- ✓ Capítulo 4 – Simulador de Redes NS-2 – apresenta um breve histórico do *Network Simulator* (NS-2), a linguagem de programação utilizada, os objetos organizadores de eventos, objetos de redes e detalha o arquivo resultante das simulações;
- ✓ Capítulo 5 – Protocolo DNP3 no NS-2 – apresenta a implementação do protocolo DNP3 encapsulado sobre uma rede TCP/IP de forma detalhada no NS-2 através de um *patch*, o modelo NS-2/DNP3 que realiza as simulações do DNP3 dentro do NS-2;
- ✓ Capítulo 6 – Simulações e Resultados - detalha sobre as simulações realizadas com exemplos das principais funções do protocolo de comunicação DNP3, apresenta também a simulação de cinco cenários de possíveis implementações reais e finalmente discute os resultados obtidos em cada cenário simulado;
- ✓ Capítulo 7 – Conclusões – apresenta as considerações finais do trabalho, resumindo as discussões apresentadas no decorrer do mesmo, bem como os trabalhos futuros.

2 SMART GRID

Na visão de alguns especialistas a forma como está distribuída a energia elétrica apresenta deficiências, porque depende de uma única fonte geradora, caso haja uma falha, todos ficam sem energia elétrica. Quando se analisa a forma como é realizada a medição também se conclui que não é justa com o consumidor porque os medidores são obsoletos, analógicos e as medições não são precisas, resultando em uma probabilidade de erros muito grande. Partindo desse pressuposto, já existe uma proposta em fóruns internacionais, para a criação de uma rede de energia inteligente, conhecida pelo nome de *smart grid* que visa melhorar o consumo de energia.

Camargo (2009, p.1) ressalta a ideia de que a lógica de *smart grid* está em uma palavra: inteligência. O mesmo propõe que as redes novas serão automatizadas com medidores de qualidade e de consumo de energia em tempo real, ou seja, a residência irá conversar com a empresa geradora de energia e, em um futuro próximo, até fornecer eletricidade para a mesma. A inteligência também será aplicada no combate à ineficiência energética, isto é, a perda de energia ao longo da transmissão.

Esta nova rede proposta irá diminuir as irregularidades atuais, tais como o furto de energia elétrica, a medição do consumo e identificação das possíveis falhas à distância, sem a necessidade do técnico se deslocar até o domicílio para verificação do medidor, estas são as maiores vantagens do *smart grid*.

Lima e Jannuzzi (2011) mencionam os estudos da *Electric Power Research Institute* (EPRI). Os mesmos afirmam que o conceito de *smart grid* “é a sobreposição de um sistema unificado de comunicações e controle sobre a infraestrutura existente de energia para fornecer as informações corretas à entidade, de equipamentos da rede como medidores, transformadores, sistemas de controle da transmissão, distribuição, consumo, etc., no momento certo, para a tomada de decisões. É um sistema que otimiza as fontes de energia, minimiza as perdas, se autorecupera e permite aplicações de última geração para a eficiência energética e de resposta à demanda”.

Em suas contundentes observações, (LIMA; JANNUZZI, 2011 p.47), explana que *smart grid* deve:

- Prover a transição da rede de um sistema radial para uma verdadeira rede, garantindo a conectividade desde a geração até os clientes finais;

- Converter o sistema eletromecânico em um sistema totalmente digital, garantindo suporte ao controle e automatização informatizados de seus ativos;
- Permitir uma comunicação bidirecional na rede, de modo que os clientes possam, se quiserem, passar sua participação passiva a ativos (por exemplo, como cogeneradores).

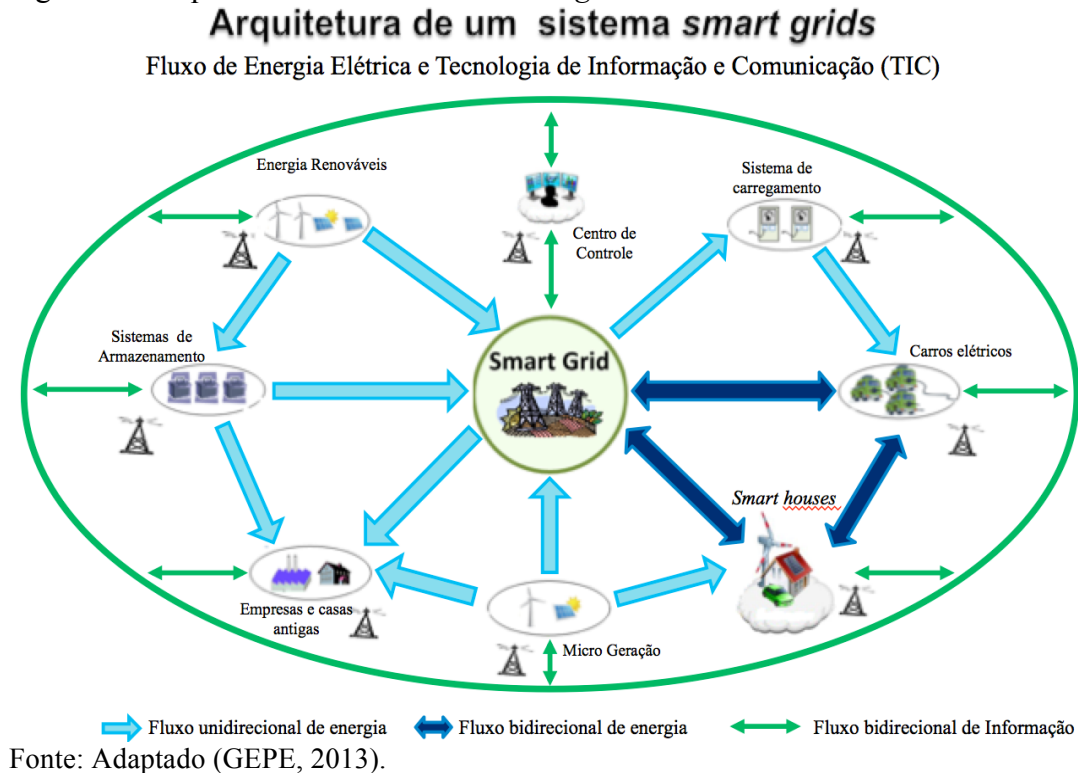
Na Figura 1 ilustra-se algumas vantagens do sistema inteligente de monitoramento em todas as etapas de transmissão de energia elétrica e a Figura 2 apresenta a arquitetura de um sistema *smart grid*.

Figura 1 - Como funciona a *smart grid*.



Fonte: Adaptado (CAMARGO, 2009).

Figura 2 – Arquitetura de um sistema *smart grid*.



Smart grid, em linhas gerais, são redes de energia elétrica automatizadas, com infraestrutura que permite a integração de equipamentos e sistemas de comunicação de dados de forma gerenciada, aumentando a interoperabilidade no sistema elétrico. A rede inteligente para melhorar a eficiência utiliza a comunicação bidirecional, fornecendo mais confiabilidade e segurança na transmissão e distribuição de energia elétrica (LAMIN, 2009).

O setor de geração e distribuição de energia elétrica vem se adaptando à necessidade de modernizar com o avanço da tecnologia, incluindo também a integração com diversas fontes de geração de energia renováveis, para melhor aproveitamento dos recursos e da demanda, diminuir as perdas no sistema e emissões de carbono na atmosfera.

As principais partes que tradicionalmente compõem o conjunto do sistema elétrico são: geração, transmissão, distribuição e consumo. O sistema de distribuição é o que tem maiores mudanças com o aparecimento da rede inteligente e a geração distribuída. Geram grandes mudanças no sistema do fluxo unidirecional de energia, redistribuição de sistema e elementos de proteção, sistemas novos de monitoramento e controle dos dispositivos na rede, regulamentação dos diferentes tipos de dispositivos do setor e seleção de tecnologia de comunicação.

Essas mudanças requerem novos esquemas de comunicação, a utilização de vários e diferentes tipos de tecnologias disponíveis para desempenhar eficientemente as tarefas de

controle e monitoramento dos elementos, os quais compõem a rede de distribuição de uma forma confiável e segura. Para assegurar um funcionamento correto do sistema é vital a utilização de uma rede de comunicação com a integração do sistema de geração, transmissão, distribuição, subestações, além da distribuição de recursos energéticos como infraestrutura avançada de medição.

Os centros de controle com o passar do tempo vem evoluindo para passar de um controle centralizado para o modo descentralizado, caracterizado por um sistema SCADA baseado sob IP, integrado com o sistema de gerenciamento de energia e sistema de gestão empresarial, manipulação de modelos de dados em um modelo de informação comum e software *middleware* (JAIMES, 2012).

Estes aspectos levaram a necessidade de atualização e modernização das redes elétricas, direcionada a operar com os problemas e requisitos apresentados atualmente, essa rede inteligente e moderna, na qual é possível controlar e monitorar a geração, distribuição e utilização de energia provida pela mesma. Considerando a modernização da rede elétrica, são associados os seguintes conceitos: confiabilidade, eficiência, segurança, preservação ambiental e competitividade.

Conforme (TORRI, 2012), a rede inteligente não é uma derivação de apenas uma tecnologia, mas, sim do conjunto de diversas partes. Cada uma destas partes do componente é responsável por elevar o nível de inteligência da rede.

O desafio atualmente é a construção de cidades mais inteligentes, com mais eficiência e sustentável na questão energética. A rede inteligente posiciona-se como um conceito fundamental para atingir as metas propostas.

A projeção do sistema de *smart grid* para o futuro prevê um conjunto de conceitos e funcionalidades: como auto-reparação, motivação e envolvimento dos consumidores, resistência a ataques e desastres, maior eficiência e acomodação de todas as opções de geração e armazenamento de energia. Com essas características, preveem um sistema de distribuição de energia elétrica mais flexível e distribuída, mais inteligente, mais controlável e mais segura que o atual sistema de rede elétrica (SILVA, 2011).

2.1 Conceitos Básicos do Sistema SCADA

De acordo com Clarke, Reynders e Wright (2004), SCADA é um software de aplicação de controle que faz comunicação com dispositivos de campo e controla processos industriais de forma automática a partir de um computador.

O sistema SCADA permite monitorar e controlar uma instalação industrial ou equipamentos, obter e processar as informações de processos industriais dispersos ou em locais remotos. A aquisição de dados é executada pelas unidades terminais remotas (RTUs) que exploram as entradas de informação dos dispositivos localizados em campos conectados a eles, também pode ser operado pelos controladores lógicos programáveis (PCLs) com a função dos RTUs.

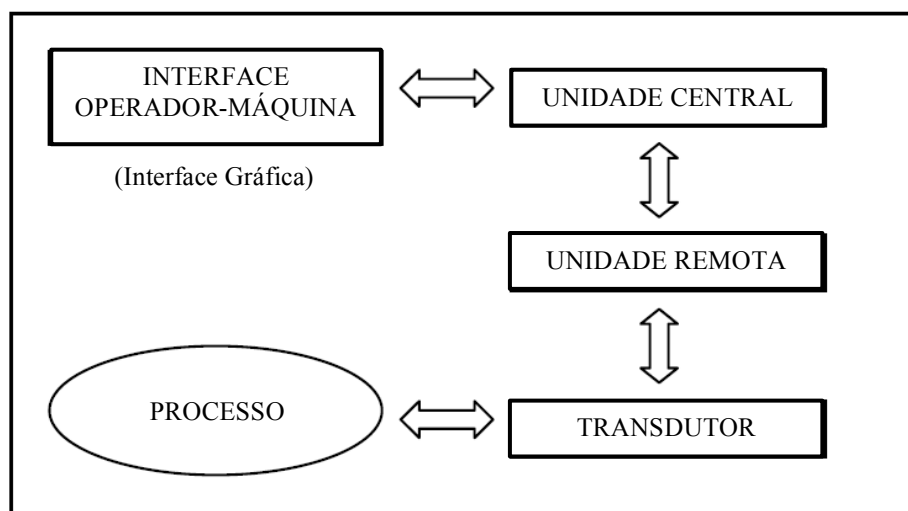
As informações são transmitidas a um local para supervisão, controle e processamento, geralmente uma sala ou um centro de controle. Um sistema SCADA permite então supervisionar e controlar simultaneamente processos e instalações distribuídos em grandes áreas, e gerenciar um conjunto de informações processadas, como por exemplo, apresentação de tendências em gráfico e histórico das informações de operação e manutenção preventiva (CLARKE; REYNDERS; WRIGHT, 2004).

2.1.1 Elementos de um Sistema SCADA

Um sistema SCADA é formado por:

- Unidade Central ou Unidade Terminal Mestre (MTU);
- Unidade Terminal Remota (RTU);
- Sistema de Comunicações;
- Instrumentação de campo.

Na Figura 3 apresenta-se o diagrama de blocos dos componentes de um sistema SCADA.



Fonte: Adaptado (CLARKE; REYNDERS; WRIGHT, 2004).

2.1.2 Interface Operador-Máquina (IOM)

O IOM é uma interface gráfica entre o operador e o sistema controlado e supervisionado. Esta interface é composta de *hardware* e *software*, através desta interface os operadores podem monitorar o estado de um processo, interromper manualmente as operações de controle automático em casos de emergências, modificar os valores de referências. A finalidade do ambiente gráfico é proporcionar e tornar mais amigável a interação entre o controlador e o sistema.

2.1.3 Unidade Central (MTU)

A MTU executa as ações de controle (programado), com base nos valores atuais das variáveis, que são responsáveis pelo armazenamento e processamento de dados ordenados de forma que outro aplicativo ou dispositivo possa acessá-los. A programação é realizada por meio de blocos e a linguagem de programação é de alto nível (C, *Basic*, etc.).

2.1.4 Unidade Terminal Remota (RTU)

As RTUs são as estações localizadas no campo e responsáveis por coletar e enviar algumas informações para a unidade central.

Sistema de Comunicações: Responsável pela transferência de dados do ponto em que operações são executadas, para o ponto onde se supervisiona e controla o processo.

2.1.5 Transdutores

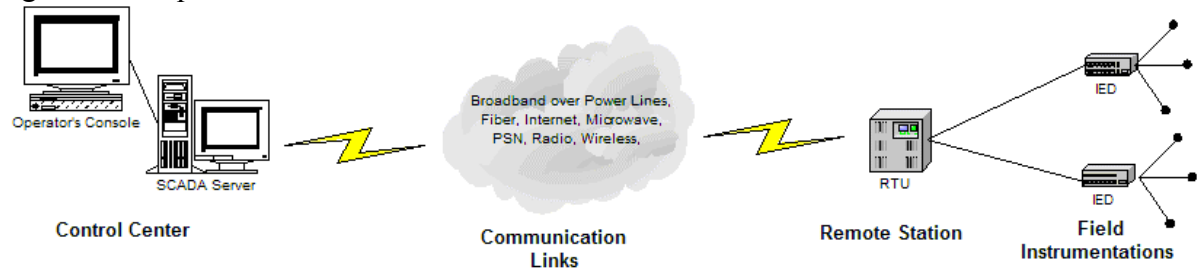
São os elementos que permitem a conversão de um sinal físico em um sinal elétrico (e vice-versa). Sua calibração é muito importante para que não haja problema com os valores de dados (CLARKE; REYNDEERS; WRIGHT, 2004).

Os elementos da arquitetura SCADA são apresentados na Figura 4. As Estações Remotas (RTUs), localizadas a direita da figura, são interligadas na instrumentação de campo através de rede cabeada. As RTUs são utilizadas para a comunicação dos dados e controle de dispositivos remotos, recolhem e concentram os dados dos instrumentos de campo transferindo-os para a estação central.

O servidor SCADA utiliza um centro de controle com interface homem-máquina que realiza a busca. A taxa de transferência dos RTUs é definida pelo usuário através de vários links de comunicação (fibra ótica, rádio, modem, micro-ondas, telefone, *wireless*, *powerline* e *internet*). O servidor SCADA é programado para coletar dados e reformatar a partir de sítios

remotos que detectam mensagens de alarme relatadas pelos RTUs. Essas mensagens são emitidas quando o estado de um ponto terminal é alterado inesperadamente (MAJDALAWIEH; PARISI PRESICCE; WIJSEKERA, 2006).

Figura 4 – Arquitetura do sistema SCADA.



Fonte: (MAJDALAWIEH; PARISI PRESICCE; WIJSEKERA, 2006).

3 PROTOCOLO DNP3

O DNP3 criado em 1990, pela divisão de controle da GE Harris, é um protocolo baseado nas primeiras especificações do IEC/60870-6-802. Com uma implementação mais simples que a do *Inter Control Center Protocol*, protocolo de comunicação entre centros de controle (ICCP), as principais funcionalidades são (ZARUR, 2005):

- Enviar e receber informações de tipos diferentes em uma mesma mensagem;
- Fragmentar a mensagem em pequenos pacotes de forma a garantir um mecanismo de detecção e recuperação de erros robustos;
- Somente envia valores que variaram;
- Permite estabelecimento de prioridades entre os serviços;
- Implementa mecanismo de notificação;
- Suporta mecanismos de sincronização;
- Permite múltiplos mestres e operações ponto a ponto;
- Possibilita o envio de arquivos.

O protocolo DNP3 é um bom exemplo das funcionalidades mínimas, em termos de envio e recebimento de dados, necessárias pela rede de supervisão e controle. A partir de 1993 o protocolo foi cedido ao domínio público do grupo de membros DNP da internet (*DNP Users Group*).

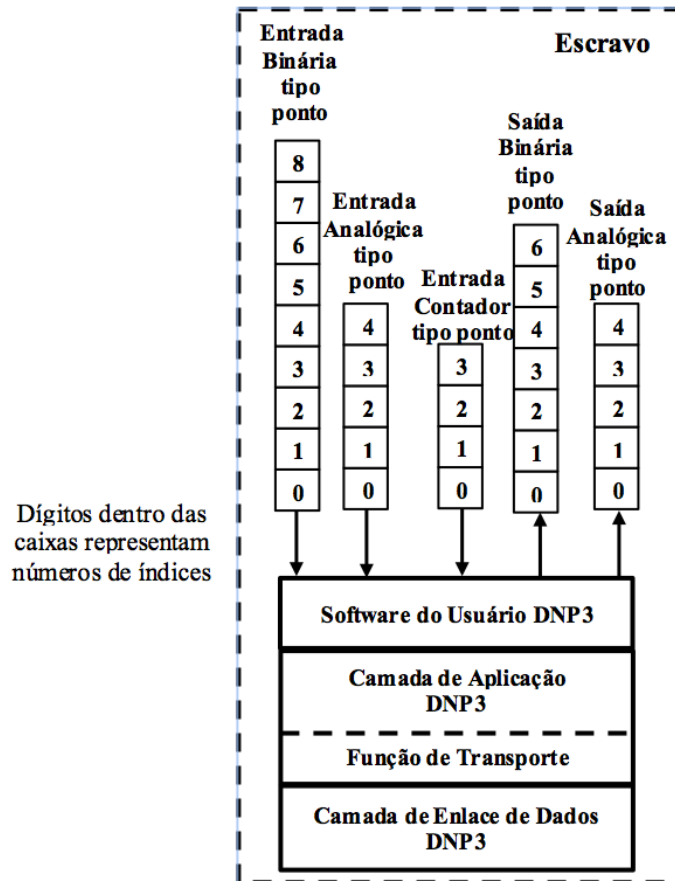
Conforme Clarke, Reynders e Wright (2004), o DNP3 é um protocolo desenvolvido para operar somente em canais de comunicação serial, mas, também pode ser utilizado sobre *ethernet*; para tal, não é necessário fazer qualquer alteração do pacote que é utilizado em meios de comunicação serial.

O DNP3 é um protocolo de comunicação de código aberto. Dispositivos com algum poder de processamento e armazenamento de dados, interligando dispositivos remotos, monitorando e coletando informações são denominados de estação central (*Master*). Já os dispositivos localizados em campo (residência dos usuários, linhas de transmissão, sub-estações, transformadores) encarregados de coletar dados dos sensores e enviar a estação central são denominados estação remota (*Outstation*).

Na Figura 5 ilustra-se a arquitetura dos níveis da camada do protocolo e os tipos de pontos de entrada/saída da estação remota (BAGARIA; PRABHAKAR; SAQUIB, 2011).

O ponto é um tipo de dado de entrada ou saída, os dados de entrada são obtidos dos sensores e os dados de saída são sinais de controle. Pode-se observar na Figura 5 que cada tipo de ponto possui um índice identificando pontos do mesmo tipo. O valor mínimo do índice é zero.

Figura 5 – Níveis de camadas e o tipo ponto de entrada/ saída.



Fonte: Adaptado de (IEEE Std 1815-2010, 2010)

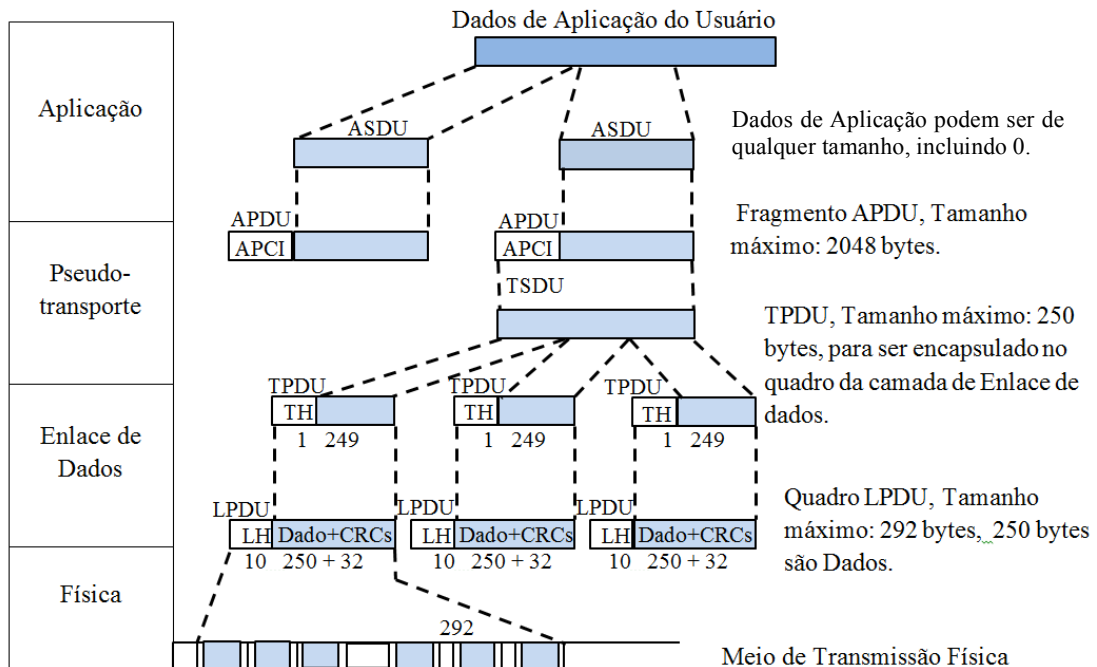
3.1 Construção de uma mensagem DNP3

Na Figura 6 ilustra-se como uma mensagem transmitida é construída no protocolo DNP3. Cada camada leva a informação passando desde a camada mais alta e incorporando as informações ligadas com os serviços realizados por essas camadas; a informação adicional é adicionada como cabeçalho da mensagem. Assim durante a montagem da mensagem, a mesma vai aumentando de tamanho cada vez que passa por uma camada.

Também é desfragmentada neste mesmo processo em unidades de dados menores os que passaram de 292 bytes. As mensagens no nível de camada de aplicação são denominadas fragmentos, já na camada de pseudotransporte recebe o nome de segmento. Mensagens no

nível da camada de enlace são chamadas de quadros (*frames*), e na camada física as mensagens são convertidas em cadeia de bits, para serem transmitidos por meio físico (CLARKE; REYNDERS; WRIGHT, 2004).

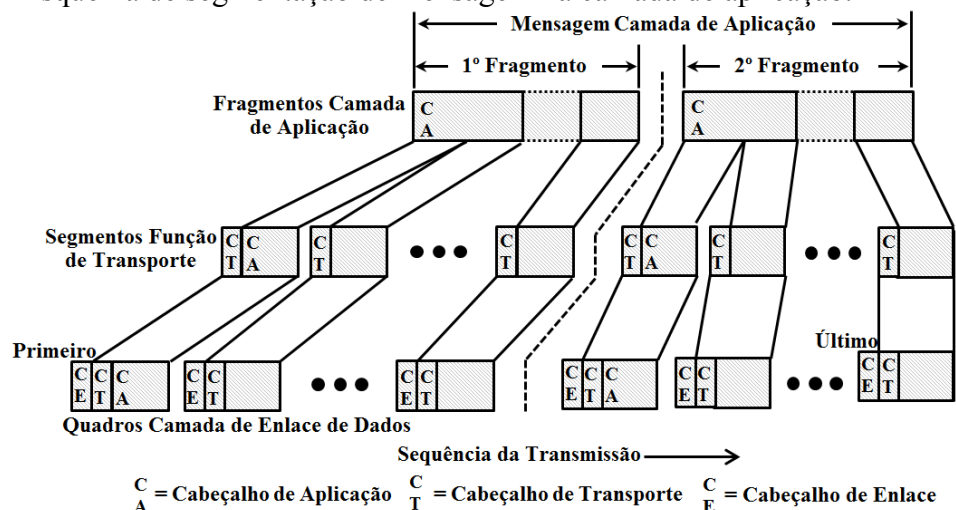
Figura 6 – Construção de uma mensagem DNP3.



Fonte: Adaptado (CLARKE; REYNDERS; WRIGHT, 2004).

Na Figura 7 mostra-se o esquema de segmentação de mensagem no nível da camada de aplicação.

Figura 7 – Esquema de segmentação de mensagem na camada de aplicação.



Fonte: Adaptada (CLARKE; REYNDERS; WRIGHT, 2004).

3.2 Camada de Aplicação

Os dados do usuário são dados que chegam através de aplicação de usuário, tanto pode ser vista como camada de aplicação, como pode ser um software para configuração de uma HMI (*Human Machine Interface*). Os dados enviados podem ser alarmes e eventos, dados de estado digitais, dados analógicos, ou um arquivo contendo configuração transmitida pela estação mestre para a estação escrava. Existe também o envio de comandos desde uma estação mestre para a estação escrava que não levam dados.

O tamanho total dos dados não é limitado pelo protocolo, a camada de aplicação inicialmente forma os dados em blocos administráveis denominados ASDUs (*Application Service Data Unit*). A camada de aplicação cria a APDU (*Application Protocol Data Unit*), aumentando o tamanho do cabeçalho de dados conhecida como APCI (*Application Protocol Control Information*).

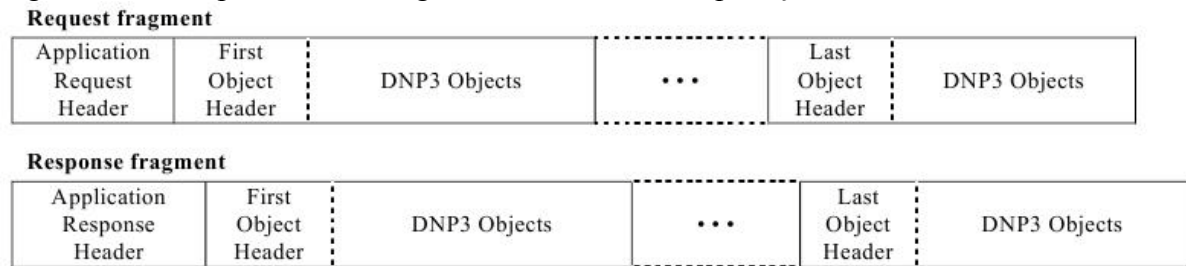
Os cabeçalhos APCI são de 2 a 4 bytes dependendo se a mensagem é de solicitação ou de resposta respectivamente. No caso de ser um comando existe apenas um cabeçalho e não os dados ou ASDU.

Quando os dados ou blocos de ASDU a serem transmitidos são de tamanho grande para uma mensagem da camada de aplicação, são criados múltiplos fragmentos APDUs, cujo tamanho máximo é de 2.048 bytes. Os tamanhos dos APDUs dependem do tamanho da mensagem a ser transmitida.

A estação central organiza e envia mensagem para a estação escrava solicitando informações. Executa um comando ou uma função especial como sincronização de tempo, transferência de arquivo, por exemplo. Na estação escrava, a mesma gera a mensagem apropriada, dependendo da solicitação e envia para a estação mestre. Em alguns casos, é possível que a estação escrava envie mensagem não solicitada para a estação mestre. Na Figura 8 ilustra-se o pedido de uma mensagem solicitada com confirmação na camada de enlace de dados e na Figura 9 ilustra-se a resposta de uma mensagem não solicitada.

O tamanho do fragmento do pacote depende do tamanho do *buffer* do dispositivo. A qual tem um intervalo de 2.048 a 4.096 bytes. Se a mensagem for maior que o fragmento, então a camada de aplicação deve fragmentá-la, e na recepção dos pacotes fragmentados é responsabilidade da camada de aplicação voltar a desfragmentar o pacote novamente.

Figura 10 – Componentes do fragmento da camada de aplicação.

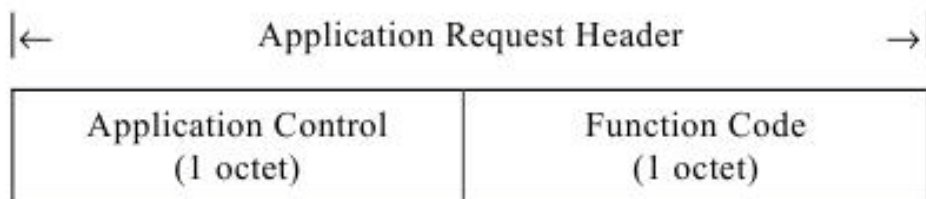


Fonte: (IEEE Std 1815-201, 2012)

Cada fragmento contém um cabeçalho com informação de controle, isto é válido tanto para transmissão de somente um fragmento como vários fragmentos numa única mensagem. O campo cabeçalho dos objetos contém informações adicionais, que não podem ser descritas no campo do cabeçalho do formato, visto que a existência do campo objeto é opcional (porque no fragmento da mensagem solicitada, os pontos solicitados estão descritos no cabeçalho do objeto, mas não existe nenhuma informação para enviar no campo objeto).

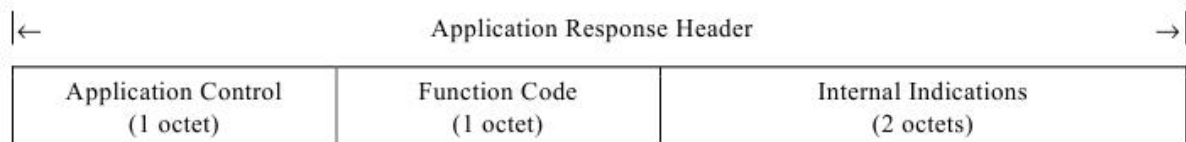
Nas Figuras 11 e 12 mostra-se o conteúdo do cabeçalho da mensagem solicitada e da resposta, respectivamente.

Figura 11 – Componentes do cabeçalho do fragmento da mensagem solicitada.



Fonte: (IEEE Std 1815-2012, 2012).

Figura 12 – Componentes do cabeçalho da mensagem de resposta.



Fonte: (IEEE Std 1815-2012, 2012).

Controle de Aplicação (*Application Control*): campo de 1 byte e contém a informação sobre a ordem dos fragmentos, se deve enviar a confirmação ou não.

Código Função (*Function Code*): campo de 1 byte, contém a informação sobre o propósito da mensagem. Cada função (leitura, escrita, confirmação, iniciar, parar, reiniciar, etc.), com o código atribuído à estação mestre com valores de 1 a 128, enquanto na estação escrava os valores são de 129 a 255.

Indicadores internos (*Internal Indicators*): campo com 2 bytes, só existe no cabeçalho da mensagem de resposta, contém informações sobre o estado e as condições de erros da estação escrava.

3.3 Camada Pseudotransporte

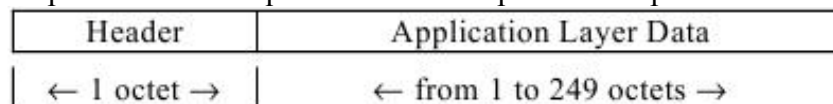
O fragmento APDU da camada de aplicação é encapsulado como unidade de dados do serviço de transporte TSDU (*Transport Service Data Unit*), dentro da camada pseudotransporte. A camada pseudotransporte divide a TSDU em unidades menores de dados TPDUs (*Transport Protocol Data Unit*). As TPDUs constam de 1 byte no cabeçalho, e um tamanho máximo de 249 bytes de dados, totalizando 250 bytes, para o encapsulamento no quadro LPDU da camada de enlace DNP3 que tem no máximo 250 bytes de dados.

Esta camada é uma função incorporada à camada de aplicação, com funcionalidades limitadas em dividir uma mensagem da camada de aplicação em pacotes menores para serem enviados pela camada de enlace. Na recepção, a sua funcionalidade é de desfragmentar os pacotes e repassar para a camada de aplicação.

Para cada quadro, insere-se 1 byte (num único campo do cabeçalho) que indica se o quadro da camada de enlace é o primeiro ou o último dos quadros. A mensagem é constituída por apenas um quadro, contendo as informações dos números de quadros; na recepção pode-se identificar um quadro perdido e solicitar a retransmissão do mesmo.

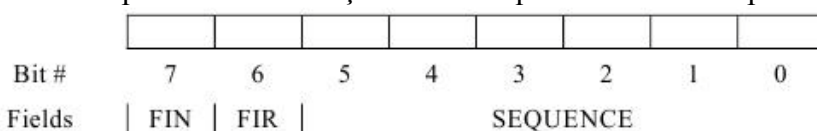
Na transmissão os segmentos são enviados à camada de enlace um a um e na recepção a função de transporte notifica a camada de aplicação que há um fragmento disponível, após completar o recebimento e desfragmentar a mensagem. Na Figura 13 ilustra-se os componentes de um quadro na camada pseudotransporte. Na Figura 14 mostra-se o formato de um cabeçalho da camada pseudotransporte.

Figura 13 – Componentes de um quadro na camada pseudotransporte.



Fonte: (IEEE Std 1815-2012, 2012).

Figura 14 – Componentes do cabeçalho de um quadro na camada pseudotransporte.



Fonte: (IEEE Std 1815-2012, 2012).

Na Figura 14:

FIN: Indica se o fragmento é o último.

FIR: Indica se o fragmento é o primeiro.

Sequência (*Sequence*): Um campo de 6 bits, com a finalidade de verificar se os fragmentos são recebidos na ordem correta e se não há falta de um fragmento; possui um intervalo de valores de 0 a 63, depois do número 63 utiliza-se 0.

3.4 Camada Enlace de Dados

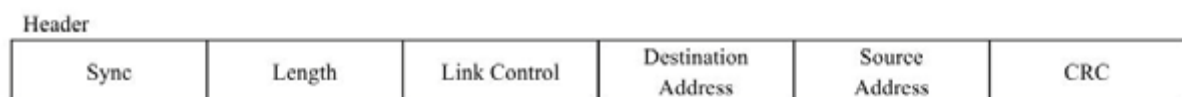
Esta camada recebe as TPDU's da camada pseudotransporte e adiciona 10 bytes de cabeçalho. A camada de enlace também é responsável pela detecção de erros e funções de correção; usa-se o código de correção de erros CRC (*Cyclic Redundancy check*) código de redundância cíclica de 16 bits. Cada TPDU é convertida em um quadro LPDU de 292 bytes de valor máximo e 250 bytes para dados. Na Figura 15 mostra-se o esquema de um quadro na camada de enlace e na Figura 16 apresenta-se o conteúdo do cabeçalho de um quadro na camada de enlace.

Figura 15 – Componentes de um quadro na camada de enlace.



Fonte: (IEEE Std 1815-2012, 2012).

Figura 16 – Componentes do cabeçalho de um quadro na camada de enlace.



Fonte: (IEEE Std 1815-2012, 2012).

Na Figura 16:

Sync: são 2 bytes de sincronização. O primeiro byte corresponde a 0x15 e o segundo byte corresponde a 0x64.

Length: este campo indica a quantidade de bytes que seguem no cabeçalho (ou seja, *Link Control*, *Destination* e *Source Addresses*) do quadro, e os bytes de dados sem incluir os bytes do campo CRC. O valor mínimo para esse campo é 5, que corresponde que só existem os bytes do cabeçalho e o valor máximo que se pode obter é de 255.

Link Control: campo de 1 byte, é usado para coordenar o envio e recebimento de quadros.

Destination Address: campo de 2 bytes, indica o endereço de destino para o qual foi enviado o quadro, cada estação escrava tem um endereço único. O primeiro byte é o menos significativo e o segundo é o mais significativo.

No DNP3 padrão, existem 65.520 endereços disponíveis (variando de 0x0000 a 0xFFEF), já que 3 são reservados para o *multicast*, 1 endereço é universal e 13 endereços são reservados.

Source Address: campo de 2 bytes, indica o endereço de origem do quadro enviado. O primeiro byte do endereço é o byte ordem baixa e o segundo byte é a ordem alta.

CRC: este campo depende da quantidade de bytes do quadro, existem 2 bytes para cada 16 bytes de dados. Os demais campos do cabeçalho são incluídos para calcular o CRC. O código de Redundância Cíclica é gerado do polinômio mostrado na equação 1 (Jaimes, 2012), e é invertido antes de ser colocado no campo para ser transmitido, tendo a atenção de que o primeiro byte é o menos significativo e o segundo o mais significativo.

$$X^{16} + X^{13} + X^{12} + X^{10} + X^8 + X^5 + X^2 + 1 \quad (1)$$

Pode-se enviar quadros com ou sem solicitação de confirmação. Quando a solicitação é confirmada, o dispositivo envia um quadro indicando que foi recebido o tal quadro sem erros segundo o campo CRC. Usando-se um campo de endereço de origem e um de destino em cada quadro, permitindo o uso de várias estações mestres com comunicações ponto-a-ponto.

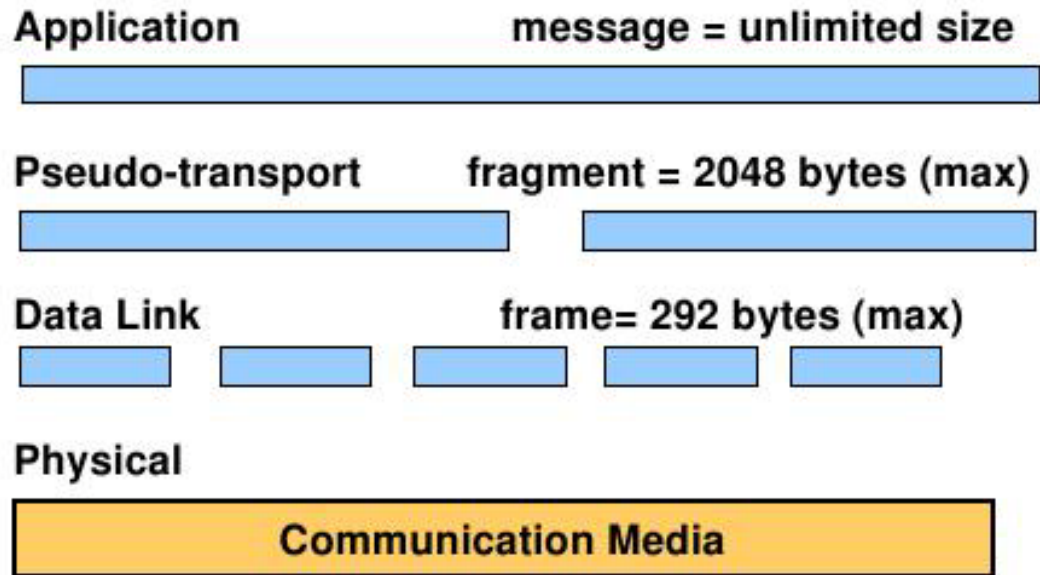
3.5 Camada Física

A camada física converte cada quadro em uma cadeia de bits sobre o meio físico. A camada física definida inicialmente do DNP3 foi a serial RS-232 e RS-485, com um formato de quadro serial de 8 bits de dados, um bit de início, um bit de parada, sem paridade.

A camada física foi definida posteriormente sobre a camada física *Ethernet* sobre TCP/IP; atualmente o protocolo TCP/IP é utilizado para o transporte de mensagens DNP3 sobre a rede *ethernet* através do encapsulamento de dados.

Na Figura 17 ilustra-se um diagrama com o tamanho dos pacotes em diferentes camadas do protocolo.

Figura 17 – Resumo de pacotes nas camadas do protocolo DNP3.



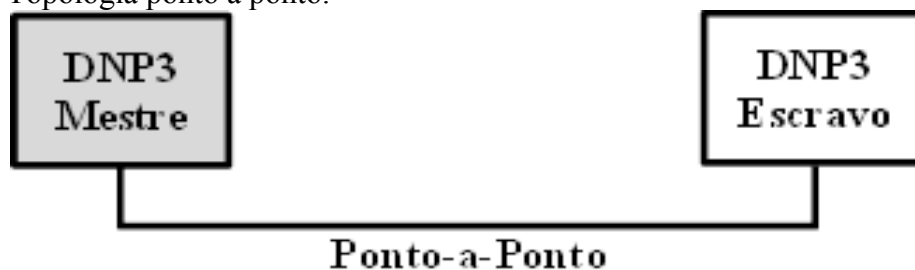
Fonte: (JAIMES, 2012).

3.6 Topologia do Protocolo

O padrão DNP3 oferece quatro tipos de arquitetura, descritas a seguir:

Ponto a Ponto (*Point-to-Point*): é a arquitetura mais simples, onde uma estação central se comunica com uma única estação remota, conforme a topologia ilustrada na Figura 18.

Figura 18 - Topologia ponto a ponto.

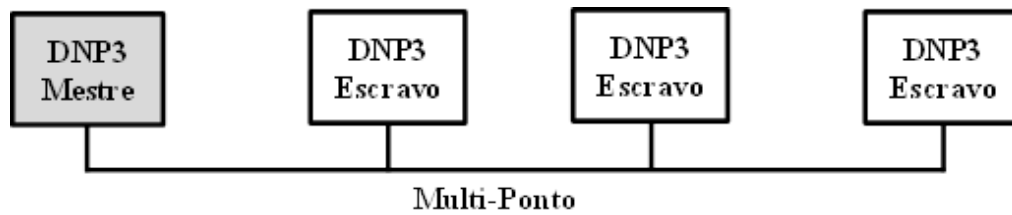


Fonte: Adaptado de (IEEE Std 1815-2010, 2010).

Multiponto: a estação central se comunica com várias estações remotas, a comunicação é feita ponto a ponto onde a estação central solicita dados de maneira sequencial entre as estações remotas.

Cada estação remota monitora a mensagem da estação central, mas só responde quando o endereço de destino da mensagem corresponde com seu endereço, conforme ilustrado na Figura 19.

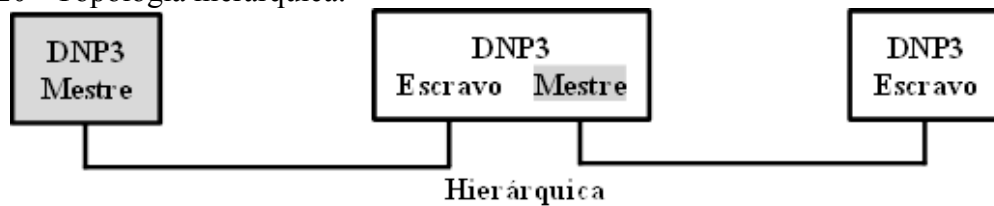
Figura 19 - Topologia multiponto.



Fonte: Adaptado de (IEEE Std 1815-2010, 2010).

Hierárquica: consiste em uma estação central que se comunica com uma estação remota, que por sua vez passa a ser estação central para outra estação remota, neste caso a estação remota recebe o nome de subestação central ou *submaster*. Na Figura 20 apresenta-se esta topologia.

Figura 20 - Topologia hierárquica.



Fonte: Adaptado de (IEEE Std 1815-2010, 2010).

Concentrador de dados: nesta topologia pode-se manipular diferentes protocolos onde o DNP3 pode estar na estação central ou na subestação central.

O concentrador de dados recolhe informações de vários IEDs (*Intelligent Electronic Device*) para serem transmitidas até a estação central (IEEE Std 1815-2012, 2012); (CLARKE, REYNDERS; WRIGHT, 2004). O esquema da topologia está ilustrado na Figura 21 e Figura 22.

Figura 21 - Topologia concentrador tipo I.



Fonte: Adaptado de (IEEE Std 1815-2010, 2010).

Figura 22 - Topologia concentrador tipo II.

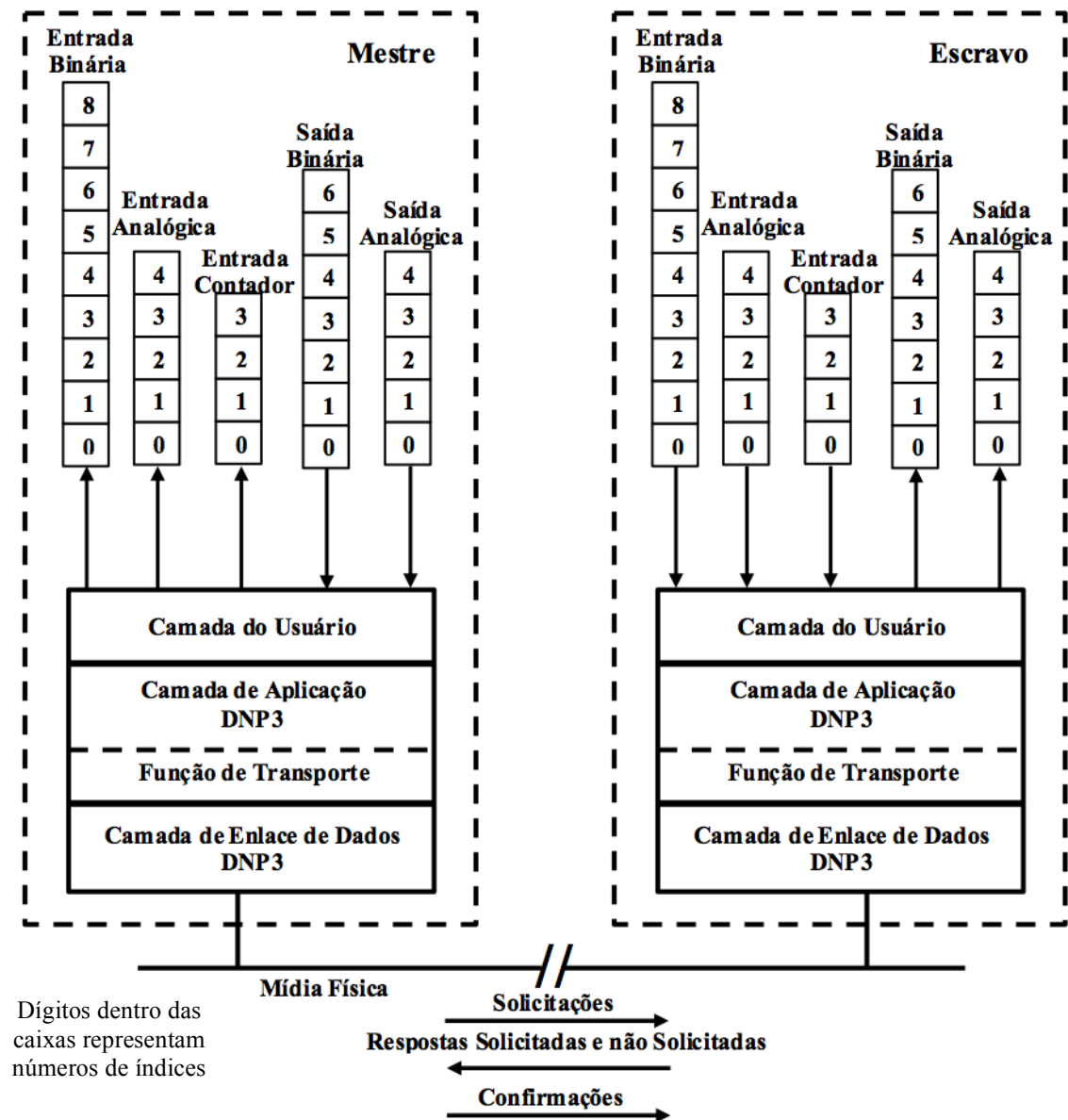


Fonte: Adaptado (IEEE Std 1815-2010, 2010).

3.7 Camadas do Protocolo DNP3

Na Figura 23 apresenta-se o sistema de camadas que é utilizado no protocolo DNP3 para garantir uma transmissão de dados confiável.

Figura 23 - Diagrama de estação Mestre e Escravo.



Fonte: Adaptado (IEEE Std 1815-2010, 2010).

Camada do usuário (User Layer): a estação central interage com a base de dados e solicita os dados da estação remota. Na estação remota, o software extrai a informação da estação remota para enviar para a estação central e utiliza a função da camada de aplicação para enviar as mensagens.

Camada de Aplicação DNP3: a estação central organiza e envia mensagens para a estação remota para requerer informações, realizar função especial ou executar um comando.

A estação remota gera a mensagem apropriada dependendo do requerimento e envia a mensagem para a estação central. Em alguns casos é possível que a estação remota envie mensagem não solicitada pela estação central.

O tamanho do fragmento (pacote), depende do tamanho do *buffer* do dispositivo na qual se tem um intervalo entre 2.048 e 4.096 bytes.

Camada de Transporte DNP3: não é uma camada mas uma função incorporada na camada de aplicação, limita-se a dividir uma mensagem da camada de aplicação em pacotes menores para ser enviados pela camada de enlace.

Na recepção, a função de transporte notifica a camada de aplicação que apresenta um fragmento disponível quando este tiver completado o recebimento e remontado todas as partes de um fragmento.

Camada de Enlace do DNP3: é a camada encarregada de assegurar que a transmissão de dados pela camada física seja confiável realizando detecção de erros CRC.

Camada Física do DNP3: a especificação do DNP3 está sobre RS-232 ou RS-485 utilizando um meio físico como fibra ótica, rádio, satélite ou conexão *Ethernet*.

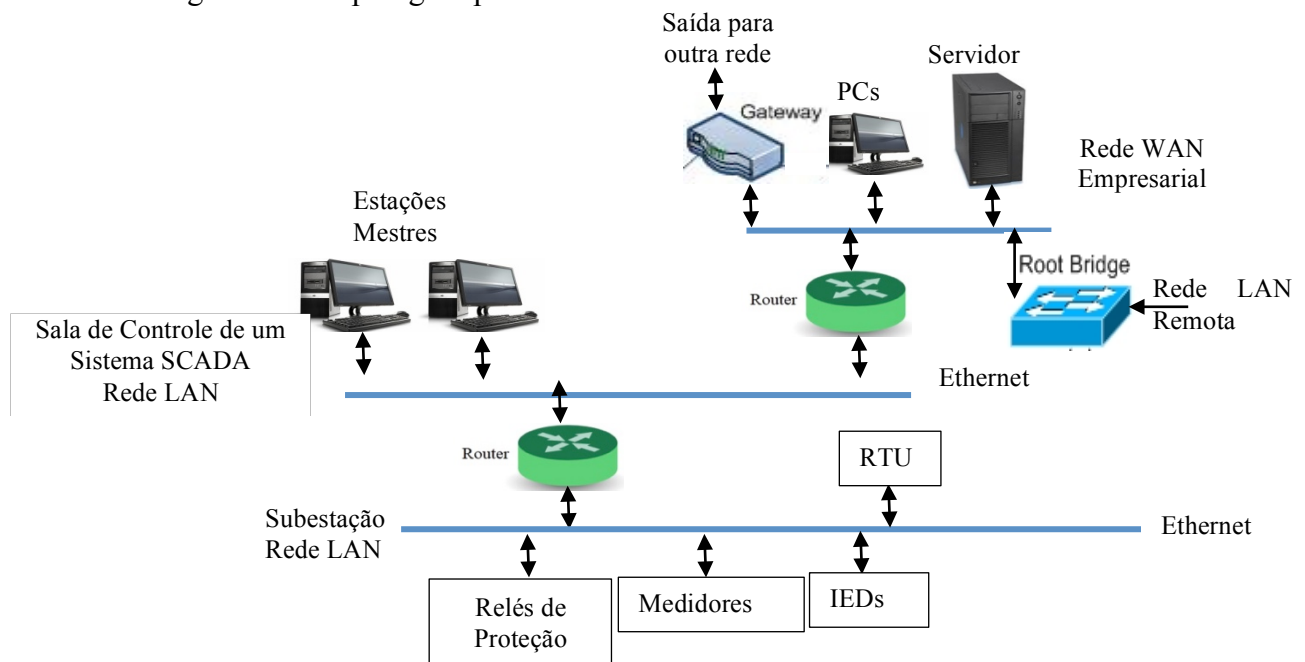
3.8 DNP3 sob TCP/IP

Originalmente o protocolo DNP3 foi desenvolvido para estabelecer uma conexão serial ponto a ponto. Com o passar dos anos houve a necessidade da expansão da comunicação com redes de maior porte e capacidade, onde utilizou-se a implementação do DNP3 levando em consideração o protocolo TCP/IP.

Na Figura 24 ilustra-se a topologia de uma rede onde pode ser utilizado o protocolo de comunicação DNP3 sob TCP/IP. Observa-se que um sistema SCADA é usado sob a rede TCP/IP em que as estações Mestres utilizam as funções de supervisão, controle e aquisição de dados de RTUs, IEDs e PCLs.

Levando em conta as características mencionadas anteriormente, o comitê técnico DNP *User Group* definiu o método de encapsulamento do protocolo DNP3 sob TCP/IP para o seu uso na rede LAN, MAN e WAN.

Figura 24 – Topologia típica de uma rede onde se usa o DNP3 sobre TCP/IP.



Fonte: Próprio autor.

3.9 Encapsulamento do Protocolo DNP3 sob TCP/IP

DNP3 é realizado sob a rede *Ethernet* mediante o encapsulamento de dados. O encapsulamento de dados é feito a partir da camada de enlace de dados DNP3 sobre os segmentos da camada de transporte TCP/IP. Isto permite que sob TCP/IP se distribua os quadros da camada de enlace de dados DNP3 ao destinatário.

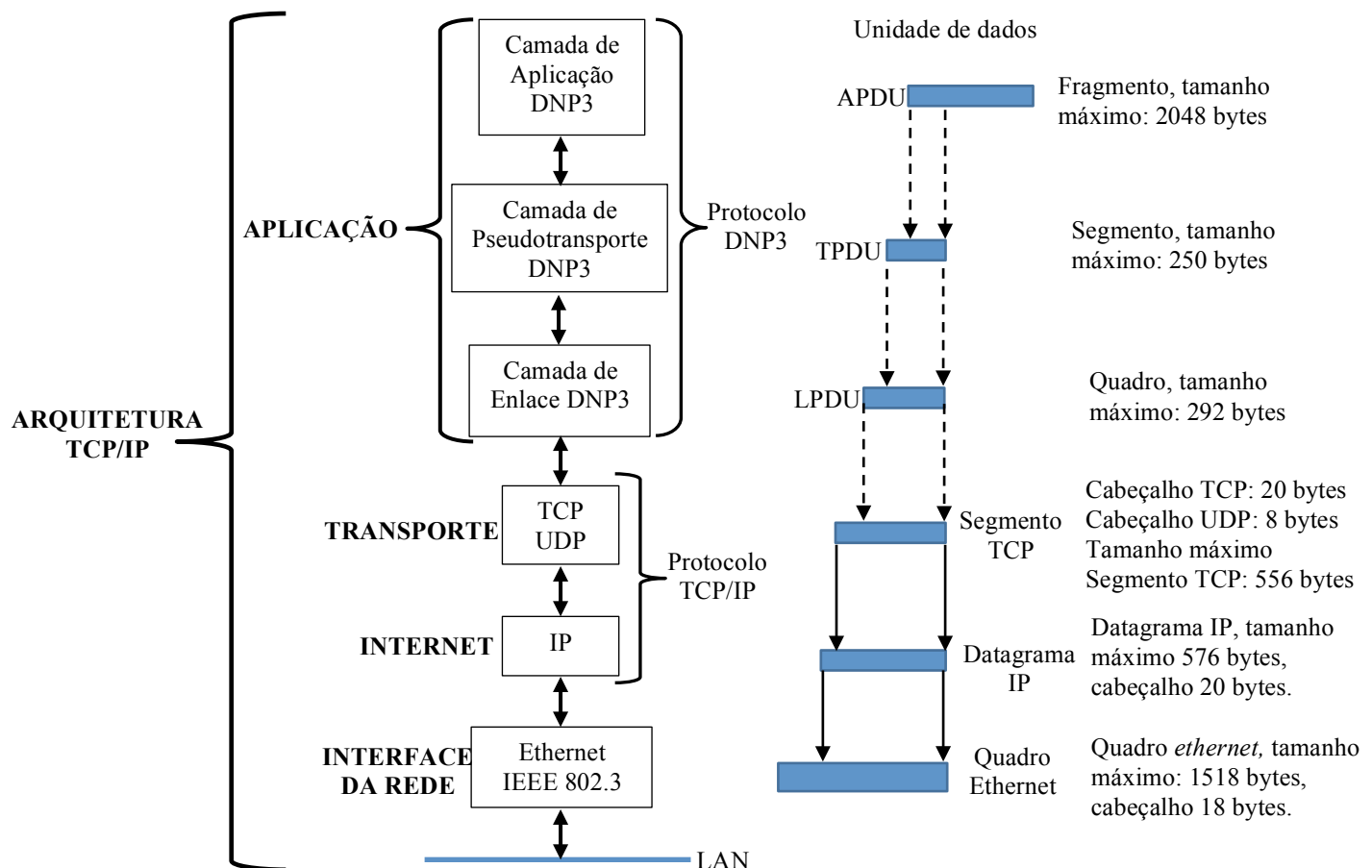
O DNP3 utiliza as mensagens do TCP/IP para transportar mensagens por meio de redes LAN/MAN/WAN. As recomendações dos membros do grupo DNP *user group* são as seguintes:

- As confirmações da camada de enlace de dados DNP3 devem ser desabilitadas, porque o TCP se encarrega de garantir uma conexão do início ao fim confiável;
- A camada física recomendada é *Ethernet*;
- Todos os equipamentos devem suportar TCP e UDP;
- TCP deve ser usado para rede WAN porque é um protocolo orientado a conexão e confiável;
- O modelo *Enhanced Performance Architecture* (EPA) da camada na qual se baseia o protocolo DNP3 não se altera.

Na Figura 25 ilustra-se as camadas de aplicação, pseudotransporte e enlace de dados do protocolo DNP3, que mantém-se e age sobre a camada de transporte, camada de Internet e camada de interface da rede da arquitetura TCP/IP.

A camada pseudotransporte e de enlace de dados são os elementos e serviços, essenciais. Os serviços de direcionamento e detecção de erros realizados na camada de enlace de dados do DNP3 são requeridos para trabalhar junto com a arquitetura TCP/IP.

Figura 25 – Encapsulamento do DNP3 sobre TCP/IP.



Fonte: Adaptado (CLARKE; REYNDERS; WRIGHT, 2004).

As confirmações da camada de enlace do DNP3 não são necessárias com o uso sob TCP/IP, e não são permitidas, pois o TCP é protocolo de transporte orientado a conexão e estabelece uma conexão através do controle de *handshakes*, ou confirmações ACKs. É encarregado de garantir uma comunicação do início ao fim confiável, pois realiza a confirmação com números de confirmações de recebimento ACKs.

A construção de uma mensagem DNP3 vai desde a camada de aplicação até a camada de enlace de dados DNP3. O quadro da camada de enlace DNP3, cujo tamanho

máximo é de 292 bytes, é encapsulado em um segmento TCP na camada de transporte TCP/IP, nesta camada é adicionado o cabeçalho com 20 bytes. O segmento máximo do TCP é de 556 bytes (536 bytes de dados e 20 bytes de cabeçalho).

Em seguida a mensagem é encapsulada em um datagrama IP na camada *Internet*. São adicionados mais 20 bytes de cabeçalho, formando uma mensagem de tamanho máximo de 576 bytes no nível da camada de *Internet*.

Na camada interface de rede TCP/IP a mensagem é encapsulada novamente no quadro *Ethernet*, que contém de 46 a 1.500 bytes de dados no máximo, e adicionado o cabeçalho de 18 bytes totalizando o tamanho máximo do quadro *Ethernet* de 1.518 bytes.

3.10 Camada de Gerenciamento de Conexão

O modelo EPA do DNP3 baseado no modelo OSI, baseia-se na comunicação virtual entre cada camada correspondente. A arquitetura TCP/IP baseia-se da mesma forma na comunicação virtual entre as camadas correspondentes e o encapsulamento dos dados das camadas superiores nas camadas inferiores; portanto a construção da mensagem DNP3, nas camadas TCP/IP, é transparente para as camadas do modelo EPA do DNP3 como pode ser visto na Figura 26.

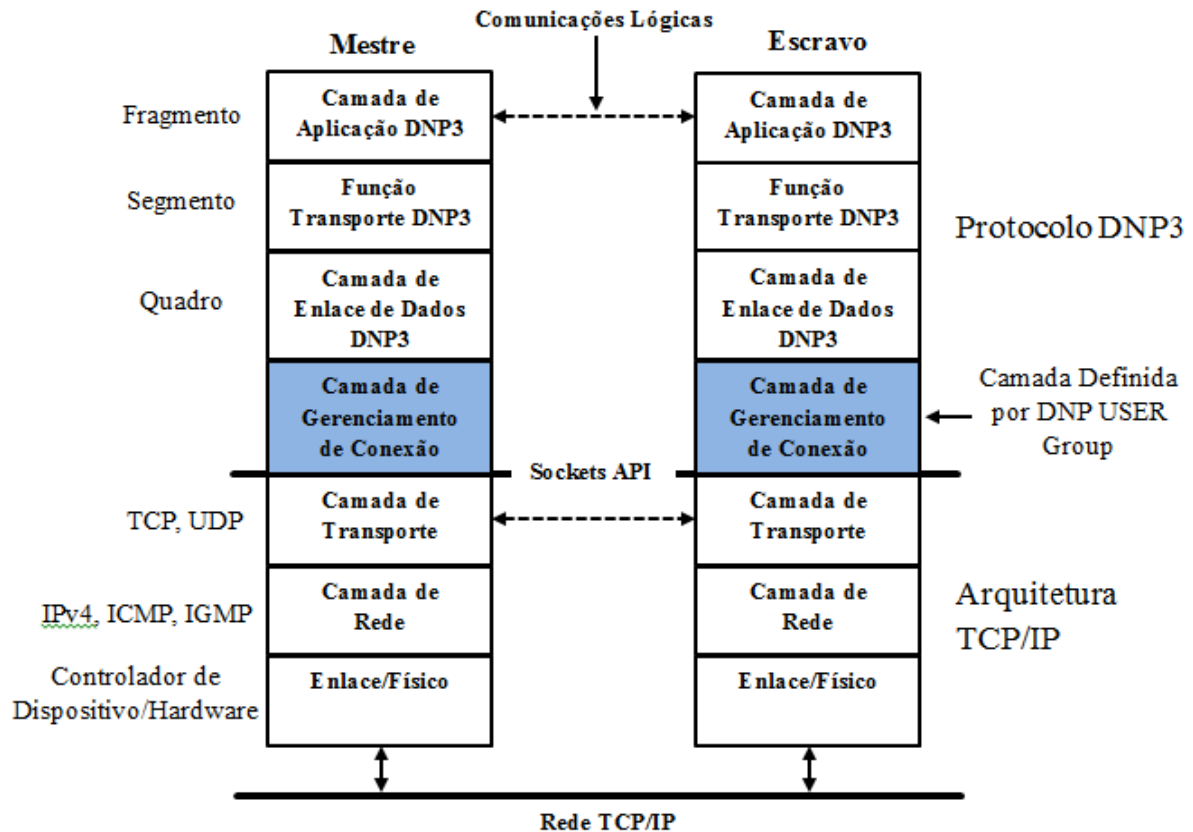
A implementação do padrão DNP3 sob o protocolo TCP/IP é feita de maneira que as camadas anteriores citadas não se alteram, exceto o método de sincronização de tempo; mas o envio de mensagem transparente é independente do protocolo TCP/IP.

As confirmações na camada de enlace não são utilizadas, somente a confirmação na camada de aplicação é empregada similarmente ao que ocorre no meio de transmissão serial.

A interface na camada de gerenciamento de conexão e a camada de transporte do protocolo TCP/IP é implementada através de um API (*Application Program Interface*). O protocolo TCP/IP é composto por dois protocolos na camada de transporte: TCP e UDP (*User Datagram Protocol*). Um dispositivo que suporte DNP3 deve também ter suporte a ambos os protocolos.

Quando não há a recomendação/exigência da atribuição de endereços IP aos dispositivos que utilizam DNP3, o número da porta designado geralmente para esta aplicação é 20.000.

Figura 26 – DNP3 sobre TCP/IP.



Fonte: Adaptada (CLARKE; REYNDERS; WRIGHT, 2004).

A camada de gerenciamento de conexão promove a interface entre as camadas do protocolo DNP3 e as do protocolo TCP/IP. É encarregada de estabelecer e encerrar conexões TCP, transmitir, aceitar datagramas e enviar parte dos quadros DNP3 entre a camada de enlace do protocolo DNP3.

A interface entre a camada de gerenciamento de conexão e a arquitetura TCP/IP é implementada através de um *Sockets Application Programming Interface* (API), dentro da camada de transporte do TCP/IP, através da interface *sockets* (combinação de um endereço IP e número de porta).

Os níveis de implementação se dividem em três, o nível 1 é composto de funções básicas do protocolo DNP3, os demais são opcionais, estão orientados a estabelecer comunicação com IEDs. O nível 2 permite mais funções, grupos e variações, os IEDs são mais sofisticados e RTUs com centenas de pontos (*tags*). O nível 3 é aquele que suporta todas as funcionalidades do protocolo.

4 O SIMULADOR DE REDES NS-2

O NS-2 (*Network Simulator V.2*) é um software de simulação de redes que permite validar o desempenho de protocolo de comunicação já implementadas, simular redes que não são possíveis ou são muito onerosas em experimentos reais, validar novos protocolos de comunicação antes de serem implementados em cenários reais, simular sistemas de redes de filas simples (M/M/1) até sistemas de redes de comunicação complexas.

Opera com a simulação de protocolos como o TCP e suas variantes (Tahoe, Reno, New Reno, Vegas entre outros), *multicast*, redes cabeadas, redes sem fio, roteamento de pacotes e satélites. Implementa filas de roteamento, tipo *droptail*, *diffserv red*, *fair queueing*, *stochastic fair queueing*, *class-based queueing*, possui também ferramentas matemáticas numéricas para cálculos estatísticos (GONÇALVES; CORRÊA, 2005).

Após a simulação realizada, tem-se a opção de imprimir as estatísticas calculadas através de *script*, visualizar os eventos com animação através do *Network Animator* (NAM) e analisar os resultados através dos arquivos de *tracing* com o apoio de ferramentas *script awk*.

As estatísticas da simulação não são geradas automaticamente, são obtidas através de procedimentos matemáticos implementados no *script* (GONÇALVES; CORRÊA, 2005).

Conforme explana Gonçalves e Corrêa (2005), a programação do NS é desenvolvida em duas linguagens: C++ para a estrutura básica (protocolos, agentes, etc) e OTcl (*Object-oriented Tool Command Language*) para uso como *frontend*. OTcl é uma linguagem interpretada, desenvolvida pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT).

Esta linguagem é efetivada com as escritas e as simulações. O objetivo de se utilizar duas linguagens de programação baseia-se em duas diferentes necessidades: o de ser uma linguagem mais robusta para a manipulação de bytes, pacotes e para implementar algoritmos que rodem um grande conjunto de dados.

Nesse contexto C++, que é uma linguagem compilada e de uso tradicional, mostrou-se a ferramenta mais eficaz. Por outro lado, durante o processo de simulação, ajustes são necessários com certa frequência. Como por exemplo muda-se o tamanho do enlace e realiza-se um teste, muda-se o atraso e realiza-se um teste, acrescenta-se um nó e realiza-se um teste.

Haveria um desgaste muito grande se, a cada mudança de parâmetro, e são muitas em uma simulação, houvesse a necessidade de se compilar o programa para testá-lo. O uso da linguagem OTcl, que é interpretada, evita o desgaste por parte do usuário, pois há uma

simplificação no processo iterativo de mudar e re-executar o modelo (GONÇALVES; CORRÊA, 2005).

A maior dificuldade para se criar a otimização de protocolos de rede é a análise dos mesmos quando se trata de ambientes diferentes. Implantar uma estrutura de teste de redes gera um alto custo dependendo do número de estações tanto financeiro quanto em relação ao tempo utilizado para tal.

A partir desse fato, Jain (2007) afirma que a melhor solução para reduzir estes custos e que possa atender a flexibilidade necessária para os testes é a simulação, porque com a mesma pode-se obter resultados utilizando diferentes topologias e números de estações, ocupando o tempo apenas na configuração dos parâmetros de simulação.

4.1 Histórico do NS

A primeira versão do NS foi desenvolvida em 1989, como uma variante do *REAL Network Simulator*. Em 1995, seu desenvolvimento passou a ser suportado pelo DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) através do Projeto VINT (*Virtual InterNetwork Testbed*), envolvendo os colaboradores USC/ISI (*University of Southern California/ Information Sciences Institute*), Xerox PARC (*Palo Alto Research Center*), LBNL (*Lawrence Berkeley National Laboratory*) e UCB (*University of California Berkeley*), culminando no lançamento da versão 2.

Atualmente, seu desenvolvimento é feito pelo DARPA com o projeto SAMAN (*Simulation Augmented by Measurement and Analysis for Networks*) e pela NSF (*National Science Foundation*) com o projeto CONSER (*Collaborative Simulation for Education and Research*), ambos em colaboração com outros pesquisadores incluindo o ICSI (*International Computer Science Institute*). O NS-2 também inclui contribuições substanciais de outros pesquisadores, incluindo códigos de redes sem fio do UCB *Daedalus*, dos projetos do CMU *Monarch* e da *Sun Microsystems*. (ISI, 2005).

Em novembro de 2011, foi lançada a versão 2.35 do NS-2 que vigora até hoje. Foi desenvolvida para operar em plataformas Unix (*FreeBSD*, *SunOS*, *Solaris*, *Linux*, entre outras). Funciona também em plataforma Windows com o auxílio de outro software para virtualização, apesar da instalação não ser automatizada e não seguir os mesmos padrões de instalação feitos para Windows (ISI, 2005).

O NS-2 tem sua distribuição gratuita, seu código fonte também é gratuito e pode ser livremente alterado para qualquer pesquisa desenvolvida. Existe uma lista de discussão criada

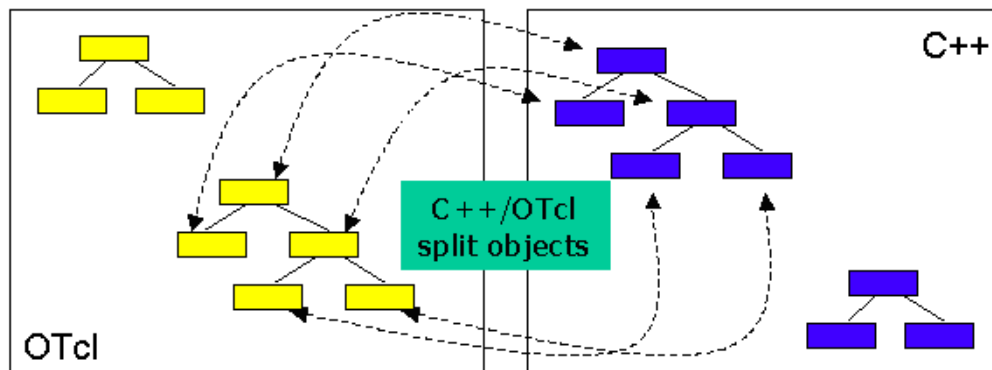
pelos desenvolvedores, onde diversos pesquisadores trocam ideias, experiências e propõem correções nos códigos do simulador. Estes pesquisadores que participam desta lista são em grande maioria dos Estados Unidos, Índia, Taiwan, Itália, Inglaterra e Brasil.

Este trabalho não tem o objetivo de explanar os detalhes da instalação e configuração deste software, já que se encontra em diferentes manuais, serão mostradas as principais características e funcionalidades do software.

4.2 A Linguagem do NS

Os códigos de programação do NS-2 são desenvolvidos em linguagem C++ e OTcl, na qual fornece a programação dual, ilustrada na Figura 27. Chung e Claypool (1995), também utiliza-se da linguagem C++ no processamento da simulação, onde é realizada em uma linguagem de *script* OTcl.

Figura 27 - C++ e OTcl: a dualidade.



Fonte: (CHUNG; CLAYPOOL, 1995).

Na Figura 28 apresenta-se uma estrutura do NS em que o usuário define seus modelos de tráfego e topologia, utilizando de *scripts* de simulação, *frontEnd*, no qual o NS usa a linguagem OTcl e submete ao núcleo do NS, escrito em C++ para sua execução (VINT, 1996).

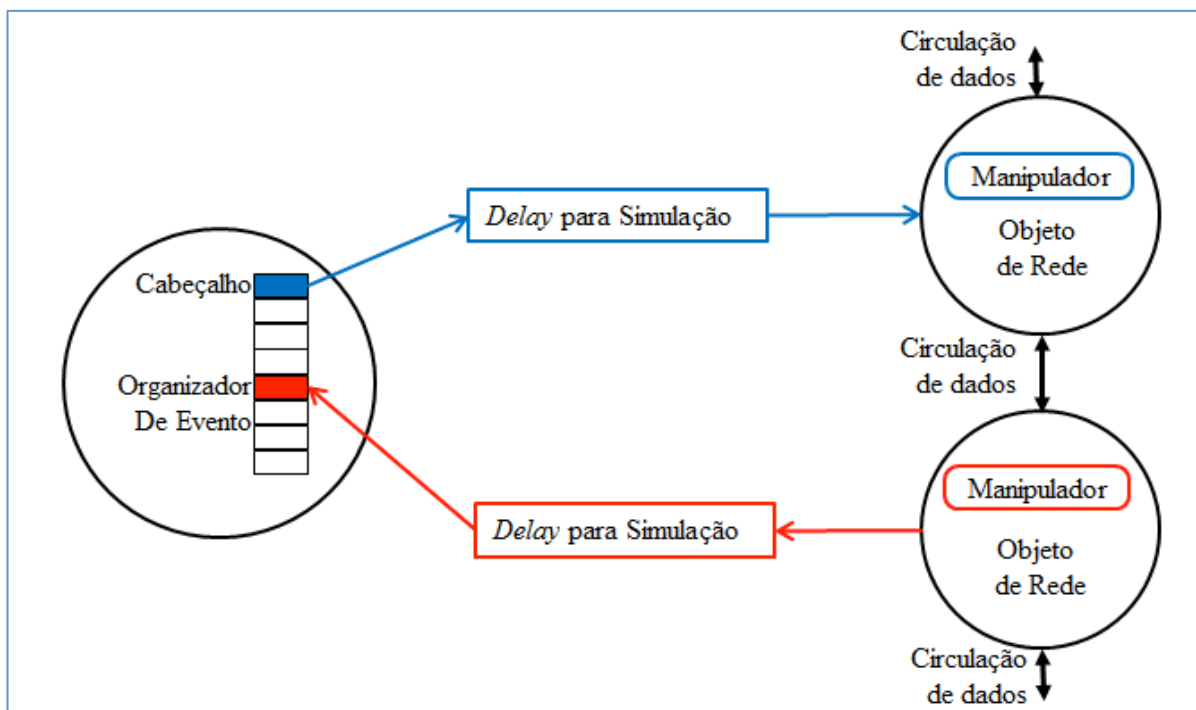
Segundo Meenaghan e Delaney (2004), Ros e Ruiz (2004), Greis (1996), Issariyakul e Hossain (2009) o objetivo destas duas linguagens é realizar os detalhes de simulação de uma maneira que manipulem com bytes, pacotes, cabeçalhos, implementação de algoritmos, que executem de forma compilada em linguagem robusta como C++, onde o tempo para execução é seu fator principal. Os modelos de simulação são escritos em linguagem interpretada, porque envolvem variações de parâmetros e configurações; têm como prioridade o tempo de

4.3 Objeto Organizador de Eventos

No NS-2, um evento é um pacote único contendo uma série de instruções, no software dado pelo usuário na codificação. Internamente identifica-se com um ponteiro o objeto que manipula este evento. Na Figura 30 é mostrada a forma do organizador de eventos.

Os principais objetos do organizador de eventos é a *Network Component*. Na transmissão de pacotes é requerido certo tempo de atraso necessário numa simulação, ao declarar um enlace com certa largura de banda muito baixa, o organizador de eventos deverá realizar *delays* mais prolongados nesse enlace para simular que a transmissão é lenta. Por outro lado, cada objeto de rede utiliza um organizador de eventos, que são os que manipulam o evento por tempo organizado. É importante que a trajetória dos dados entre os objetos de rede sejam diferentes da trajetória de eventos.

Figura 30 – Organizador de eventos.



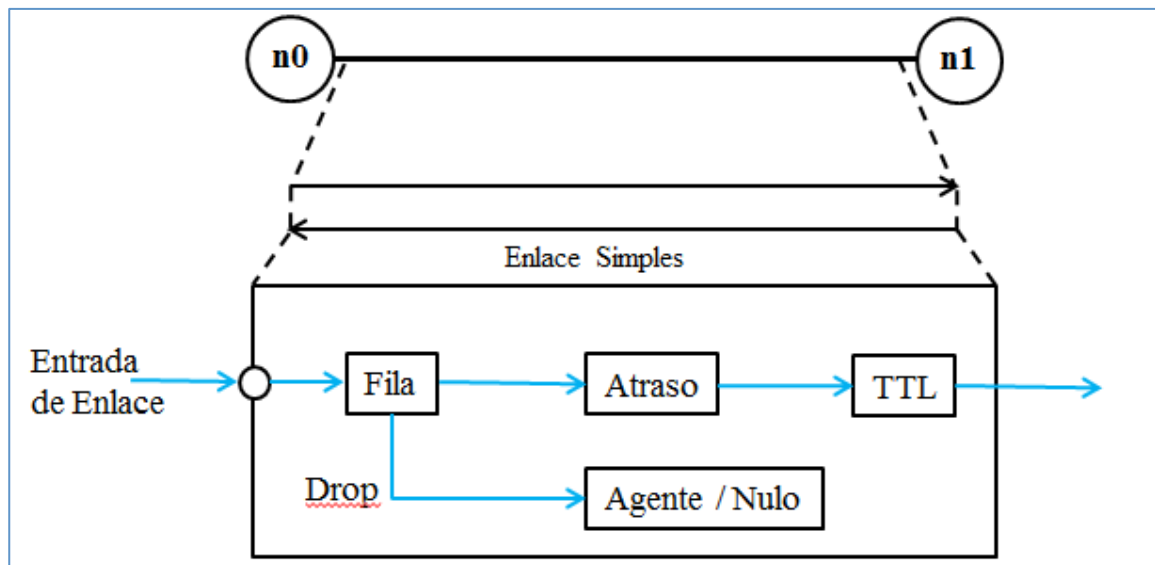
Fonte: Próprio autor.

4.4 Objeto Componente de Rede

O objeto componente de rede é responsável por fazer uma comunicação consistente entre os componentes de rede, por onde passam os pacotes. Os componentes da rede podem ser: largura de banda de enlace, enlace unidirecional ou bidirecional, atraso de pacotes, etc.

No caso de atraso de pacotes atua também o evento organizador. Na Figura 31 ilustra-se os componentes de uma rede que permite unir dois nós, ou seja, um enlace. Nesta figura é representado um enlace simples unidirecional; no caso de haver a necessidade de um enlace bidirecional, cria-se outro objeto com a mesma estrutura no sentido contrário. Na entrada de enlace, o pacote deve estar na fila.

Figura 31 – Componente de rede enlace.



Fonte: Próprio autor.

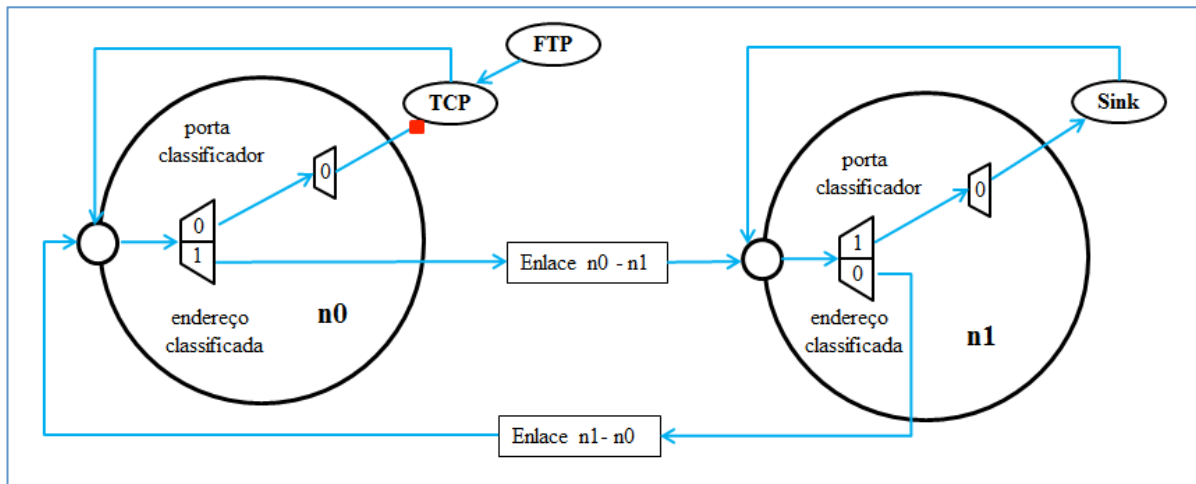
Realiza-se uma série de processamentos dependendo do tipo de fila que tem esse enlace, tais como, se o tamanho do pacote superar o tamanho da fila, ou simplesmente a fila está saturada. Considerando isto, será tomada a decisão de descartar o pacote; neste caso o mesmo passará para o *drop* e ao agente *Null*. Caso contrário, realiza-se um atraso simulando o (*delay*). Finalmente, calcula-se e atualiza-se o TTL (*Time To Live*), tempo de vida do pacote para chegar ao nó destino e ser analisado. Na Figura 31 representa-se o fluxo de pacotes entre os nós.

Na Figura 32, ilustra-se como representar uma comunicação entre dois nós através do protocolo TCP. O mesmo requer uma resposta de confirmação quando o receptor receber o pacote. A rede consiste de dois nós (n0 e n1). No nó n0, quando gera-se o pacote, este segue o caminho da porta 0 (*port classifier*) para adicionar a informação de que se trata do tipo TCP, logo, segue o caminho, volta a entrar no nó n0 agora já com a informação de que é um tipo TCP então passa pela porta 1 saindo pelo enlace n0 – n1 e chegando ao nó n1.

Do mesmo modo que no nó n0, no nó n1 passa-se pela porta 0 para gerar o enlace de resposta e volta a entrar no nó n1 para sair pela porta 0 do enlace n1 - n0. Ao chegar no nó n0

entra pela porta 0 e gera-se a confirmação. Logo após a confirmação é gerado outro pacote e assim é repetida para cada transmissão.

Figura 32 – Exemplo de fluxo de pacotes entre nós.



Fonte: Próprio autor.

4.5 O Arquivo *trace* da Simulação

Após a simulação, inicia-se uma fase considerada muito importante que é a análise dos resultados, é nela que se busca consistência e coerência nos resultados antes da sua apresentação. O NS gera o *log* de todos os eventos ocorridos durante a simulação em um arquivo de saída identificado como *trace*. O arquivo *trace* dependendo da simulação pode chegar a vários megabytes. Na Figura 33 ilustra-se o formato padrão do arquivo de saída do *trace*.

No primeiro campo estão os eventos ocorridos durante a simulação, podendo ser a entrada de pacote na fila (+), a retirada de pacote da fila (-), o recebimento do pacote pela parte do nó destino (r) ou o descarte de pacote (d). O próximo campo indica o momento da simulação onde ocorreu um evento. Nos dois campos seguintes estão o nó de origem e nó de destino e o intervalo onde ocorreu o evento. O campo seguinte indica o tipo de pacote (TCP, UDP, CBR, DNP3, etc.). O próximo indica o tamanho de pacote em bytes; logo depois uma série de *flags* relacionados a notificação de congestionamentos. Depois das *flags* ocorre a identificação do fluxo, os endereços do transmissor com a identificação do endereço da fonte (nó e porta), o receptor identificado do endereço do destino (nó e porta). O campo seguinte identifica o número de sequência de pacote. E finalmente um número, que identifica o pacote de forma única na rede. (COUTINHO, 2007).

Figura 33 – Formato padrão do arquivo de saída do *trace*.

Evento	Tempo	Nó Origem	Nó Destino	Tipo Pacote	Tamanho pacote	Flags	ID fluxo	Endereço Fonte	Endereço Destino	Num. Seq.	ID Pacote
+ : entrada de pacote (na fila)								endereço fonte :Nó. Porta (1.0)			
- : saída de pacote (da fila)								endereço destino :Nó. Porta (0.0)			
r : pacote recebido (no destino)											
+ 0.100000 1 0 dnp3 111 ----- 0 1.0 0.0 -1 0 - 0.100000 1 0 dnp3 111 ----- 0 1.0 0.0 -1 0 r 0.101089 1 0 dnp3 111 ----- 0 1.0 0.0 -1 0 + 0.101089 0 1 dnp3 40 ----- 0 0.0 1.0 -1 1 - 0.101089 0 1 dnp3 40 ----- 0 0.0 1.0 -1 1 r 0.102121 0 1 dnp3 40 ----- 0 0.0 1.0 -1 1											

Fonte: Próprio autor.

5 PROTOCOLO DNP3 NO NS-2

Foi implementando um *patch* para o NS-2 na versão 2.34 com um gerador de tráfego DNP3 com nível de implementação 1 (um) por Jaimes (2012) para rede cabeada *Ethernet* 802.3. Através deste gerador de tráfego DNP3 pode-se fazer a simulação das operações básicas como o uso de mensagem não solicitada, leitura, escrita, seleção e operação, reiniciar.

Nas simulações pode-se construir o cenário de uma subestação onde o ambiente é suscetível a ruídos que interferem na comunicação de dados; nesses ambientes são avaliadas as possíveis falhas e confiabilidade do sistema.

Os eventos que podem ser considerados nesses cenários são: a retransmissão de uma mensagem não solicitada, retransmissão de mensagem não solicitada com função de leitura, retransmissão de mensagem não solicitada e função diferente da leitura e retransmissão de mensagem de *reset*. Através dos resultados obtidos pode-se avaliar o desempenho do DNP3 em uma rede TCP/IP em aplicações de *smart grid*.

5.1 Implementação do *patch* para NS-2 na versão 2.35 para rede *wireless*

A principal contribuição desta tese foi a implementação do gerador de tráfego do protocolo de comunicação DNP3 na rede *wireless* através do *patch* para o NS-2 na versão 2.35 com funcionalidade em redes mistas como cabeadas *Ethernet* 802.3 e rede *wireless* 802.11. Com este *patch* e possível realizar simulações do protocolo de comunicação DNP3 encapsulado sob o protocolo TCP/IP em redes mistas entre cabeada 802.3 e *wireless* 802.11, se o NS-2 tiver o *patch* para todo o grupo do 802.11 pode-se realizar a simulação do DNP3.

Para a implementação foi utilizada a primeira versão implementada por Jaimes (2012), após realizar várias pesquisas de softwares simuladores de redes *open source*, para realizar a análise de desempenho de redes de comunicação *wireless* em aplicações de *smart grid*, constatou-se que não havia nenhum simulador de redes *open source* dotado do protocolo de comunicação DNP3 para realizar as simulações para a análise.

Houve a necessidade de implementar um protocolo de comunicação gerador de tráfego DNP3 com a finalidade de analisar o desempenho de redes *wireless* em aplicações *smart grid*, com custo baixo. A solução encontrada foi a utilização do NS-2 na versão 2.35 que é bem conhecida na área acadêmica na utilização em simulações de redes para o

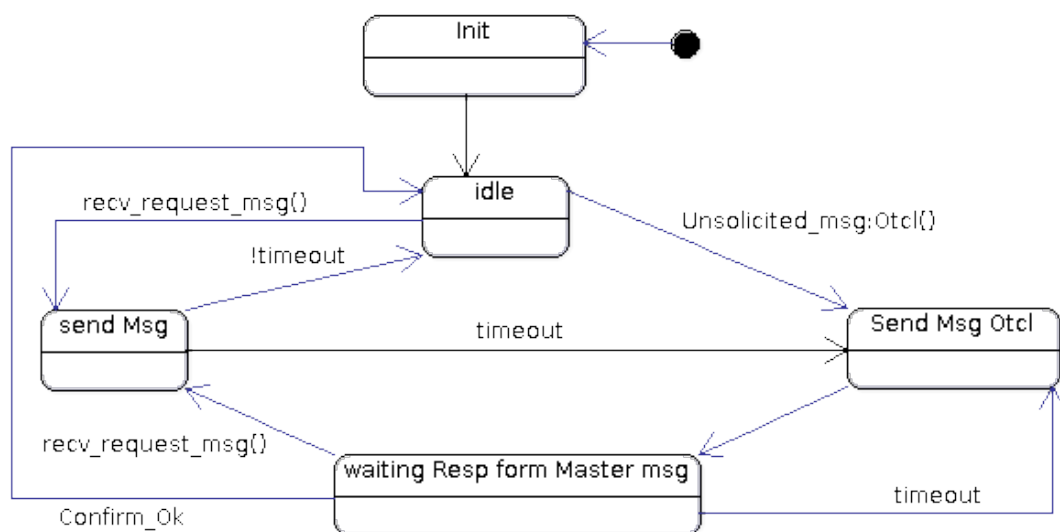
desenvolvimento do *patch*. Como já havia uma parte desenvolvida para redes cabeadas, foi utilizado o mesmo com novas implantações para serem utilizados sob redes *wireless* 802.11.

Com a implementação do protocolo gerador de tráfego DNP3 no NS-2 foi possível realizar vários cenários com redes cabeadas, redes mistas contendo uma parte cabeada e outra parte *wireless*, para analisar o desempenho de redes em aplicações *smart grid*. A análise foi realizada principalmente sobre redes *wireless* IEEE 802.11b e IEEE 802.11g com resultados bastante satisfatórios apresentados em várias conferências, divulgados junto a comunidade científica (Apêndice A).

5.2 Diagramas de Estados

A implementação do *patch* utilizando o diagrama de estado da estação remota (*Outstation*) é apresentada na Figura 34, já da estação central (*Master*) é apresentada na Figura 35, as quais realizam o processo de inicialização e estabelece a ligação entre as estações. Logo após a conexão estabelecida, a estação remota estará no estado “*Idle*” até que aconteça um evento em que deve-se enviar uma mensagem para a estação Mestre ou um evento é gerado na simulação do arquivo com a linguagem OTcl para simular as mensagens não solicitadas da estação remota.

Figura 34 – Diagrama de estado da estação remota.



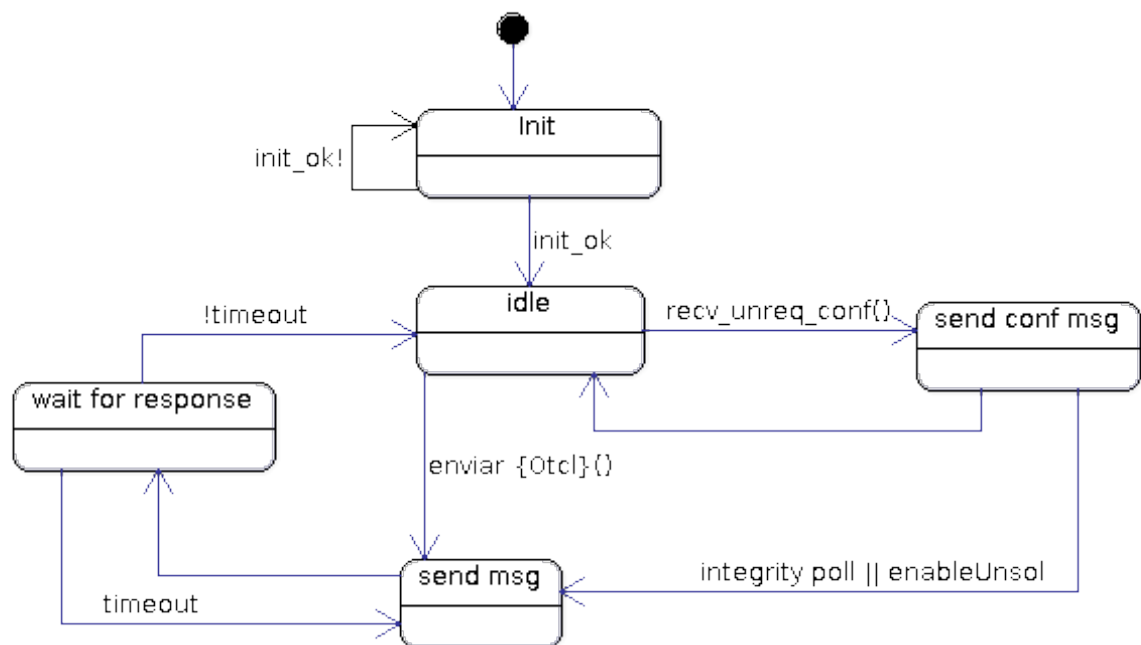
Fonte: (JAIMES, 2012).

Dependendo da mensagem que a estação Escrava envia, o Mestre gera uma confirmação; até que esta confirmação chegue, a estação escrava fica no estado de “*Waiting*”.

Resp from Master” aguardando receber uma confirmação da estação central. Se receber, volta para o estado “*Idle*”. Se o tempo de espera for atingido e a confirmação não for recebida, é enviada novamente a mensagem e retorna ao estado de “*Waiting Resp from Master*” aguardando a confirmação novamente. Ao ser solicitada uma mensagem pela estação central, é colocado em um estado onde calcula-se o tamanho do pacote a ser enviado que, dependendo do tamanho, poderá ser fragmentado ou não. Ao enviar uma mensagem de resposta é colocado no modo “*Idle*”.

Na estação central, segue-se o mesmo modo de funcionamento, envia uma mensagem de resposta quando o arquivo de simulação solicita com o objetivo de simular uma solicitação de dados, gravação de dados, etc., por parte do usuário e deve esperar os dados de confirmação da estação remota conforme ilustrado na Figura 35.

Figura 35 – Diagrama de estado da estação central.



Fonte: (JAIMES, 2012).

Um aspecto importante que diferencia os dois agentes é o processo de troca de mensagens na comunicação de inicialização entre a estação central e a estação remota. Outro processo importante é o gerenciamento de conexões a partir da estação central na topologia ponto-multiponto. A estação mantém uma lista de *links* para os endereços associados com cada cliente para o tratamento adequado de mensagens em diferentes estações.

5.3 Diagrama de Classes

Após a descrição dos diagramas de estados, serão analisados os diagramas de classes. Depois de analisar a forma de simulação do pacote no nível de aplicação do programa simulador NS-2, foram implementados os objetos (agentes) estação central e estação remota por Jaimes (2012), semelhantes a implementação da classe *TcpApp*. Esta classe simula o envio de dados no nível da camada de aplicação através de uma fila de dados do tipo sequência de caracteres, onde armazena as informações contidas no pacote e envia um pacote por diferentes níveis de tamanhos determinado ao nó destino. Ao chegar o pacote na sua totalidade ao nó destino, o agente receptor toma as informações diretamente da fila de dados. O agente *TcpApp* é um agente bidirecional e se associa a cada nó da rede onde os agentes no nível de aplicação da estação remoto ou central são implementados no sistema de comunicação.

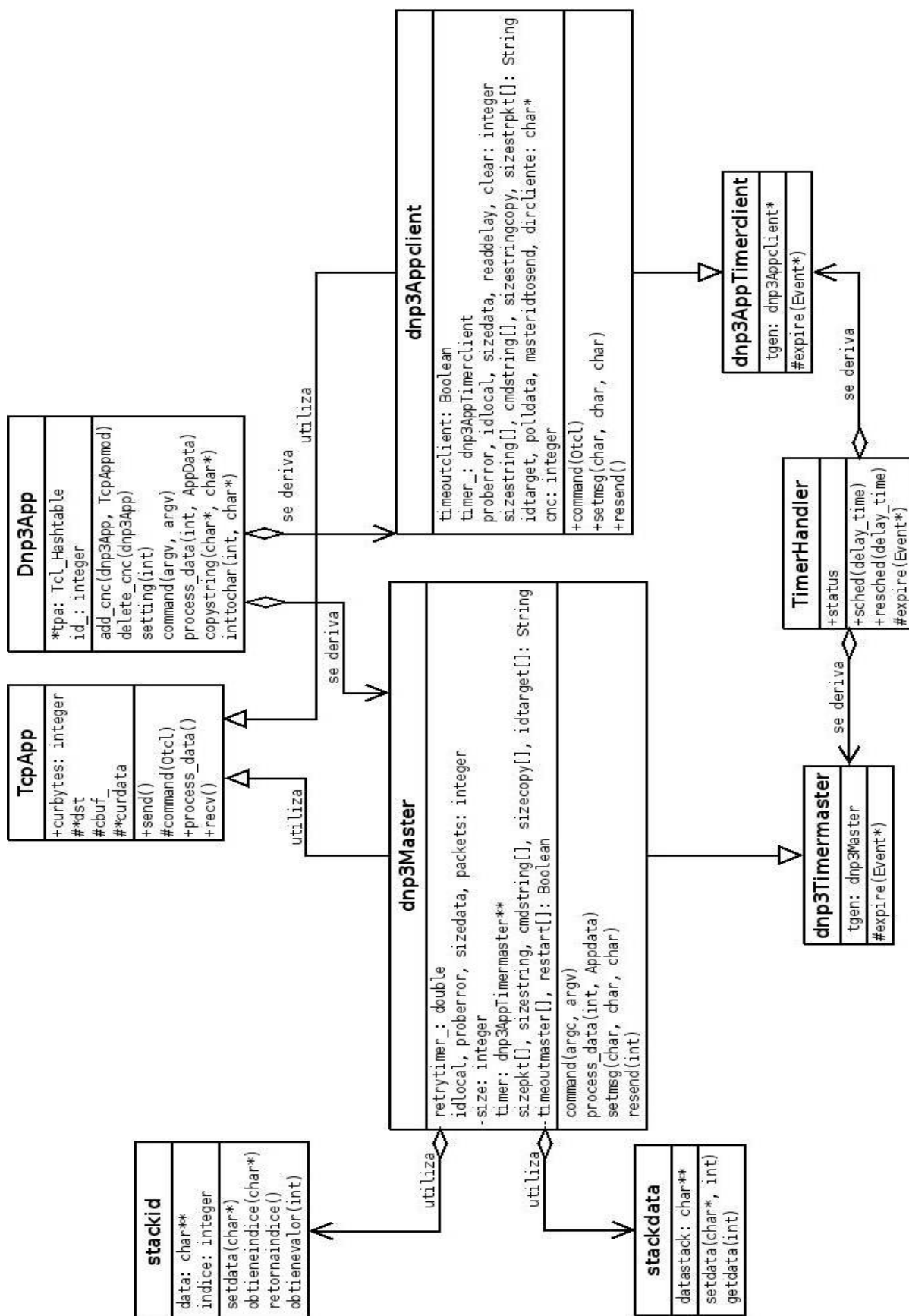
Na Figura 36 apresenta-se o diagrama de classe desenvolvido para a implementação do protocolo DNP3 em NS-2. As duas classes que se encontram na parte superior, com o título de *TcpApp* e *Dnp3App* correspondem as classes já estabelecidas no simulador NS-2 e são a base do desenho do protocolo implementado. A segunda classe corresponde a uma modificação da classe *HTTP*, o que permite modelar o gerenciamento de várias conexões por parte de um agente ao nível de aplicação.

A forma de modelar as conexões entre os dispositivos é feita através de uma tabela *hash* que armazena os valores do objeto da conexão *TcpApp* e a chave é um identificador das estações escravas. O agente central é o único que lida com estas conexões, porque as estações remotas apenas lidam com uma conexão à estação central.

Dentro da classe *TcpApp* são utilizadas as funções enviar e receber dados modificadas para o envio e recepção dos dados no nível da camada de aplicação. Utiliza-se também a classe *Time-Handler* disponível para implementar o temporizador do estado de tempo de espera.

A classe *Dnp3Master* conta com dois tipos de classes: *Stackdata* e *Stackid*. São estruturas de filas de dados que armazenam o valor que identifica cada estação remota e a estrutura de dados da mensagem de cada cliente no caso de haver a necessidade de retransmitir os dados. As classes *Dnp3Timermaster* e *Dnp3AppTimerclient* implementam o temporizador para ativá-lo uma vez que a mensagem é acionada e logo após, decorrido um tempo definido no arquivo de simulação, cancela ou ativa uma interrupção para o reenvio de mensagem na estação de destino.

Figura 36 – Diagrama de classe do sistema.



Fonte: Adaptado (JAIMES, 2012).

Dentro das classes *Dnp3Master* e *DNP3Client*, são encontradas as funções *command*, *process_data*, *SetMsg* e *resend*, conforme detalhamento abaixo:

- Função *command* (argc, argv): responsável por gerar as mensagens. Uso de mensagens não solicitadas, que é uma característica principal do protocolo DNP3 o que permite um uso mais eficiente do canal de comunicação;
- Função *process_data*: coleta os dados quando um evento de recepção da informação analisa e determina a próxima operação do agente;
- Função *setmsg*: executa os processos definidos nas camadas do protocolo como fragmentação, cálculo do tamanho de pacotes e ativação do temporizador para retransmissão;
- Função *resend*: realiza o processo de transmissão de mensagem quando é necessário.

Após a realização do diagrama de estados e da descrição do diagrama de classes, foi implementado o protocolo na linguagem C++ e incluiu quatro arquivos principais, sendo: *TcpAppMod*, *Dnp3App*, *Dnp3AppMaster* e *Dnp3AppClient*.

TcpAppMod: alteração do arquivo principal *TcpApp* com a finalidade de não alterar o software e obter uma implementação compacta e fácil de adaptar entre equipamentos;

Dnp3App: definição da classe *Dnp3App* da qual os objetos fazem parte. O objetivo é estabelecer as funções construtoras das estações mestre com seus temporizadores e sua tabela *hash* de conexões; se deriva também a inicialização da estação escrava;

Dnp3AppMaster: definição das funções e operações descritas no diagrama de classes;

Dnp3AppClient: definição das funções e operações descritas no diagrama de classes da estação escrava.

Para realizar a validação da aplicação, foi implementado um sistema de mensagens que permite identificar a estação transmissora da mensagem, receptora de mensagens, tamanho e número de pacotes com seu valor de tempo na simulação.

O sistema de mensagens desenvolvido tem a seguinte estrutura:

<t. de sim.><m/c:><recv/sended><cmd><pkt\#>.

O campo tempo de simulação (<t. de sim.>) é dado pelo comando de OTcl “[\ \$ns now]” com a finalidade de marcar o tempo do evento que está ocorrendo. O campo marcado com “m” refere-se ao fato de que o evento ocorre na estação Mestre, enquanto o “c” refere-se a estação escrava.

O terceiro campo “recv” indica que a estação recebeu uma mensagem, enquanto que “sended” indica que uma mensagem foi enviada. O campo conhecido como “cmd” define a função a ser executada. Existem atualmente cinco funções principais, *Read*, *Write*, *Select and Operate*, *Restart* e *Event*. O último campo, “pkt#” define o número de pacotes enviados quando é necessária uma segmentação pelo tamanho da mensagem ser grande, ou seja, se o tamanho da mensagem ultrapassar a quantidade de 292 bytes, a mesma será fragmentada.

6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os cenários de simulação e análise de desempenho de redes de comunicação em aplicações *smart grid*. Os resultados foram obtidos através da utilização do simulador NS-2 na versão 2.35 compilado no sistema operacional Linux Fedora Core 64 bits. Os cenários avaliados são de pequeno porte, com a topologia de rede ponto-a-ponto e multipontos, em aplicações *Smart Grid* como a coleta de informações de *smart meter*. Através dos resultados é possível verificar a possibilidade de aplicação em subestações para coletar informações dos sensores.

Qualquer configuração de rede modelada no software simulador NS-2 consta das seguintes etapas:

- Definição do objeto simulador (escalonador de eventos);
`set ns [new Simulator]`

- Definição dos arquivos de saída para análise posterior (Nam, arquivo trace);
`set nf [open out.nam w]`
`$ns namtrace-all $nf`
`set f [open out.tr w]`
`$ns trace-all $f`

- Definição do procedimento para finalizar a simulação;

```
proc fim {} {
    global ns nf f
    $ns flush-trace
    close $f
    close $nf
    exec nam out.nam &
    exit 0
}
```

- Quantidade de nós no sistema, criação da topologia da rede (nós e enlaces);
`set n1 [$ns node]`

```
set n2 [$ns node]
```

- Enlace do nó no sistema;

```
$ns duplex-link $n1 $n2 10Mb 1ms DropTail
```
- Protocolo no nível de camada de transporte e conexão com os nós;

```
set tcp1 [new Agent/TCP/SimpleTcp]
set tcp2 [new Agent/TCP/SimpleTcp]
$ns attach-agent $n1 $tcp1
$ns attach-agent $n2 $tcp2
$ns connect $tcp1 $tcp2
```
- Aplicações, criação dos geradores de tráfego e conexão com os agentes da camada de transporte;

```
set encap [new Application/Tcpmod $tcp1]
set encap2 [new Application/Tcpmod $tcp2]
$encap connect $encap2
set master [new DNP3master]
$master set retrytime_ 1
set client [new DNP3client 1]
$client set proberror_ 3
$master connect $encap
$client connect $encap2
```
- Programação dos eventos da simulação;

```
$ns at 0.1 "$client event $master 70"
$ns at 3.0 "fim"
```
- Execução da simulação;

```
$ns run.
```

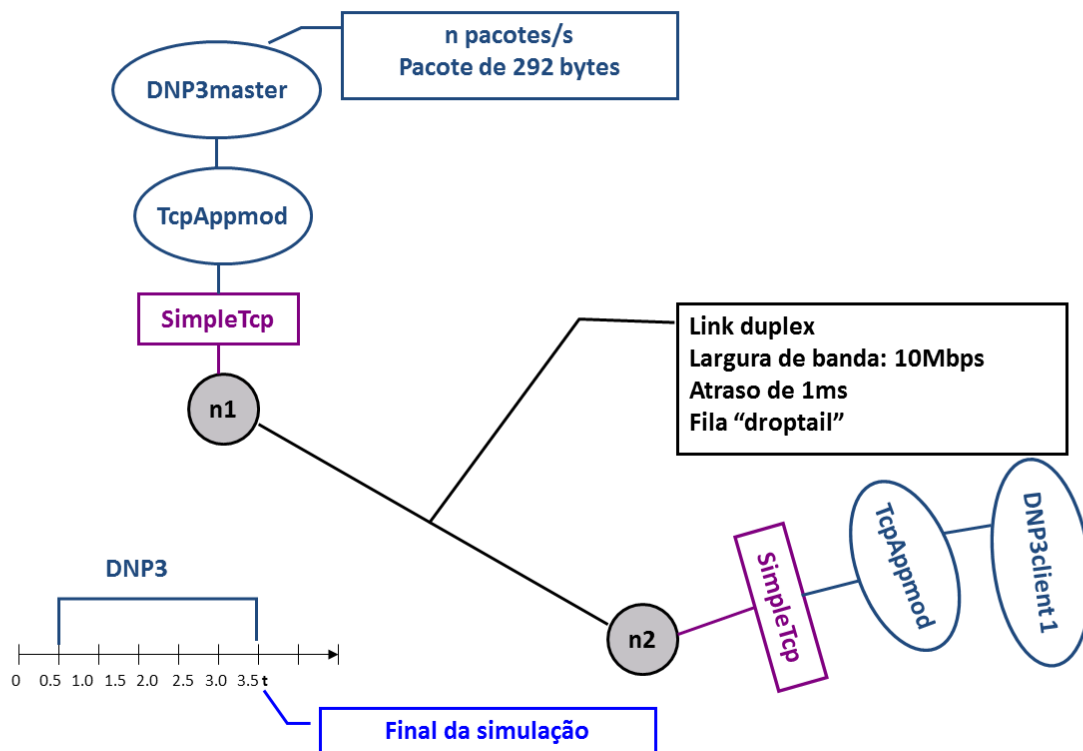
Para modelar uma simulação é preciso escrever um *script* na linguagem OTcl, que será lido por um interpretador e gerará uma saída específica. Para facilitar a criação desse tipo de *script* recomenda-se seguir os passos acima, que representam as principais etapas do

modelo de uma simulação. Adaptando-os de acordo com o tipo de simulação pretendida, estas são as etapas para modelar e simular uma rede no simulador NS-2.

O cenário de simulação do protocolo DNP3 com a arquitetura ponto-a-ponto, com as principais funções básicas, como: a transmissão de mensagens não solicitadas pela estação *Master* enviadas pela estação Remota para otimizar a utilização do canal de comunicação, função de leitura, escrita, seleção e operação e o comando de reiniciar a estação Remota.

Na Figura 37 ilustra-se a arquitetura ponto-a-ponto com dois nós onde são definidas a estação *Master* e a estação Remota, o *Enlace* que interliga os dois nós são do tipo *duplex*, com uma largura de banda de 10 Mbps, com um atraso de 1 ms e fila do tipo *droptail*.

Figura 37 – Definição de uma estação *Master* e estação Remota no ambiente NS-2.



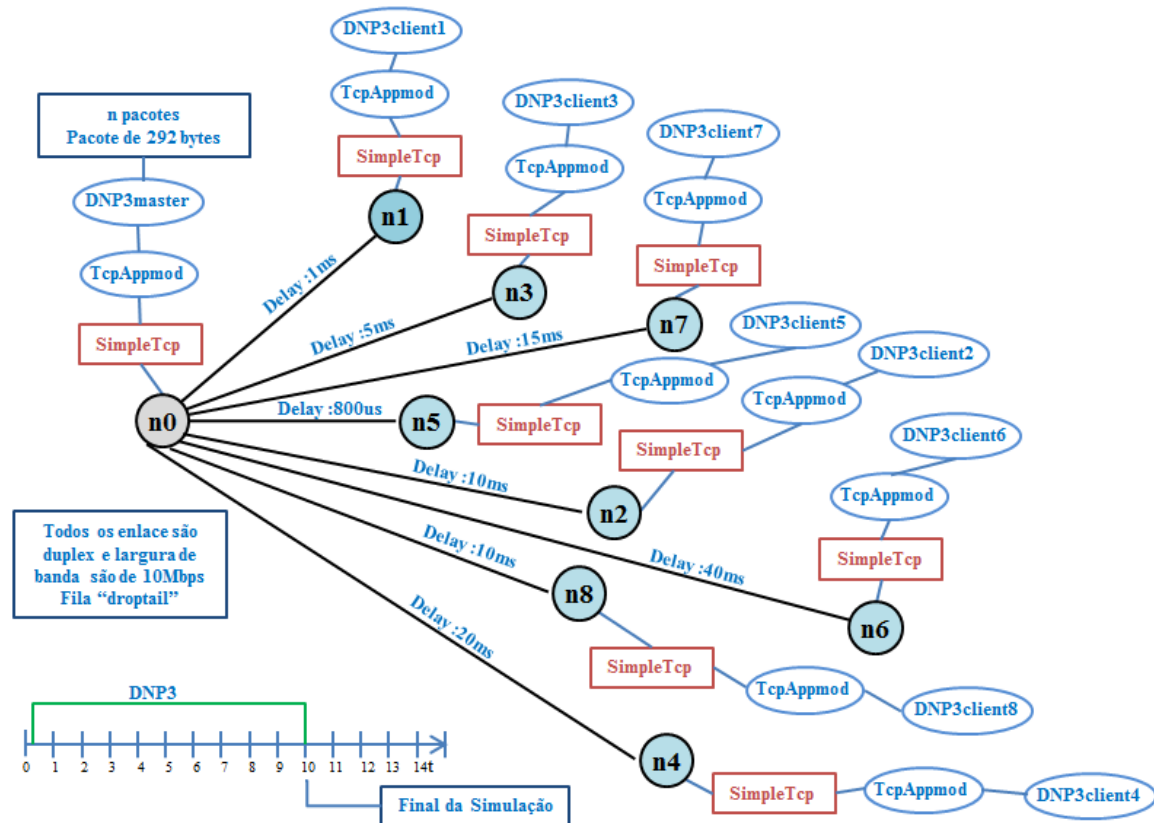
Fonte: Próprio autor.

A configuração é um cenário típico que consta de uma estação *Master* definida no nó “n1” e uma estação Remota definida no nó “n2”. Nesta simulação o protocolo DNP3 está sendo encapsulado numa rede TCP/IP e a comunicação de dado, a nível da camada de aplicação

Na Figura 38 ilustra-se uma configuração de um cenário multiponto, contendo uma estação *Master* e oito estações Remotas. Os *links* de rede são todos do tipo duplex com uma largura de banda de 10 Mbps com uma fila *droptail*. No enlace de cada estação Remota só foi

alterado o atraso na entrega de pacotes, que pode ser ocasionado pela distância entre a estação *Master* e estação Remota ou pelo meio em que está sendo transmitido. A ligação do nó n5 apresenta-se a mais rápida com atraso de 800 μs e o mais lento é o cliente n6 com atraso de 40 ms.

Figura 38 - Cenário de simulação da arquitetura multiponto.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 39 apresenta-se um pacote TCP/IP simplificado com o DNP3 encapsulado.

Figura 39 – Pacote TCP/IP simplificado.



Fonte: Próprio autor.

Conforme Tanenbaum (2003), dentro do pacote do TCP/IP existem os cabeçalhos do IP e do TCP, no cabeçalho IP há o endereço IP de origem e do destino, porta de origem e destino, códigos de verificações, quantidade de pacotes e campos para inclusão de opções. No

total há 20 *bytes* para o cabeçalho do Protocolo IP e mais 20 *bytes* para o cabeçalho do Protocolo TCP, totalizando 40 *bytes* de cabeçalho por pacote.

Desta forma em um pacote de 1.500 *bytes* temos 1.460 *bytes* que formam o *payload*. Já o protocolo DNP3 encapsulado sob TCP/IP possui um total de 332 *bytes* incluindo o DNP3 com 292 *bytes* e mais 40 *bytes* do cabeçalho TCP/IP. A seguir é apresentado o *script* do cenário simulado e as principais funções do DNP3 sob o TCP/IP.

```
#Cria um objeto no simulador
set ns [new Simulator]

# Abre um arquivo para análise posterior (trace)
set f [open out.tr w]
$ns trace-all $f

# Define um procedimento para finalizar a simulação
proc fim {} {
    global ns f
    $ns flush-trace
# fecha o arquivo de log
close $f
exit 0
}

$defaultRNG seed 63

# Criar os Nós
set n1 [$ns node]
set n2 [$ns node]

# Enlace dos nós do Sistema
# Criação do link que conecta n0 e n1
# Canal duplex, 10Mbps de largura de banda, 1ms de atraso, fila "droptail"
$ns duplex-link $n1 $n2 10Mb 1ms DropTail

# Protocolo a Nível de Transporte
# Cria o agente TCP Simple
set tcp1 [new Agent/TCP/SimpleTcp]
set tcp2 [new Agent/TCP/SimpleTcp]

# Anexa o agente ao Nó n1 e n2
$ns attach-agent $n1 $tcp1
$ns attach-agent $n2 $tcp2
$ns connect $tcp1 $tcp2
```

```

#Cria o gerador de Tráfego TCP e faz o encapsulamento no Agente
set encap [new Application/TcpAppmod $tcp1]
set encap2 [new Application/TcpAppmod $tcp2]
$encap connect $encap2

# Cria a Estação Mestre
set master [new DNP3master]
# Define o tempo de espera para a retransmissão
$master set retrytimer_ 1
# Define a prob. de perda de pacotes com valor aleatório no intervalo de 0 a 10
#$master set proberror_ 0
# Cria a Estação Escravo
set client [new DNP3client 1]
# Define o tempo de espera para a retransmissão
$client set retrytimer_ 2
# Define a prob. de perda de pacotes com valor aleatório no intervalo de 0 a 10
$client set proberror_ 3

$master connect $client $encap
$client connect $master $encap2

# Configura momento do início de envio de pacotes DNP3 encapsulado
$ns at 0.1 "$client event $master 78"
$ns at 0.2 "$master read $client 280"
$ns at 0.2 "$master sel&op $client 280"
$ns at 0.2 "$master write $client2 250"
$ns at 0.1 "$client restart $master 78"

# Configura o momento de finalização da simulação
$ns at 3.5 "fim"

# Inicia a Simulação
$ns run

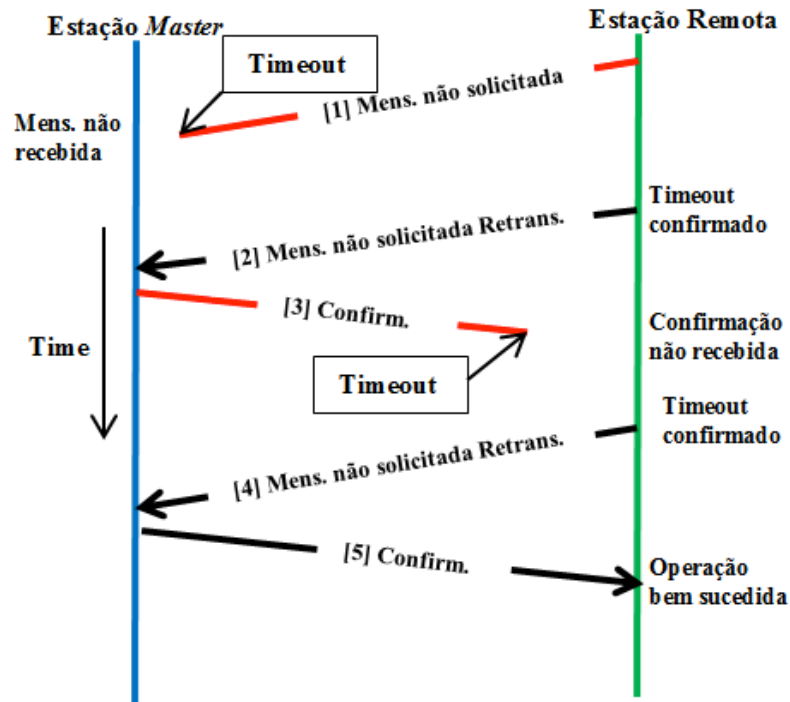
```

6.1 Transmissão de funções Básicas do Protocolo DNP3 Sobre TCP/IP

6.1.1 Transmissão de Mensagem Não Solicitada

Na Figura 40, ilustra-se o uso de mensagens não solicitadas em que a confirmação para respostas não solicitadas não é recebida como esperado. Em ambientes com muita interferência como uma subestação, mesmo com as conexões ponto-a-ponto podem ocorrer as interferências e a detecção de erros que o protocolo realiza no nível de camada de enlace, podendo não ser suficiente para gerar retransmissões entre as estações.

Figura 40 - Transmissão de uma mensagem não solicitada



Fonte: Próprio autor.

A funcionalidade da mensagem não solicitada, permite enviar dados críticos da operação de um dispositivo, como alteração de estado do dispositivo e a superação do valor limite estabelecido sem a necessidade de esperar a solicitação de leitura por parte da estação *Master*. A estação *Master* responde confirmando este tipo de mensagem, a estação Remota espera por essa confirmação para evitar uma retransmissão ou eliminar da memória a informação já enviada à estação *Master*; somente após a confirmação por parte da estação *Master* que a estação Remota elimina essas informações.

Estes efeitos foram modelados através de um valor em cada estação denominado *probererror_* que podem ter valores num intervalo de 0 a 9. O sistema tenta enviar mensagens de acordo com um número aleatório simulando a perda de pacotes ao ter um valor menor que o estabelecido na variável. O valor padrão é 1 (um), o que corresponde para uma perda de 10% dos pacotes. O intervalo de tempo para a retransmissão de uma mensagem é configurado na variável *retrytimer_* através de um valor, assumindo um valor padrão de 1 s.

Tem-se um cenário típico mais simples entre duas estações que transmitem uma troca de mensagens por estar em um ambiente com probabilidades de perdas de pacotes. No topo da Figura 40, a estação Remota envia uma mensagem não solicitada (1), que não é recebida pela estação *Master*. Há vários motivos, como colisões, ruídos ou outros fenômenos. A estação

Remota fica aguardando a confirmação; vencendo o tempo de confirmação a estação torna a reenviar a mesma mensagem (2).

A confirmação (3) não chega na estação Remota, mas a estação continua esperando até vencer o intervalo de tempo para tentar retransmitir a mesma mensagem. O intervalo de tempo na confirmação de reenvio é mais longo, a estação Remota faz a retransmissão da mesma mensagem (4), e esta é recebida pelo *Master* e envia a confirmação do recebimento (5), a estação Remota recebe a confirmação do recebimento de dados, agora a Remota realiza a limpeza do *buffer* e finaliza a parte de comunicação. O resultado desse cenário está na Tabela 1.

Os dados da Tabela 1 são os seguintes: o campo “tempo” é definido em segundos e registra os tempos da ocorrência dos eventos; o Nó define a estação utilizada; o tipo define a ocorrência da mensagem; o comando refere-se aos eventos ocorridos; “Quant. PKT.” refere-se a quantidade de pacotes enviados e “Tam. (b)” refere-se ao tamanho do pacote em *bytes*. Nesta simulação a estação Remota (*Outstation*) inicia uma transmissão de comando (*event*) no instante 0,500000001 segundos e por algum motivo a transmissão não teve sucesso, e o tempo expira após 1s e a estação Remota reenvia a mesma mensagem. A simulação termina no instante em que a mensagem é enviada e confirmada pela estação Remota.

Tabela 1. Mensagem não Solicitada: Resultados

Tempo (s)	Nó	Tipo	Comando	Quant. PKT.	Tam. (b)
0.500000001	<i>Outstation</i>	<i>not send</i>	<i>event</i>	-	-
1.500000001	<i>Outstation</i>	<i>timeout</i>	<i>resend</i>	1	71
2.500000001	<i>Master</i>	<i>receives</i>	<i>event</i>	1	71
2.500000001	<i>Master</i>	<i>no send</i>	<i>event_ok</i>	-	-
2.500000001	<i>Master</i>	<i>timeout</i>	-	-	-
3.500000001	<i>Outstation</i>	<i>resend</i>	<i>event</i>	1	71
3.501088801	<i>Master</i>	<i>receives</i>	<i>event</i>	1	71
3.501088801	<i>Master</i>	<i>send</i>	<i>event_ok</i>	1	-
3.502120801	<i>Outstation</i>	<i>receives</i>	<i>event_ok</i>	1	-

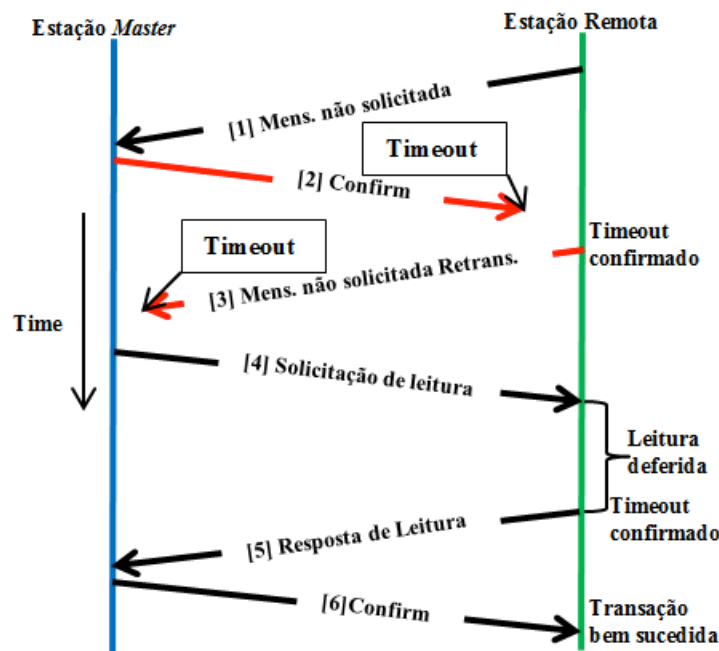
Fonte: Próprio autor.

6.1.2 Transmissão de Mensagem Não Solicitada e uma Função de Leitura

Quando uma estação escrava envia uma mensagem não solicitada e fica no estado de espera por uma confirmação por parte da estação *Master*, nesse intervalo a estação *Master* envia a solicitação da leitura dos dados. A mensagem de reposta por parte da estação Remota

é adiada até o término do intervalo de tempo de espera por resposta por parte da estação *Master*. Terminado o intervalo de tempo, a estação Remota envia a mensagem solicitada e espera pela confirmação da parte da estação *Master*, recebendo a confirmação a estação Remota elimina de sua memória os eventos já enviados e confirmados pelo *Master*. Este cenário é apresentado na Figura 41.

Figura 41 - Transmissão de uma mensagem não solicitada e uma função de leitura.

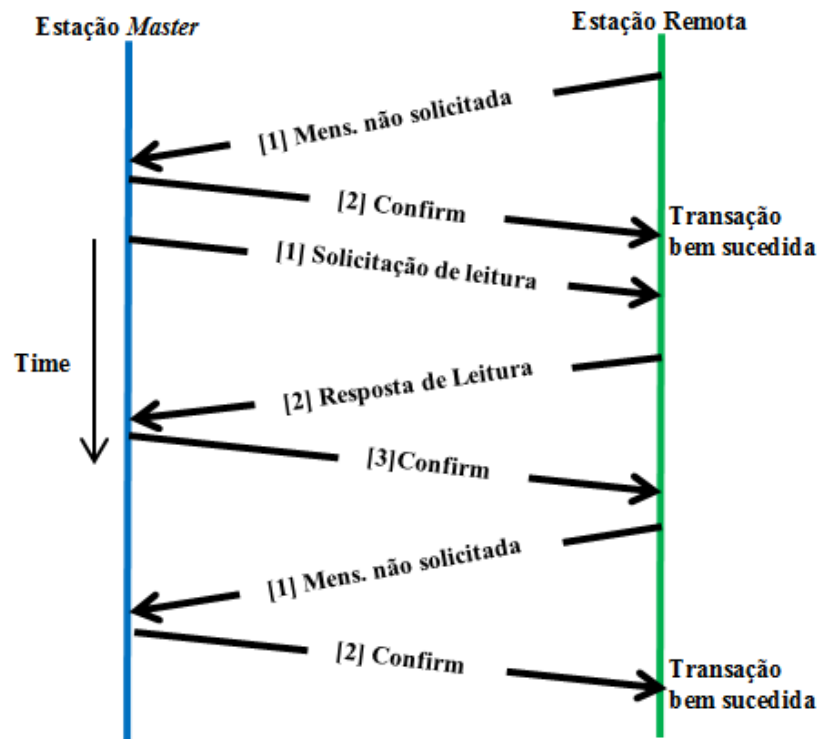


Fonte: Próprio autor.

No início da Figura 42 pode ser observada que a estação Remota envia uma mensagem não solicitada e esta mensagem é recebida pela estação *Master*. A estação Remota fica aguardando a confirmação de resposta por parte da estação *Master*; vencendo o tempo de confirmação, se a mensagem de confirmação não for recebida, a estação reenvia a mesma mensagem.

Após a confirmação do recebimento de dados a estação Remota faz a limpeza do *buffer*, passando alguns ms a estação *Master*, envia uma requisição de leitura para a estação remota, a estação Remota então envia e aguarda a confirmação, logo que recebe a confirmação de recebimento este descarta as informações coletadas da memória e já envia outra mensagem não solicitada para a estação *Master* a qual recebe e confirma o recebimento com sucesso, finalizado a parte de comunicação na simulação. Na Figura 41 pode ser observado que não houve erros na transmissão gerando *timeout* e o resultado dessa simulação é apresentado na Tabela 2.

Figura 42 - Transmissão de uma mensagem não solicitada e uma função de leitura sem *timeout*.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2. Mensagem não Solicitada e função de leitura

Tempo (s)	Nó	Tipo	Comando	PKT.	Tam. (b)
0.5	OutStation1	Sended	Event	1	79
0.500609	Master	Received	Event	1	79
0.500609	Master	Sended	event_ok	1	0
0.501212	OutStation1	Receives	event_ok	1	0
1.0	Master	active timer	0.5 s	0	0
1.0	Master	Sended	read	1	130
1.0006	OutStation1	Received	read	1	130
1.0006	OutStation1	Sended	read_ok	1	0
1.001239	Master	Received	read_ok	1	0
1.001239	Master	disable timer	1 s	0	0
1.001239	Master	Sended	conf_read	1	10
1.001843	OutStation1	received	conf_read	1	10
1.5	OutStation1	Sended	event	1	44
1.500606	Master	received	event	1	44
1.500606	Master	Sended	event_ok	1	0
1.501220	OutStation1	Received	event_ok	1	0

Fonte: Próprio autor.

Na tabela 3 ilustra-se o resultado obtido do arquivo *trace* do NS-2, na coluna evento:

+ : entrada de pacote na fila;

- : saída do pacote da fila;

r : pacote recebido no destino;

Tabela 3. Resultado do arquivo *trace* do ns-2

Evento	Tempo	Nó Orig.	Nó Des.	PKT.	Tam. (b)	ID. Pkt.
+	0.1	0	1	CBR	800	0
-	0.1	0	1	CBR	800	0
r	0.100664	0	1	CBR	800	0
+	0.5	1	0	DNP3	119	1
-	0.5	1	0	DNP3	119	1
r	0.50061	1	0	DNP3	119	1
+	0.50061	0	1	DNP3	40	2
-	0.50061	0	1	DNP3	40	2
r	0.51213	0	1	DNP3	40	2
+	0.6	0	1	CBR	800	3
-	0.6	0	1	CBR	800	3
r	0.600664	0	1	CBR	800	3
+	1.0	0	1	DNP3	198	4
-	1.0	0	1	DNP3	198	4
r	1.000616	0	1	DNP3	198	4
+	1.000616	1	0	DNP3	297	5
-	1.000616	1	0	DNP3	297	5
r	1.00124	1	0	DNP3	297	5
+	1.00124	0	1	DNP3	50	6
-	1.00124	0	1	DNP3	50	6
r	1.001844	0	1	DNP3	50	6
+	1.1	0	1	CBR	800	7
-	1.1	0	1	CBR	800	7
r	1.100664	0	1	CBR	800	7
+	1.5	1	0	DNP3	84	8
-	1.5	1	0	DNP3	84	8
r	1.500607	1	0	DNP3	84	8
+	1.500607	0	1	DNP3	170	9
-	1.500607	0	1	DNP3	170	9
r	1.50122	0	1	DNP3	170	9

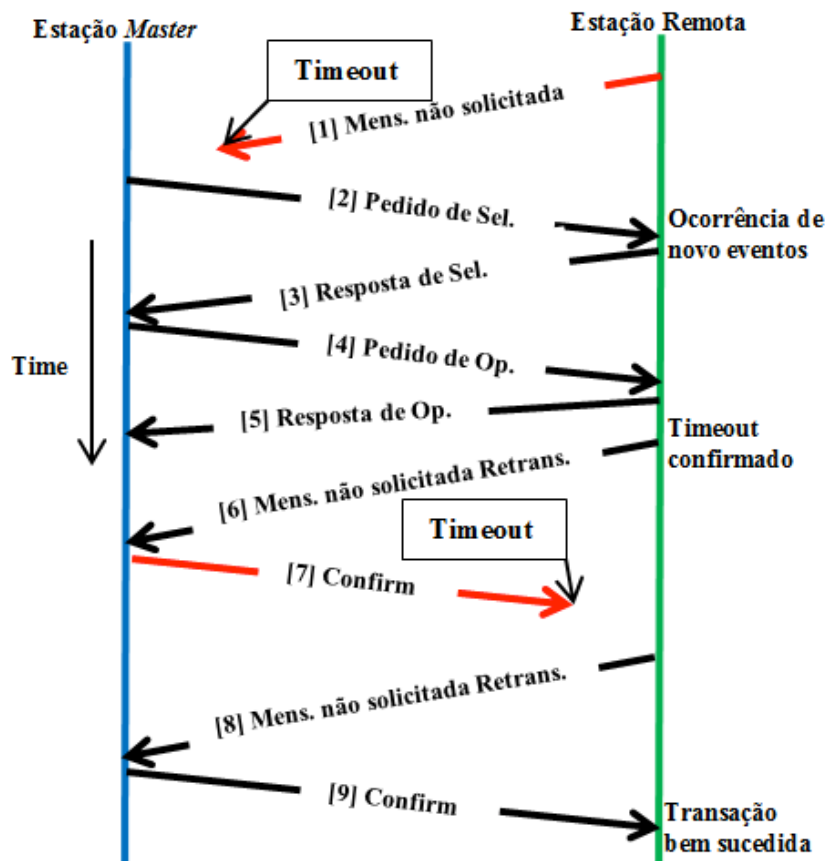
Fonte: Próprio autor.

O tempo informa o momento da simulação, a coluna Nó Origem indica onde ocorreu o evento, a coluna do Nó Destino indica o destino de envio do pacote, a coluna PKT indica o tipo de pacote, o Tam. (b) informa o tamanho dos pacotes em *bytes* e finalizando o ID. Pkt indica a identificação de forma única do pacote na rede.

6.1.3 Transmissão de Mensagem não Solicitada e Função Diferente de Leitura

Na Figura 43 é mostrado um cenário de mensagem não solicitada e função diferente de leitura, quando uma estação Remota está em estado de espera de uma confirmação por parte da estação *Master* e a estação *Master* envia uma mensagem diferente da leitura de dados, uma mensagem com seleção e operação. Neste caso a estação Remota deve responder imediatamente a resposta da mensagem do *Master* e confirmado por parte da estação *Master*, a estação Remota posteriormente volta a processar a mensagem não solicitada e envia novamente ao *Master*. Confirmando-se a resposta do *Master* finaliza-se a comunicação. O resultado da simulação deste cenário está na Tabela 4.

Figura 43 - Cenário de mensagem não solicitada e função diferente de leitura.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4. Mensagem não solicitada e função diferente de leitura

Tempo (s)	Nó	Tipo	Comando	PKT.	Tam. (b)
0.1000000	<i>Outstation</i>	<i>not sended</i>	<i>event</i>	1	79
0.1000000	<i>Master</i>	<i>active timer</i>	<i>Is</i>	-	-
0.2000000	<i>Master</i>	<i>sended</i>	<i>Sel&Op</i>	1	133
0.2011608	<i>Outstation</i>	<i>received</i>	<i>Sel&Op</i>	1	133
0.2011608	<i>Outstation</i>	<i>sended</i>	<i>Sel&Op_ok</i>	1	-
0.20232159	<i>Master</i>	<i>received</i>	<i>Sel&Op_ok</i>	1	-
0.20232159	<i>Master</i>	<i>active timer</i>	<i>Is</i>	-	-
0.20232159	<i>Master</i>	<i>sended</i>	<i>operate</i>	1	133
0.20348239	<i>Outstation</i>	<i>received</i>	<i>operate</i>	1	133
0.20348239	<i>Outstation</i>	<i>sended</i>	<i>op_ok</i>	1	-
0.20464319	<i>Master</i>	<i>received</i>	<i>op_ok</i>	1	-
1.10000000	<i>Outstation</i>	<i>resended</i>	<i>timeout</i>	1	79
1.10000000	<i>Outstation</i>	<i>sended</i>	<i>event</i>	1	79
1.10109520	<i>Master</i>	<i>received</i>	<i>event</i>	1	79
1.10109520	<i>Master</i>	<i>sended</i>	<i>event_ok</i>	1	-
1.10223360	<i>Outstation</i>	<i>received</i>	<i>event_ok</i>	1	-

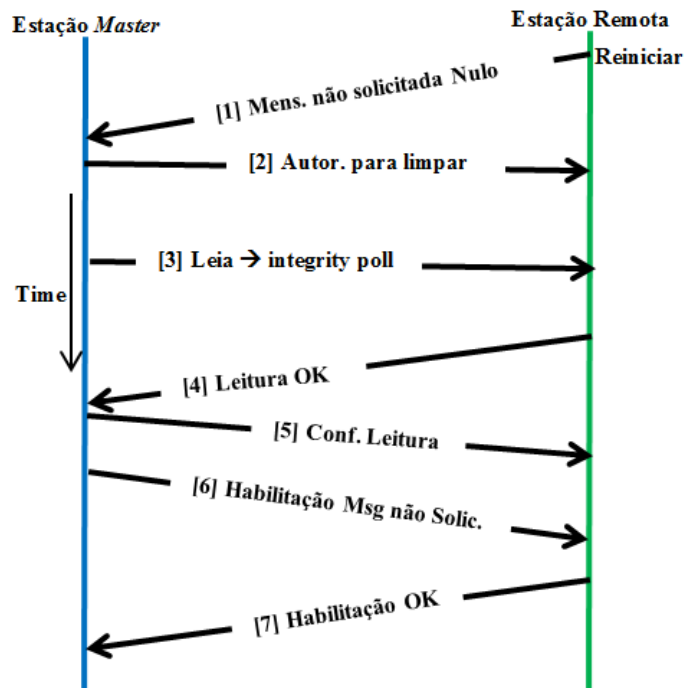
Fonte: Autoria própria.

6.1.4 Transmissão de Mensagem de Reinício da Estação Remota

Quando uma estação remota entra no estado de *reset* e está configurada para enviar mensagens não solicitadas, a estação deve começar a enviar mensagens não solicitadas sem dados até obter a confirmação da parte da estação *Master*; o número de retransmissões estabelecida nas normas não é especificado.

A seguir, a estação *Master* envia um comando de leitura denominado *integrity poll* para obter os valores e estado dos dispositivos e se for necessário, posteriormente estabelecer o valor de suas entradas e saídas, uma vez confirmado o passo anterior, definida através da função *write* a função de enviar mensagens não solicitadas por parte da estação Remota. Na Figura 44, ilustra-se este cenário e na Tabela 5 apresenta-se os dados da simulação deste cenário.

Figura 44 - Cenário de reinício por parte da estação remota.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5. *Restart* por parte da estação remota.

Tempo (s)	Nó	Tipo	Comando	Quant. PKT.	Tam. (b)
0.50000001	Outstation	Send	restart	1	31
0.50105680	Master	receives	restart	1	31
0.50105680	Master	send	clear	1	17
0.50105680	Master	active timer	1	-	-
0.50105680	Master	send	read	1	-
0.50210240	Outstation	receives	clear	1	17
0.50215921	Outstation	receives	read	1	-
0.50215921	Outstation	send	read_ok	1	-
0.50319760	Master	receives	read_ok	1	-
0.50319760	Master	Disab. timer	1	-	-
0.50319760	Master	send	conf_read	1	10
0.50319760	Master	active timer	1	-	-
0.50319760	Master	send	write	1	17
0.50423760	Outstation	receives	conf_read	1	10
0.50429440	Outstation	receives	write	1	17
0.50429440	Outstation	send	write_ok	1	-
0.50533990	Master	receives	write_ok	1	-
0.50533990	Master	Disab. timer	1	-	-

Fonte: Próprio autor.

Os resultados da Tabela 5 ilustram quando uma estação Remota transmite a mensagem de inicialização do mesmo enviando uma mensagem não solicitada vazia, a estação *Master* por sua vez envia o comando (*clear*) para limpar o *buffer* de memória da estação Remota, também o comando (*read*) para fazer a leitura dos dispositivos ligados na entrada e saída da estação Remota; após a confirmação, envia o comando para a habilitação da função transmissão de mensagem não solicitada e encerra a simulação.

6.2 Cenários Simulados e Analisados

Esta seção apresenta os resultados das simulações dos cenários e a análise de desempenho do protocolo de comunicação DNP3 sob TCP/IP em aplicações *smart grid*. No total foram simulados cinco cenários analisando o tempo de atraso e o desempenho da função de mensagens não solicitadas. Os requisitos de atraso *delay* previstas na literatura para a comparação dos resultados são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6. Requisitos de *delay* para transmissão de mensagem.

Tipo	Delay entrega	Aplicações
Proteção	3 ~ 16ms	Disparo de alarme, desligamento, religamento.
Monitoramento em tempo real	16 ~ 100ms	Relatórios dos Estados
Baixa Velocidade	≥ 100 ms	Transferência de arquivos

Fonte: Adaptado de (XIANG LU et al., 2011).

Os cenários simulados são:

- ✓ Cenário 1 – Avaliação de um cenário de pequeno porte em aplicações *smart grid* com topologia ponto-a-ponto em uma rede com tráfego heterogêneo;
- ✓ Cenário 2 – Avaliação de um cenário com topologia multi-ponto em uma rede WLAN IEEE 802.11b *ad-hoc* aplicada em infraestruturas críticas;
- ✓ Cenário 3 – Avaliação de um cenário com topologia multi-ponto em uma rede mista IEEE 802.3 e IEEE 802.11b em aplicações *smart meter*;
- ✓ Cenário 4 – Avaliação de um cenário com topologia multi-ponto em uma rede WLAN IEEE 802.11b *ad-hoc* em aplicações *smart meter*;
- ✓ Cenário 5 – Avaliação de um cenário com topologia multi-ponto em uma rede WLAN IEEE 802.11b *ad-hoc* em aplicações *smart grid*.
- ✓ Cenário 6 – Avaliação de um cenário com topologia multi-ponto em uma rede WLAN IEEE 802.11g *ad-hoc* em aplicações *smart grid*.

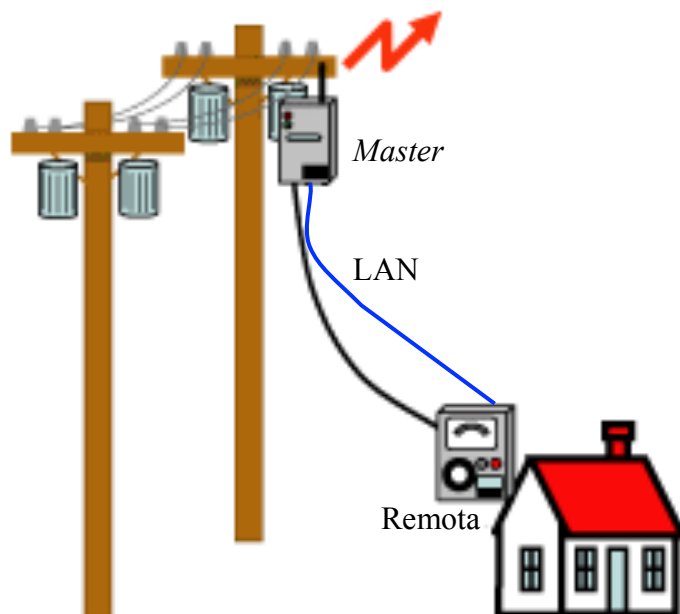
6.2.1 Simulação do cenário 1 com topologia ponto-a-ponto em uma rede cabeada com tráfego heterogêneo

Foi avaliado um cenário de pequeno porte em aplicações *smart grid* com topologia ponto-a-ponto em uma rede cabeada com tráfego heterogêneo. O cenário de simulação do protocolo de comunicação DNP3, utilizando a arquitetura ponto-a-ponto, empregando a função básica: o envio de mensagens não solicitadas.

Na figura 45 ilustra-se um exemplo de residência ligado à rede inteligente de energia elétrica através de uma rede cabeada LAN *ethernet*. Na entrada do imóvel encontra-se uma estação remota; neste dispositivo remoto são interligados os medidores inteligentes e sensores para monitorar a qualidade da energia elétrica distribuída, além da monitoração do consumo em tempo real.

Através deste mecanismo a concessionária pode realizar remotamente as leituras de consumo e até mesmo interromper o fornecimento de energia elétrica por inadimplência do consumidor, bem como, a sua religação, após a regularização dos débitos, sem que haja o deslocamento de funcionários até a residência e assim reduzir custos com a manutenção.

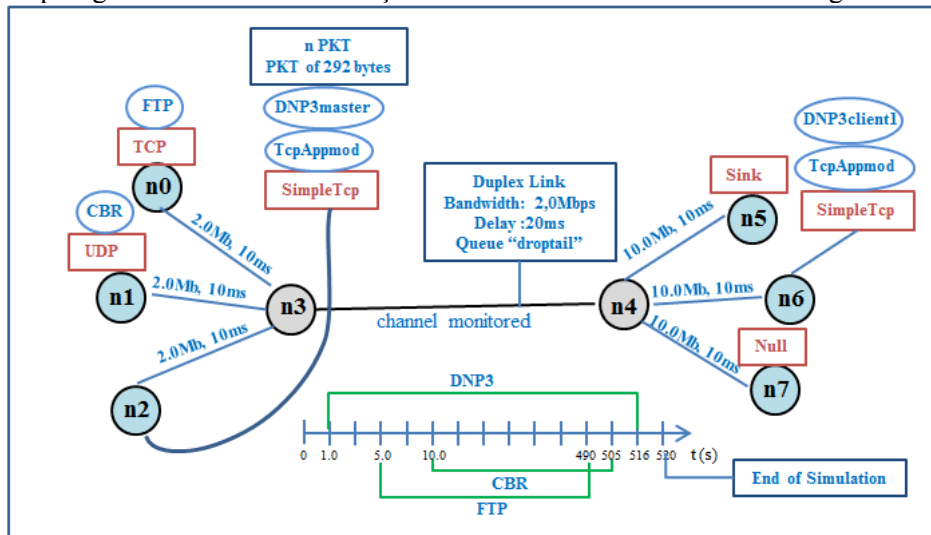
Figura 45 - Interligação do imóvel ao sistema *smart grid*.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 46 mostra-se o cenário considerado na simulação e na Tabela 7 os principais parâmetros assumidos da rede de comunicação.

Figura 46 - Topologia do cenário de simulação da rede cabeada com dados heterogêneos.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 7. Parâmetros assumidos da rede do cenário 1.

Nós	Link Duplex (Mb)	Delay (ms)	Traffic	Queue
n0 ----n3	2	10	FTP	droptail
n1-----n3	2	10	CBR	droptail
n2-----n3	2	10	DNP3	droptail
n3-----n4	2	20	FTP, CBR, DNP3	droptail
n4-----n5	10	10	FTP	droptail
n4-----n6	10	10	DNP3	droptail
n4-----n7	10	10	CBR	droptail

Fonte: Próprio autor.

O envio do pacote do DNP3 é constante com intervalos de 5 s iniciando-se no instante 1 s e terminado no instante 516 s. O pacote FTP (*File Transfer Protocol*) é gerado no instante 5 s e termina no instante 490 s. Já o pacote CBR (*Constant Bit Rate*) inicia no instante 10 s e termina em 505 s. A simulação inicia no instante 0 s e termina em 520 s.

A configuração é um cenário típico que conta com uma estação mestre definida no nó “n2” e uma estação escrava definida no nó “n6”. Nesta simulação o protocolo DNP3 está sendo encapsulado em uma rede TCP/IP e a comunicação de dados é no nível da camada de aplicação.

O cenário descreve a transmissão de mensagem não solicitada. Ao receber uma mensagem de dados proveniente de uma estação Remota, a estação *Master* deve efetuar a confirmação de recebimento ao emissor da mensagem. Se a confirmação não for recebida

pelo dispositivo Remoto, o mesmo deve retransmitir a mensagem anterior. Do mesmo modo, caso haja o recebimento, a estação Remota limpa seu *buffer* de mensagens.

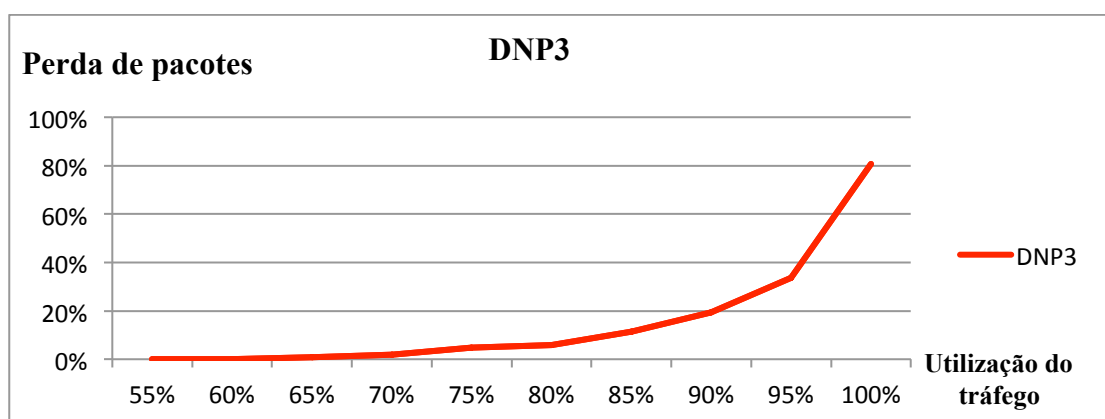
Em ambientes com muita interferência como ruídos na linha de transmissão, mesmo com as conexões ponto-a-ponto, pode haver interferências ocasionando quadros errôneos entre as estações. Este efeito de erros de transmissão é agravado por cenários onde existem diversos outros serviços operantes no enlace, como HTTP, FTP, CBR, entre outros.

A probabilidade de erro no tráfego de mensagens no enlace foi modelada a partir da variável "*probererror_*". Na figura 47 ilustra-se o resultado do desempenho do protocolo DNP3 em uma rede heterogênea, o gráfico mostra a quantidade de pacotes perdidos com a utilização do canal de comunicação, para obter o gráfico foi realizada a simulação com tempo de 520 s.

O tráfego DNP3 iniciou-se no tempo de 1 s e finalizou em 516 s, com mensagem não solicitada enviada constantemente a cada 5 s com tamanho de pacotes de 250 bytes. No intervalo da simulação foram gerados 104 pacotes com 292 bytes, já incluídos os 10 bytes do cabeçalho e mais 32 bytes de CRC. Com o encapsulamento no TCP/IP houve o aumento do tamanho total para 332 bytes.

O tráfego gerado pelo TCP, simulando o envio de pacotes FTP com tamanho de 1.000 bytes, e do UDP, com envio de pacotes do tipo CBR, foi de 1.000 bytes. O resultado mostrou que até 85% da utilização do canal de comunicação, a comunicação pode ser utilizada com o protocolo DNP3 para leitura e monitoramento de funções básicas. Com a utilização do canal acima de 85% fica inviável o uso em redes heterogêneas sem o serviço de QoS (*Quality of Service*), pois há muita perda de pacote DNP3 e o sistema não pode mais ser utilizado para a finalidade de monitoramento e controle em tempo real.

Figura 47 - Perdas de pacotes com aumento do tráfego no *link*.



Fonte: Próprio autor.

6.2.2 *Simulação do cenário 2 com topologia multi-ponto em uma rede WLAN IEEE 802.11b ad-hoc em infraestruturas críticas*

Atualmente as infraestruturas críticas desempenham um papel fundamental numa sociedade moderna. O sistema de energia elétrica é uma infraestrutura crítica altamente interligada e dinâmica. Constituída de várias concessionárias, são divididas em sistemas de geração, transmissão, distribuição e usuários (BIGHAM, GAMEZ e LU, 2003).

Com a automação da rede elétrica, as concessionárias possuem diversas aplicações voltadas ao monitoramento, controle e operação na rede elétrica. E todas essas operações exigem meio de comunicação eficiente, confiável e de alta disponibilidade, seja em regiões urbanas ou áreas rurais. A rede *wireless ad-hoc* viabiliza essa comunicação com um custo menor e com um tempo de implantação mais rápida.

Com o objetivo de analisar o desempenho do protocolo de comunicação DNP3 em redes WLAN através do *patch* gerador de pacotes do protocolo DNP3 sob o IEEE 802.11b no NS-2. O cenário da simulação considerado nesse trabalho foi o comportamento do protocolo DNP3 sob uma arquitetura multiponto da rede IEEE 802.11b *ad-hoc*, utilizando a seguinte função básica do DNP3: o envio de mensagens não solicitadas, enviadas pela estação remota para otimizar o uso do canal de comunicação.

A topologia da rede é composta por duas estações remotas, uma estação *Master* e um ponto de acesso entre os nós ponto-a-ponto se estiverem dentro do alcance, caso contrário a comunicação é realizada por outros nós intermediários pela retransmissão dos pacotes até o nó destino.

A Tabela 8 apresenta os principais parâmetros do modelo da rede considerada na simulação de transmissão de mensagens não solicitadas com tamanho de pacotes de 292 bytes.

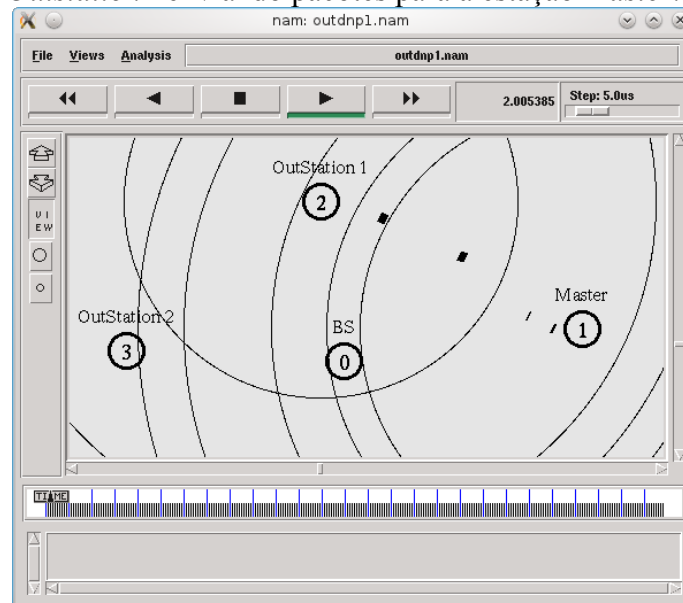
A Figura 48 mostra trecho da simulação pelo NAM (*Network Animator*), nessa ilustração é possível visualizar que todos os nós estão dentro do alcance e o tráfego gerado na rede é encaminhado diretamente ao nó destino.

O envio do pacote DNP3 é constante com intervalos de 2 s em cada estação escrava, iniciando-se no instante 2 s e encerrando no instante 205 s, a estação mestre recebe as informações num intervalo de 1 s. A configuração é um cenário simples que conta com uma estação *Master* definida no “nó 1” e duas estações escravas definidas no “nó 2” e no “nó 3” com um ponto de acesso no “nó 0”. Nesta simulação o protocolo DNP3 está sendo encapsulado em uma rede TCP/IP e a comunicação de dados é na camada de aplicação.

Tabela 8. Parâmetros da Rede modelada do cenário 2.

Parâmetro	Valor
Canal	<i>WirelessChannel</i>
Propagação	<i>TwoRayGround</i>
Interface de rede	<i>Wireless Phy</i>
Camada MAC	802_11
Tipo de fila	<i>DropTail</i>
Camada de enlace	LL
Modelo da antena	<i>OmniAntenna</i>
Número máximo de pacote na fila	50
Número de nós sem fio	3
Protocolo de roteamento	DSDV
Área de cobertura (XxY)	400 m x 200 m
Número de estações base	1
Taxa de transmissão	11 Mb
Tamanho dos pacotes	292 bytes
Tipo de aplicação	DNP3
Evento	Mensagens não solicitados

Fonte: Próprio autor.

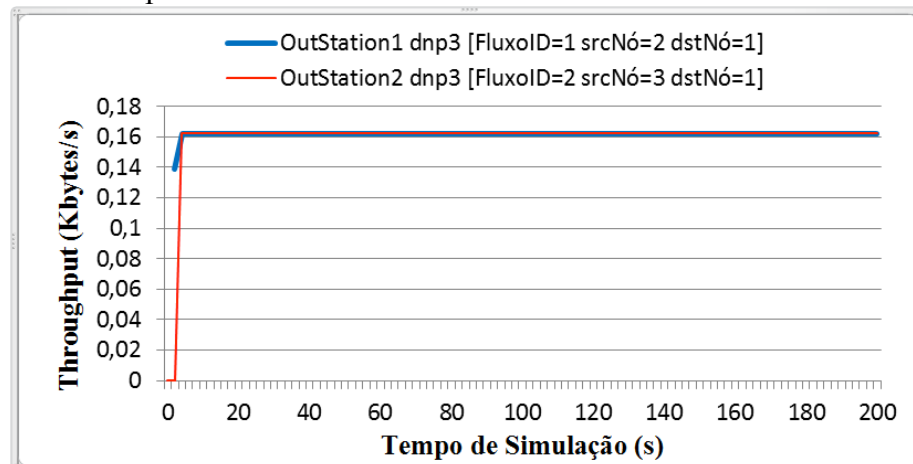
Figura 48 - Estação *Outstation1* enviando pacotes para a estação *Master*.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 49 mostra-se o *Throughput* (vazão) dos pacotes transmitidos da *Outstation1* para a *Master* (curva azul) e da *Outstation2* à *Master* (curva vermelha). Com os parâmetros da topologia, tráfego DNP3 gerado a cada 2 s e tamanho de 292 bytes, a vazão

média esperada está em torno de 146 *bytes/s* (0,142 *Kbytes/s*). O resultado mostra uma vazão um pouco maior em função do encapsulamento dos pacotes DNP3 pelo TCP/IP no simulador.

Figura 49 – Vazão de pacotes.

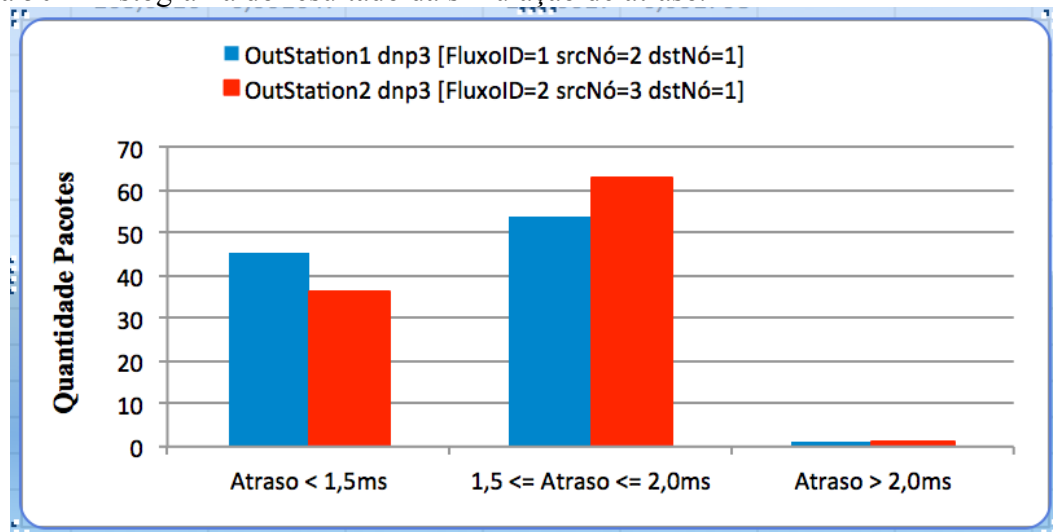


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 50, ilustra-se o atraso na entrega do tráfego DNP3 das *Outstation's* para a *Master*. A distância entre a *Outstation1* e a *Master* é cerca de 283 m e entre a *Outstation2* e a *Master* cerca de 400 m. Como a *Outstation1* está mais próxima da *Master* do que a *Outstation2*, a tendência é que os pacotes enviados pela *Outstation1* tenham um atraso menor do que a *Outstation2*.

No histograma da Figura 49 mostra-se claramente esse perfil, uma quantidade maior de pacotes com atrasos menores do que 1,5 ms pela *Outstation1* em relação à *Outstation2* e a inversão dessa característica no caso do atraso maior do que 1,5 ms.

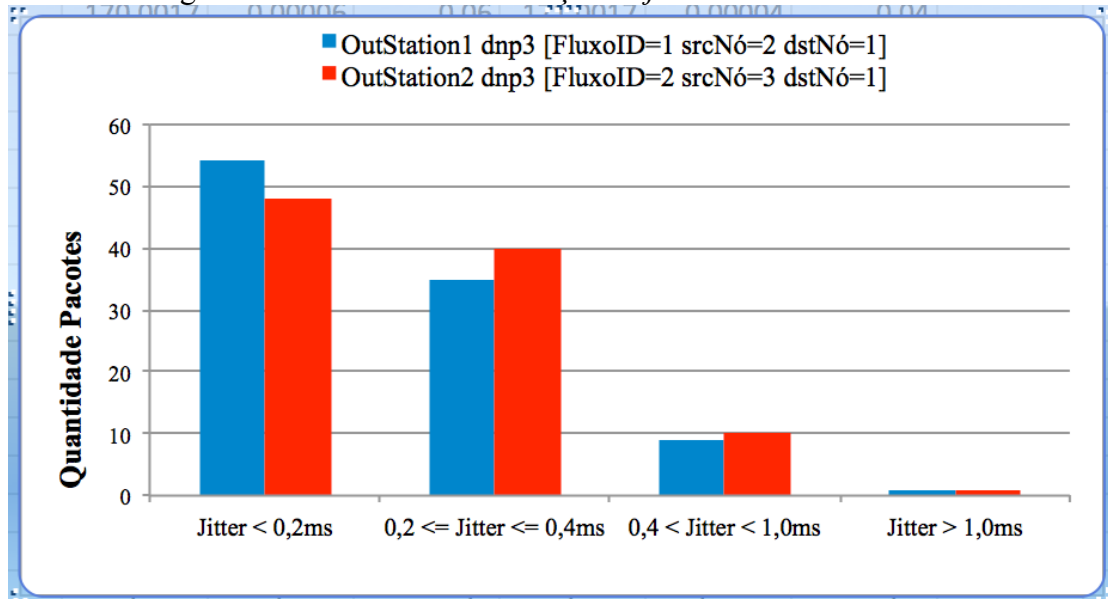
Figura 50 – Histograma do resultado da simulação de atraso.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 51 ilustra-se o histograma do *jitter* e a análise é análoga ao tempo de atraso.

Figura 51 – Histograma do resultado da simulação de *jitter*



Fonte: Próprio autor.

6.2.3 Simulação do cenário 3 com topologia multi-ponto em uma rede mista IEEE 802.3 e IEEE 802.11b em aplicações smart meter

Este cenário pretende demonstrar através de simulações, uma alternativa capaz de reduzir os custos com a comunicação com os medidores inteligentes das companhias de serviços essenciais, utilizando a rede de banda larga existente nas unidades consumidoras.

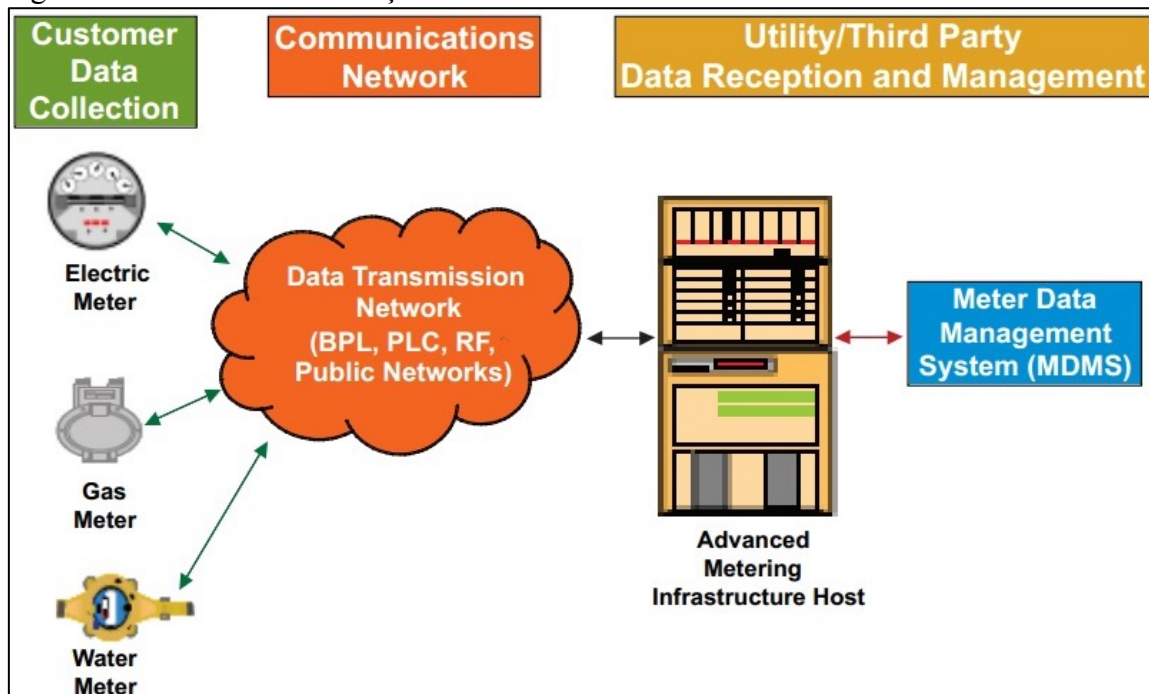
O medidor inteligente (*smart meter*) são medidores eletrônicos de energia elétrica, água ou gás dotado de tecnologia destinado a coletar, medir, analisar e gerenciar o consumo. Utilizam a TIC e as informações são coletadas em intervalos pré-determinados de tempo.

Estes dados são posteriormente encaminhados para a distribuidora, em alguns casos a transmissão dessas informações é em tempo real e em outros com intervalos maiores. Os medidores eletromecânicos convencionais normalmente registram somente kWh (quilowatt-hora) ao longo do mês, já os medidores eletrônicos além de medir kWh e Kvarh (kilovolt-ampère-reactivo-hora), registram outras grandezas elétricas como corrente, fator de potência e tensão.

Executam tanto a medição de consumo (fluxo direto) como geração (fluxo reverso), diferenciação dos registros por faixas horárias, interrupção do fornecimento remoto, pré-pagamento, emissão de alarmes, conforme o tipo de cliente pode fazer programação de

funcionalidade e registros diferenciados. Realização de leitura remota, através da adoção de recursos tecnológicos presentes no sistema AMI (*Advanced Metering Infrastructure*) (EKANAYAKE et al., 2012). A figura 52 ilustra de forma resumida os blocos de construção do sistema AMI.

Figura 52 - Blocos de construção do sistema AMI.



Fonte: (EPRI, 2007).

Com o objetivo de analisar o desempenho do protocolo de comunicação DNP3 em redes mistas IEEE 802.3 e IEEE 802.11b sob tráfego de pacotes heterogêneos, foi desenvolvido um *patch* específico do protocolo DNP3 sob o WLAN IEEE 802.11 no NS-2. O cenário da simulação considerado nesse trabalho foi o comportamento do protocolo de comunicação DNP3 sob uma arquitetura multiponto numa rede mista cabeada e sem fio IEEE 802.3 e IEEE 802.11, numa unidade consumidora com as seguintes funções básicas do DNP3:

- Envio de mensagens não solicitadas das estações remotas (*smart meter*);
- Transmissão de informações em intervalos de 2s.

A topologia da rede é composta por uma rede cabeada entre o AP (*Access Point*) e um *gateway* e cinco nós *wireless* IEEE 802.11, sendo três estações remotas simulando medidores inteligentes de energia, água e gás, um dispositivo móvel com tráfego de pacotes TCP simulando o acesso a *internet* e outro com tráfego de pacotes CBR simulando uma teleconferência, VOIP. A estação central está conectada ao *gateway*, a comunicação dos nós até o *gateway* e dado através do AP.

A Tabela 9 apresenta somente os parâmetros cujos valores são diferentes daqueles da Tabela 8 para o modelo da rede considerada na simulação de transmissão de pacotes heterogêneos no intervalo do *gateway* até o AP, e do AP até os nós sem fio. O tamanho do pacote do DNP3 (292 bytes) é encapsulado no protocolo TCP/IP adicionando-se mais 20 bytes do cabeçalho TCP e mais 20 bytes do cabeçalho IP, totalizando 332 bytes. Os pacotes TCP com 1.040 bytes e o CBR com 1.023 bytes, à confirmação de recebimento do pacote DNP3 está no protocolo TCP/IP, assim o total de pacotes é 40 bytes sendo o mesmo tamanho do pacote ACK do TCP.

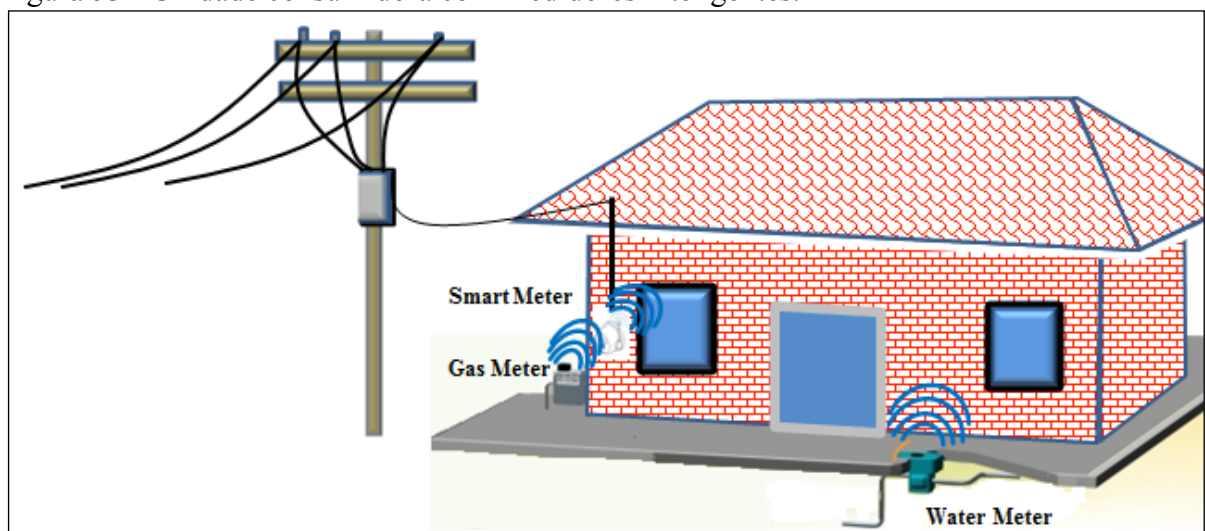
Tabela 9. Parâmetros da rede modelada do cenário 3.

Parâmetro	Valor
Número de nós sem fio	5
Área de cobertura (XxY)	40 m x 20 m
Número de nós cabeado	1
Número de <i>Access Point</i>	1
Taxa de transmissão	11 Mb
Tamanho dos pacotes	292, 1.023 e 1.040 bytes
Tipo de aplicação	DNP3, TCP, CBR
Evento do DNP3	Mensagens não solicitados

Fonte: Próprio autor.

Na figura 53 ilustra-se o cenário proposto neste trabalho de uma unidade consumidora contendo três medidores inteligentes: energia elétrica, água e gás. Na Figura 53 ilustra-se a topologia da rede e as conexões.

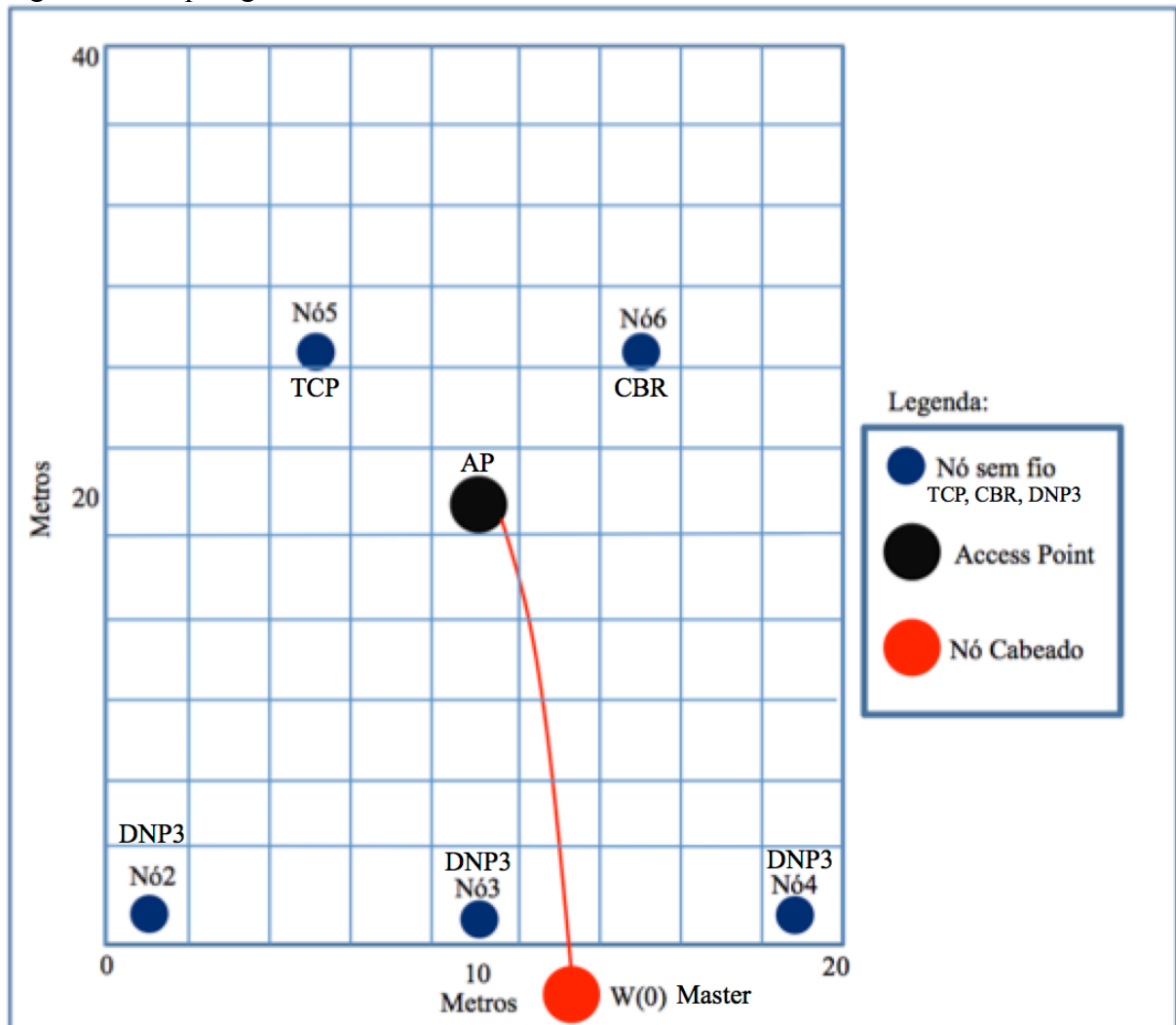
Figura 53 - Unidade consumidora com medidores inteligentes.



Fonte: Próprio autor.

No NS-2 todos os protocolos de transporte são definidos através de um agente. Na Figura 54, aplicando-se os parâmetros da Tabela 9, tem-se cinco agentes definidos: TCP/SimpleTcp, TCP/Newreno, UDP, TCPSink e (*Null*). O protocolo pró-ativo DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector Routing*) mantém uma tabela de rotas possíveis para o tráfego de pacotes por toda a rede, todos os Nós sem fio empregam o protocolo DSDV.

Figura 54 - Topologia da rede e conexões.



Fonte: Próprio autor.

Simulação da aplicação CBR: um agente UDP anexado ao nó W(0) e outro agente de recepção (*Null*) vinculado ao nó sem fio N66. Além disso, a aplicação associada entre o nó W(0) e ao nó sem fio N66 é o CBR. Os agentes de recepção servem para receber os pacotes enviados pelos protocolos de transporte.

O agente *Null* recebe os pacotes do protocolo UDP e os anula. A vantagem para aplicações usarem o UDP é que a transmissão de dados torna-se mais rápida, acelerando o

envio de pacotes, já que o transmissor não precisa esperar receber uma mensagem do receptor para enviar o próximo pacote. Um dos usos mais conhecidos do protocolo UDP é a transmissão de informações em tempo real.

Simulação da aplicação TCP: um agente TCP anexado ao nó W(0) e outro agente de recepção (*Sink*) vinculado ao nó sem fio N65. Além disso, a aplicação associada entre o nó W(0) e o nó sem fio N65 é o FTP. O agente *Sink* recebe os pacotes do protocolo TCP e gera os pacotes de reconhecimento ACKs.

A vantagem do TCP para aplicações é a versatilidade e robustez deste protocolo, tornando-o adequado a redes globais, já que este verifica se os dados são enviados de forma correta, na sequência apropriada e sem erros pela rede, garantindo a transmissão de pacotes. Um dos usos mais conhecidos do protocolo TCP é nas aplicações cibernéticas, como o SSH (*Secure Shell*), FTP (*File Transfer Protocol*), HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*), entre outros.

Simulação da aplicação DNP3: um agente TCP/SimpleTcp anexado aos nós sem fio (N62, N63 e N64) e outro agente de recepção TCP/SimpleTcp também vinculado ao nó W(0). A aplicação associada entre os nós sem fio (N62, N63 e N64) e o nó cabeado W(0) é o TcpAppmod, além disso, são anexados ao nó W(0) o DNP3mater e nós sem fio (N62, N63 e N64) os respectivos DNP3client.

O DNP3master recebe os pacotes do protocolo DNP3 e após a confirmação de recebimento o TcpAppmod gera os pacotes de reconhecimento DNP3 com o tamanho de 40 bytes. A vantagem deste *patch* com o TcpAppmod para aplicações é a versatilidade e segurança, tornando-o adequado a redes globais, já que este verifica se os dados são enviados de forma correta e na sequência apropriada com um tempo especificado para recebimentos dos pacotes de confirmação.

Na Figura 55 apresenta-se a comparação da estatística média de *throughput* (medida a cada 1 s) dos pacotes transmitidos do nó cabeado W(0) até AP. Estas, por sua vez, fazem o roteamento dos pacotes até o N66 no caso do CBR e, até o N65 no uso do TCP. A simulação para ambos iniciou-se no instante 2 s com término em 210 s.

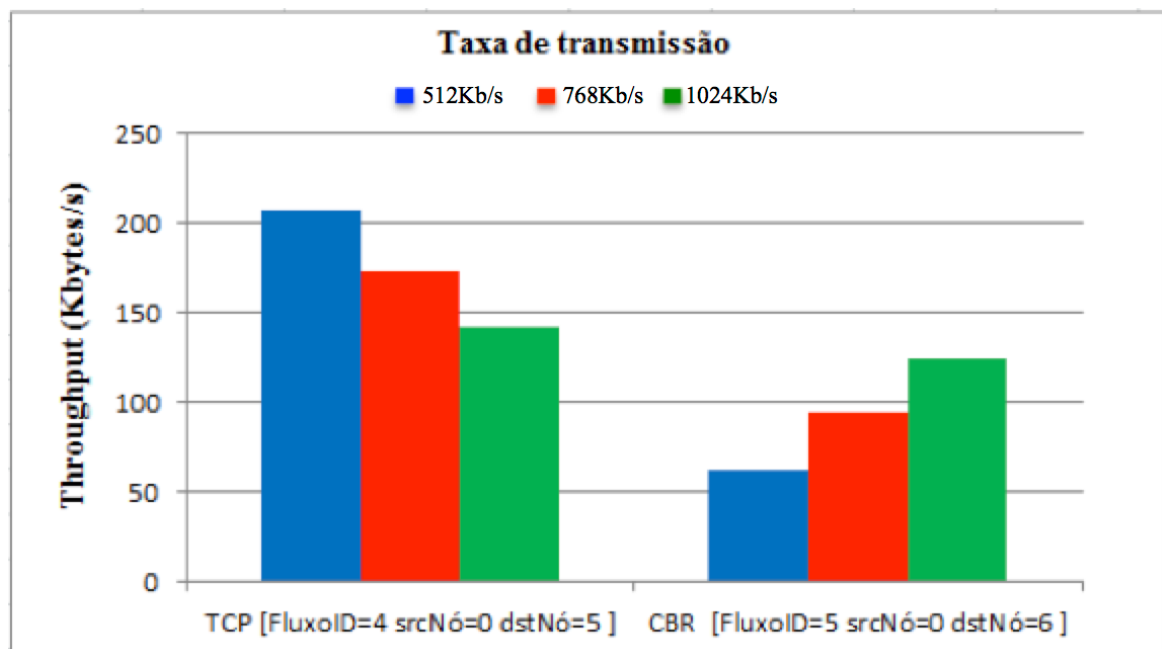
No gráfico apresenta-se o resultado de três simulações, em cada simulação foi alterada somente a taxa de transferência. Na primeira simulação, identificada pela barra azul no gráfico, teve-se uma taxa de transferência de 512 Kb/s para os ambos os pacotes, totalizando 1.024 Kb/s. Nota-se que a vazão média do tráfego TCP foi maior, alcançando a média de 210 Kbytes/s, já o tráfego CBR ficou em média 60 Kbytes/s e não houve descarte de pacotes.

Na segunda simulação identificada pela barra vermelha, à taxa de transmissão foi de 768 Kb/s, totalizando uma taxa de transferência de 1536 Kb/s, percebe-se que a média de vazão do tráfego TCP ficou em 175 *Kbytes/s* e o CBR em 95 *Kbytes/s*.

Na última simulação identificada pela barra verde, à taxa de transferência foi de 1.024 Kb/s totalizando 2.048 Kb/s de taxa de transferência na rede cabeada. Nota-se que a vazão média do tráfego TCP diminui para 145 *Kbytes/s* e o tráfego do CBR aumentou para 125 *Kbytes/s*.

Os resultados mostraram que a utilização do protocolo de transporte TCP quanto o UDP com o protocolo de roteamento DSDV conduziram os pacotes com uma vazão média e instantânea, percebe-se também que quando aumenta a taxa de transmissão, o TCP diminui a taxa de vazão enquanto que no UDP aumenta a taxa de vazão com o aumento da taxa de transmissão. Este fato ocorreu devido ao protocolo de transporte TCP ter o controle da janela de contenção de tráfego para o controle do congestionamento.

Figura 55 - Estatística média de vazão dos pacotes transmitidos do nó *wired* W(0) até os nós *wireless*.

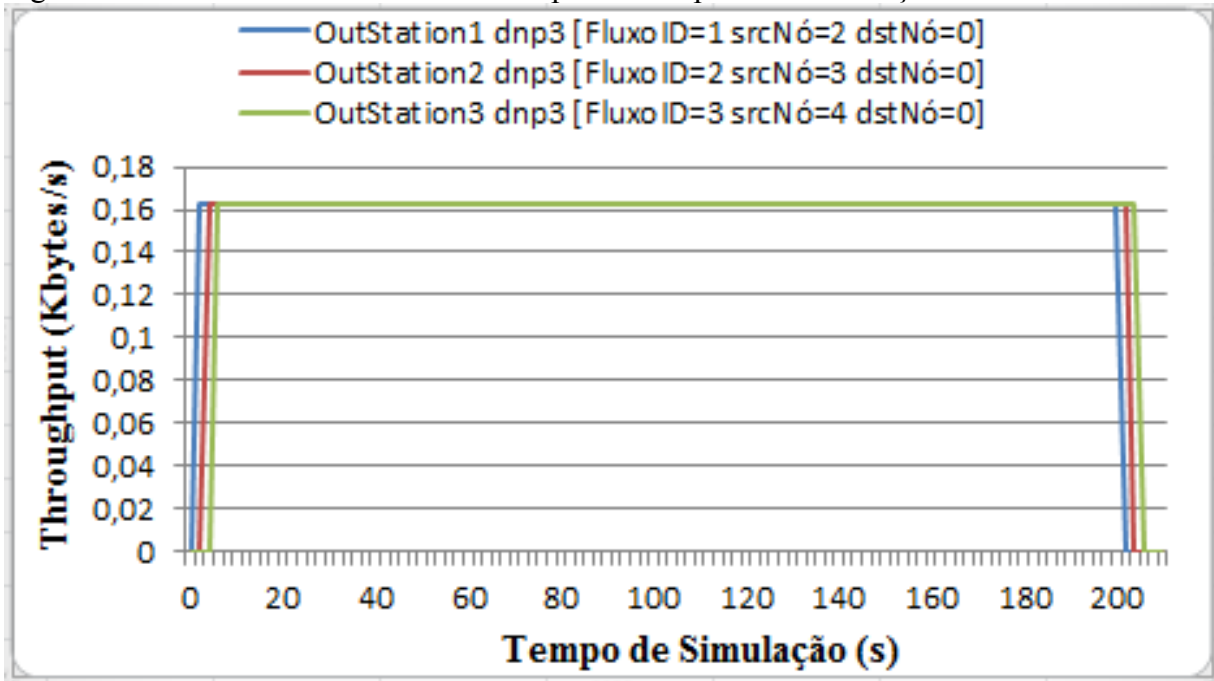


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 56 mostra-se a vazão dos pacotes transmitidos da *Outstation1*(Nó2) para a *Master* (curva azul), do *Outstation2*(Nó3) à *Master* (curva vermelha) e do *Outstation3*(Nó4) à *Master* (curva verde). Com os parâmetros da topologia, o início da geração de tráfego iniciou-se em 2 s na *Outstation1*, em 3 s na *Outstation2* e em 4 s na *Outstation3*, tráfego DNP3

gerado a cada 2 s e tamanho de 292 bytes mais 40 bytes de cabeçalho do TCP/IP totalizando 332 bytes, a vazão média esperada está em torno de 166 *bytes/s* (0,162 *Kbytes/s*). Conforme o resultado da Figura 56. A taxa de transferência ocupada pelos outros tráfegos na rede cabeada é de 1.024 Kb/s. Foram gerados 100 pacotes em cada *Outstation*, o *Master* recebeu no total 300 pacotes e a vazão é estável do início ao fim da simulação.

Figura 56 - Estatísticas média de vazão de pacotes da primeira simulação do cenário 3.

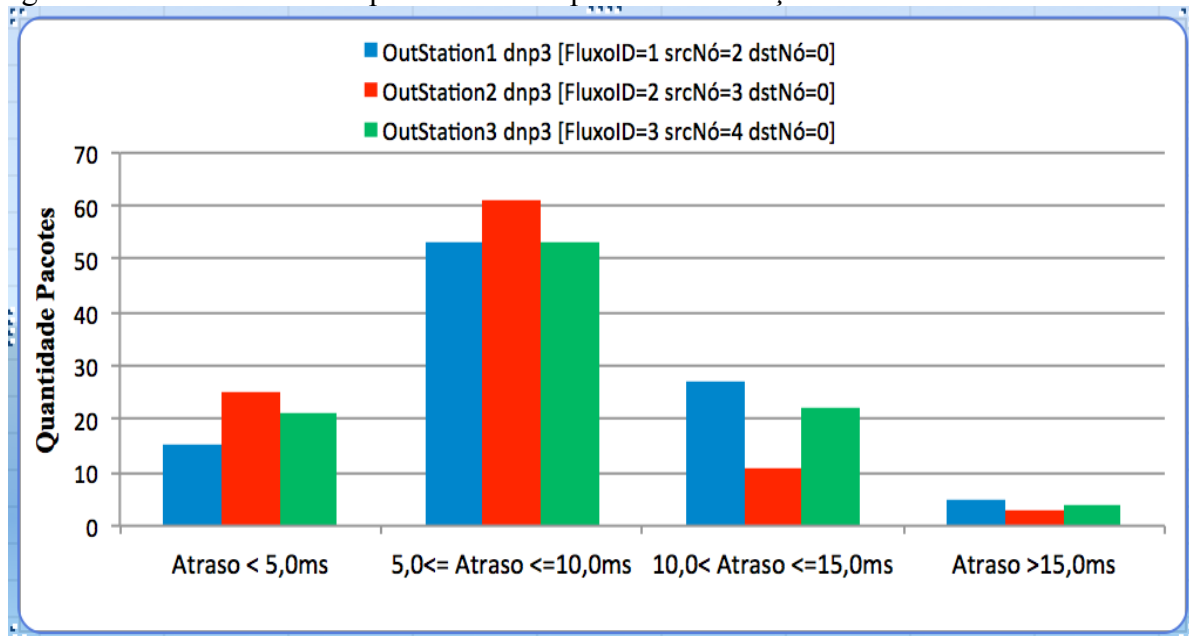


Fonte: Próprio autor.

A Figura 57 ilustra o atraso na entrega do tráfego DNP3 das *Outstation's* para a estação *Master*. A distância entre a *Outstation1*(Nó2), *Outstation3*(Nó4) e o *access point* é cerca de aproximadamente de 22,37 m e entre a *Outstation2*(Nó3) e o *access point* é 20 m. Já o AP está localizado a uma distância de 22 m da estação *Master*.

Como a *Outstation2* está mais próxima do *access point* do que as outras *Outstation's* a tendência é que os pacotes enviados pela *Outstation2* tenham um atraso menor do que as outras *Outstation's*.

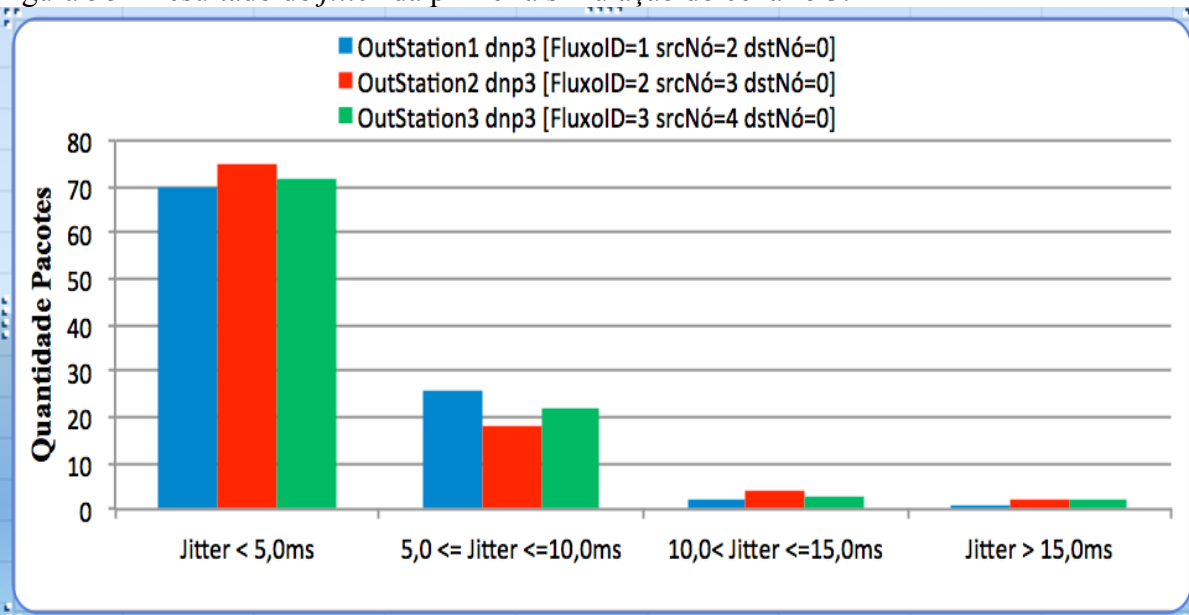
Figura 57 - Resultado do tempo de atraso da primeira simulação do cenário 3.



Fonte: Próprio autor.

No histograma da Figura 57 mostra-se claramente esse perfil, uma quantidade maior de pacotes com atrasos menores do que 5 ms e no intervalo de 5 a 10 ms pela estação *Outstation2* em relação às outras estações *Outstation's* e a inversão dessa característica no caso do atraso maior que 10 ms. Na Figura 58 mostra-se o histograma do *jitter* e a análise é análoga ao tempo de atraso.

Figura 58 - Resultado do *jitter* da primeira simulação do cenário 3.



Fonte: Próprio autor.

A vazão dos pacotes transmitidos da segunda simulação do cenário3, a análise é análoga a vazão de pacotes da Figura 56. Onde a vazão de pacotes da estação *Outstation1*

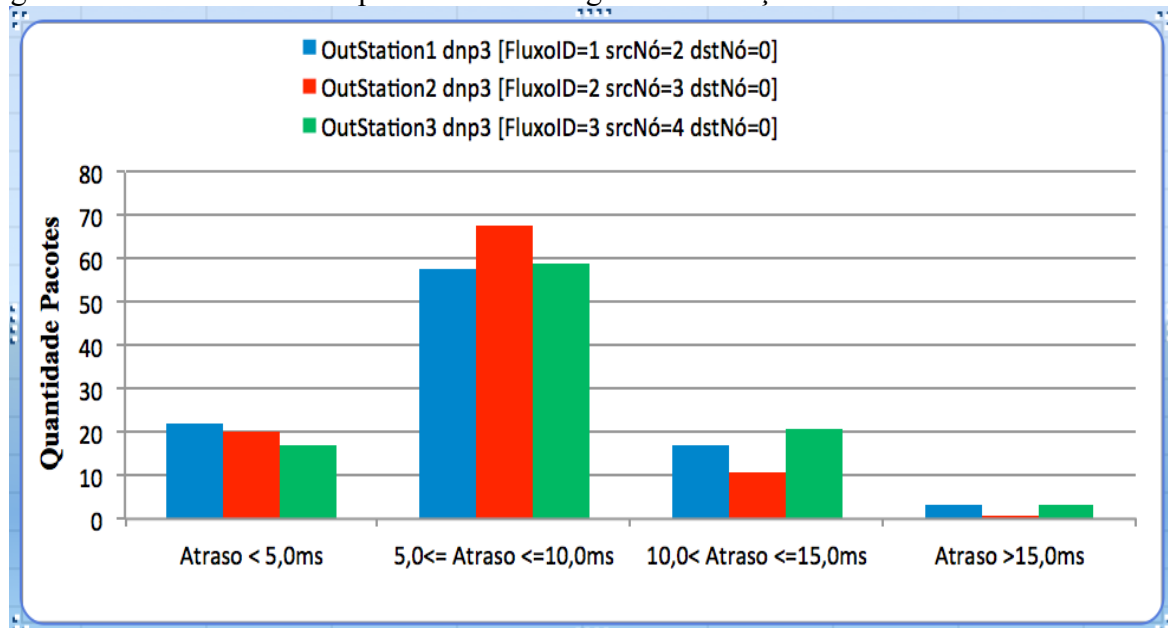
para a estação *Master* (curva azul) e da estação *Outstation2* à estação *Master* (curva vermelha) e da estação *Outstation3* à estação *Master* (curva verde).

O resultado mostra uma vazão de pacotes bem próxima do teórico, aceitável em função de outros processos levados em consideração no simulador.

A taxa de transferência ocupada pelos outros tráfegos na rede cabeada é de 1536 Kb/s. Foram gerados 100 pacotes em cada *Outstation*, a estação *Master* recebeu no total 300 pacotes, a vazão é estável do início ao fim da simulação.

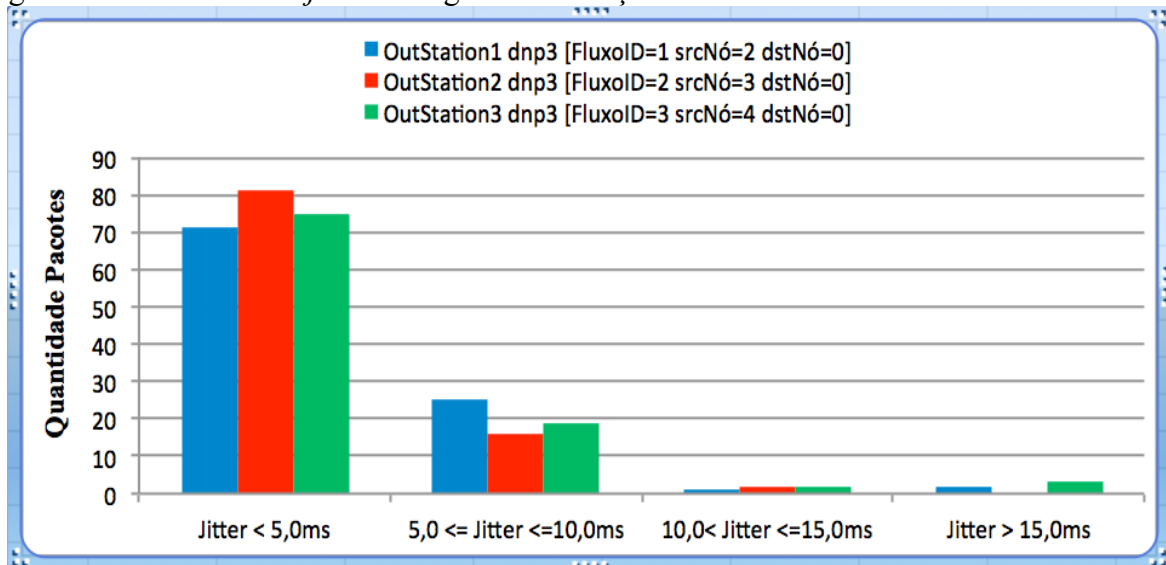
Na Figura 59 mostra-se o histograma do atraso da segunda simulação e a análise é análoga ao atraso da Figura 57. Com os resultados aumentando o tempo de atraso entre 5 e 10 ms. Na Figura 60 mostra-se o histograma do *jitter* e a análise é análoga ao *jitter* da Figura 58.

Figura 59 - Resultado do tempo de atraso da segunda simulação do cenário 3.



Fonte: Próprio autor.

Figura 60 - Resultado do *jitter* da segunda simulação do cenário 3.



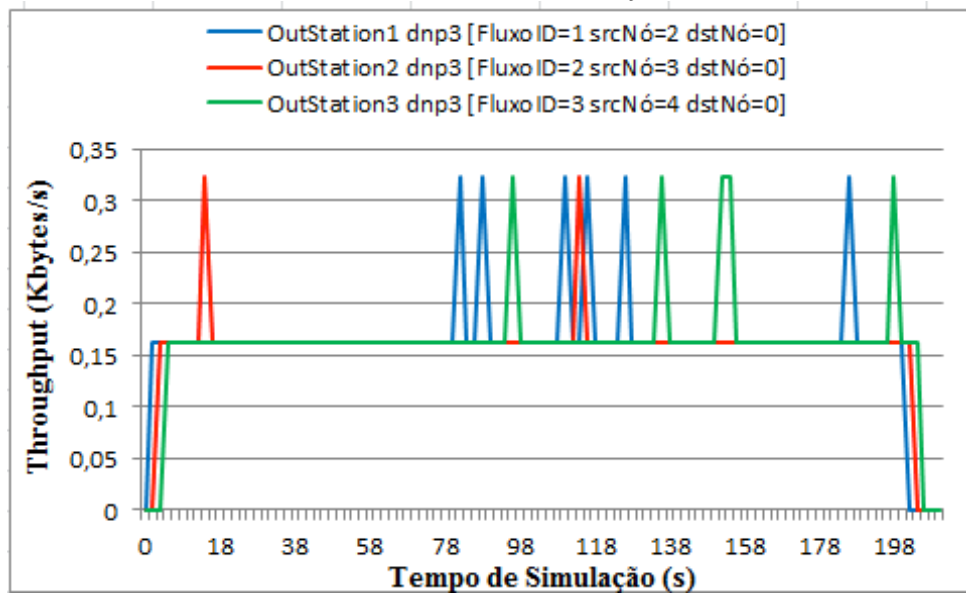
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 61 mostra-se a vazão dos pacotes transmitidos da estação *Outstation1* para a estação *Master* (curva azul), da estação *Outstation2* à estação *Master* (curva vermelha) e da estação *Outstation3* à estação *Master* (curva verde).

Com os parâmetros da topologia, a análise é análoga a vazão de pacotes da Figura 56. O resultado mostra uma vazão de pacote bem próxima do teórico, porém é possível visualizar que a estação *Outstation1* teve seis pacotes retransmitidos, enquanto que a estação *Outstation2* teve somente dois pacotes retransmitidos e a estação *Outstation3* teve quatro pacotes retransmitidos.

Mesmo com essa perda de pacotes isso é aceitável, pois houve pouco *timeout* devido a congestionamento do canal de comunicação. A taxa de transferência ocupada pelos outros tráfegos na rede cabeada é de 2.048 Kb/s.

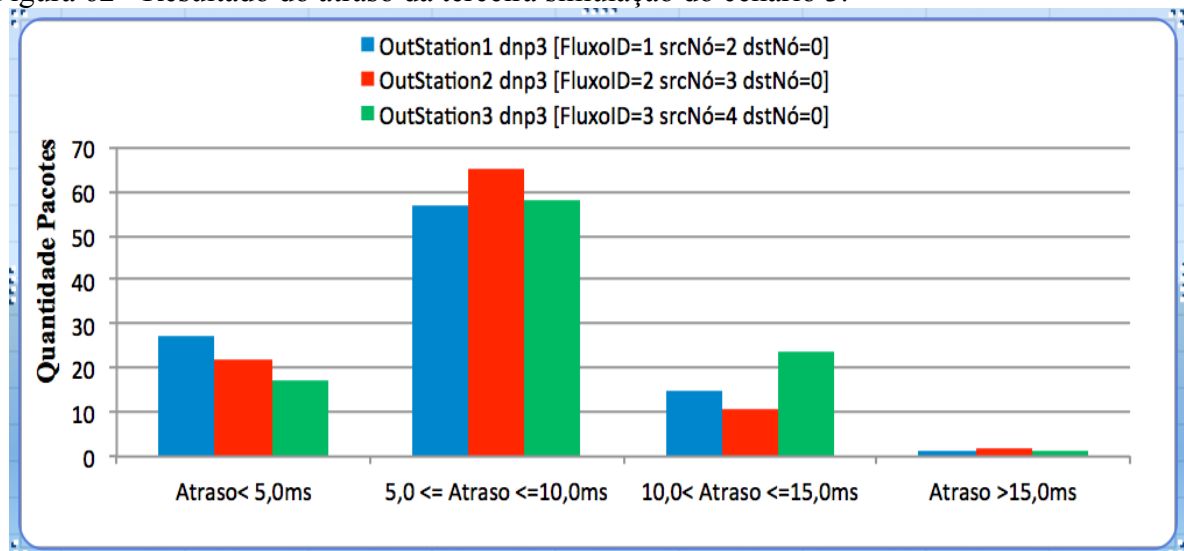
Figura 61 - Estatísticas média de vazão da terceira simulação do cenário 3.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 62 mostra-se o histograma do atraso da terceira simulação e a análise é análoga ao atraso da Figura 59. Com os resultados aumentando o tempo de atraso entre 5 e 10 ms.

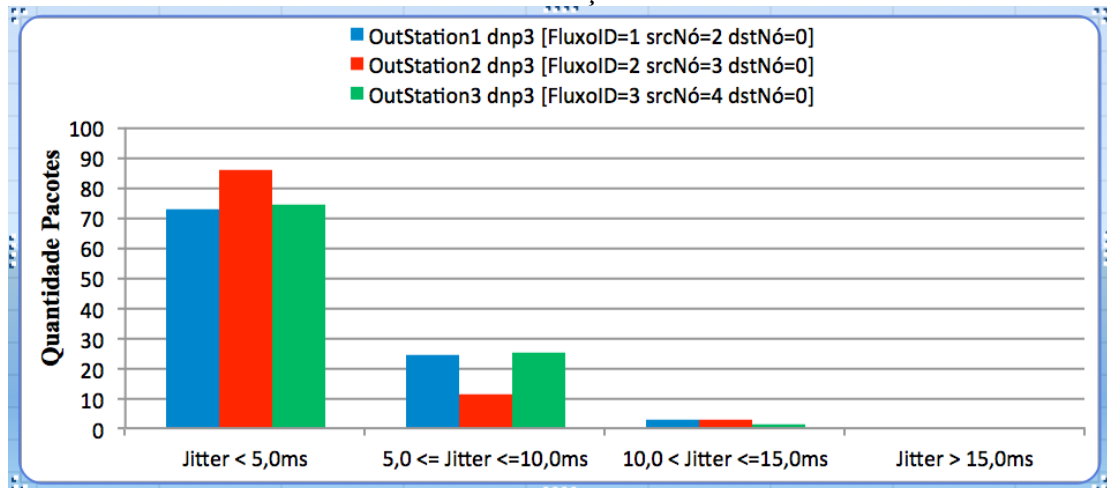
Figura 62 - Resultado do atraso da terceira simulação do cenário 3.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 63 mostra-se o histograma do *jitter* e a análise é análoga ao *jitter* da Figura 60.

Figura 63 - Resultado do *Jitter* da terceira simulação do cenário 3.



Fonte: Próprio autor.

6.2.4 Simulação do cenário 4 com topologia multi-ponto em uma rede IEEE 802.11b ad-hoc em aplicações smart meter

Foi avaliado um cenário de pequeno porte em aplicações *smart grid* com topologia hierárquica multiponto em uma rede WLAN 802.11b *ad-hoc*.

Ad-hoc são redes sem fio que não utilizam um AP para fazer o controle centralizado. Uma das vantagens da *ad-hoc* é a mobilidade e a conexão através de *multi-hop*, onde pode-se conectar a um dispositivo distante utilizando outros dispositivos que estão no meio do percurso. São redes móveis também conhecidas como MANET (*Mobile ad-hoc Network*), onde os dispositivos trocam informações de roteamento entre si.

A norma IEEE 802.11 em modo *ad-hoc* utiliza o método DCF (*Distributed Coordination Function*) de acesso ao meio, que é um método do tipo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Desta forma é realizada a detecção de portadora onde o DCF utiliza um canal de acesso múltiplo.

Nas redes *wireless* 802.11 todas as transmissões são confirmadas através de quadros de reconhecimento ACK (*Acknowledgment*), na ausência de recebimento deste quando implica na ocorrência de uma colisão.

Para evitar colisões o esquema funciona de forma estatística, todo nó que deseja transmitir deve aguardar um intervalo de tempo determinado; após esse período, o emissor deve sortear uma janela de contenção (CW), e esperá-la antes de iniciar uma transmissão (JENHUI, SHIANN-TSONG; CHIN-AN, 2003).

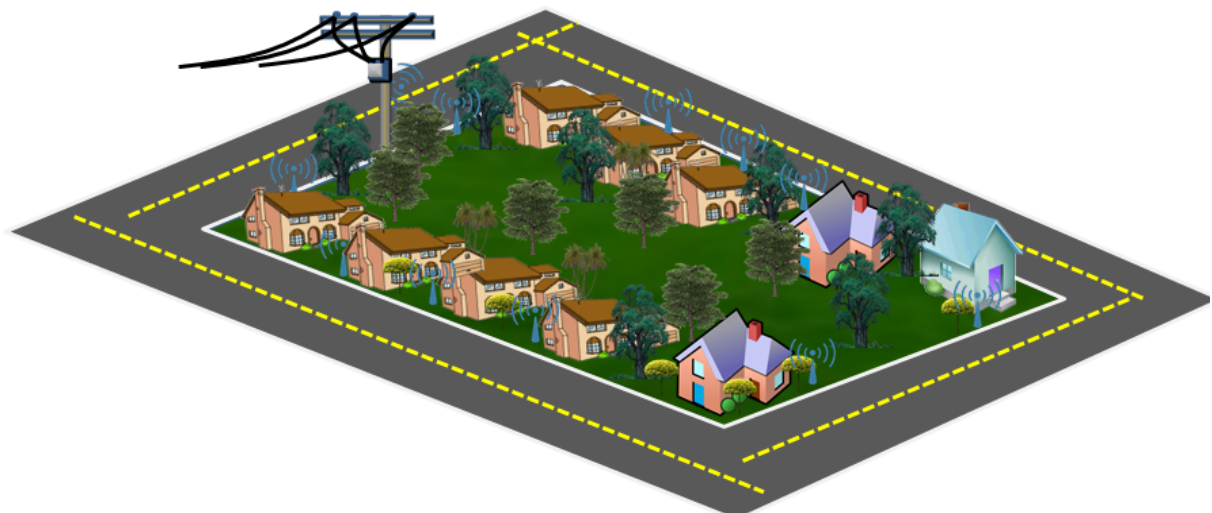
Para minimizar as taxas de erros, melhorar as taxas de entrega de dados, eficiência do consumo de energia dos nós móveis, o sistema *ad-hoc* é provido de diversos protocolos de roteamento. Os protocolos de roteamento do *ad-hoc* são divididos em dois grupos, reativos e pró-reativos. O protocolo de roteamento mais utilizado é o AODV (*Ad-hoc On-Demand Distance Vector*), que tem como base o DSDV, que utiliza o procedimento de descoberta de rotas baseado na origem.

Quando um nó deseja transmitir informações para algum destino o qual ele não conheça uma rota válida, inicia-se um processo de descoberta de rota. O nó fonte envia então para seus vizinhos um pacote de RREQ (*Route Request*), estes por sua vez encaminham para seus vizinhos e assim sucessivamente até que se alcance o nó destino, ou algum nó que contenha uma rota mais recente ao nó destino (LU et al., 2011).

O cenário de simulação do protocolo DNP3, utilizando a arquitetura multiponto, empregou a função de envio de mensagens não solicitadas. Na Figura 64, ilustra-se um exemplo de uma quadra de um bairro com dez imóveis residenciais com medidores inteligentes ligados a rede inteligente de energia elétrica. A comunicação dos medidores inteligentes é feita através de uma rede sem fio *ad-hoc*.

A topologia da rede é composta por dez estações Remotas e uma estação *Submaster*. A comunicação entre os nós é ponto-a-ponto se estiver dentro do alcance, caso contrário a comunicação é realizada através de roteamento por outros nós intermediários pela retransmissão dos pacotes até o nó destino.

Figura 64 - Cenário de uma quadra de um bairro com *smart meters*.



Fonte: Próprio autor.

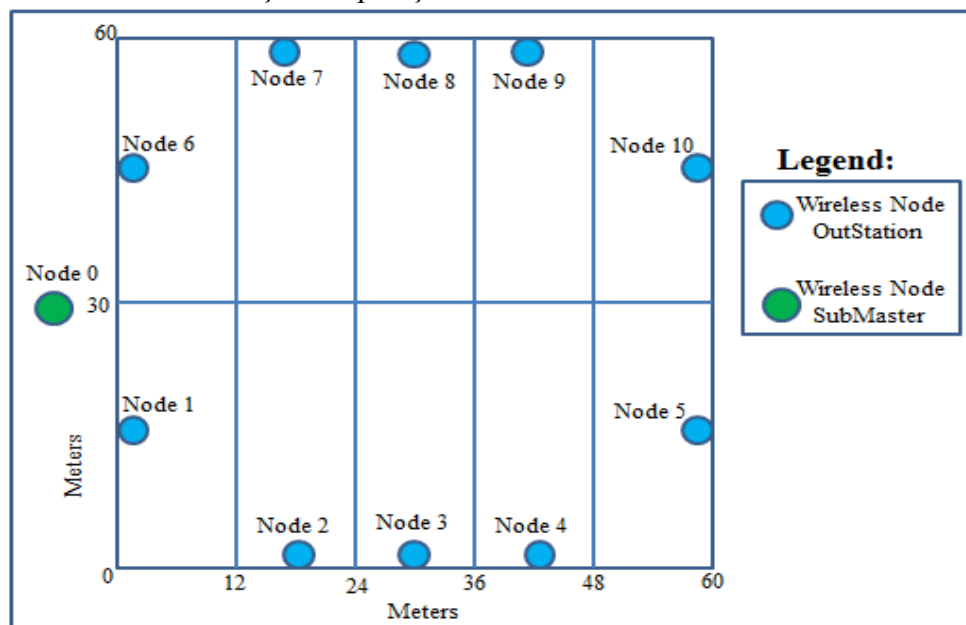
A Tabela 10 apresenta os valores dos parâmetros que são diferentes da Tabela 8 do modelo da rede considerada na simulação de transmissão de mensagens não solicitadas com tamanho de pacotes de 292 *bytes*, incluindo os 250 *bytes* de dados e mais 32 *bytes* de CRC e mais 10 *bytes* de cabeçalho. A Figura 65 mostra-se a disposição dos nós.

Tabela 10. Parâmetros da rede *ad-hoc* modelada do cenário 4.

Parâmetro	Valor
Número de nós sem fio	11
Protocolo de roteamento	AODV
Área de cobertura (XxY)	60 m x 60 m
Frequência	2,4 Ghz
Taxa de transmissão	11 Mb
Tamanho dos pacotes	292 bytes
Tipo de aplicação	DNP3
Evento	Mensagens não solicitados

Fonte: Próprio autor.

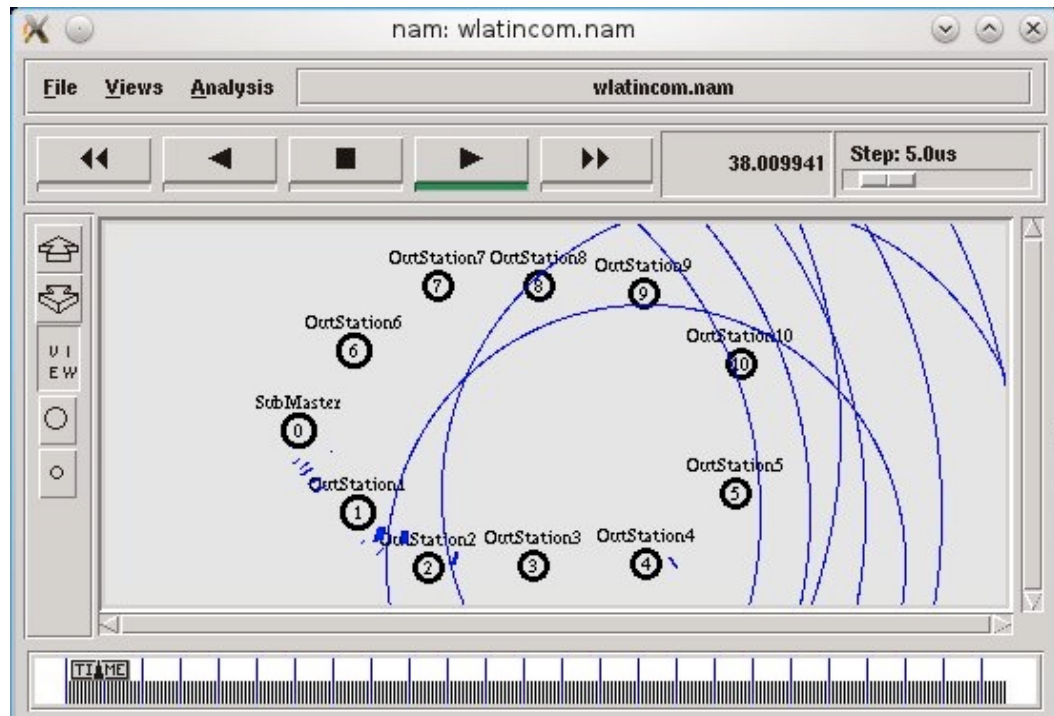
Figura 65 - A área da simulação e a posição de cada nó.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 66 mostra-se o trecho da simulação pelo NAM. Nessa ilustração é possível visualizar que nem todos os nós estão dentro do alcance e o tráfego na rede é encaminhado através de saltos em nós vizinhos até alcançar o nó destino.

Figura 66 - Estações *Outstation* enviando pacotes para a estação *Submaster*.



Fonte: Próprio autor.

O tempo de simulação foi de 2004 s, o início da transmissão dos pacotes do DNP3 ocorreu no instante 2 s, na Tabela 11 pode ser observado o início da transmissão dos *Outstations* para a estação *Submaster*, o envio do pacote do DNP3 é constante com intervalos de 2 s em cada *Outstation*, já a estação *Submaster* recebe as informações num intervalo de 1 s.

Tabela 11. Início da transmissão dos pacotes DNP3 do cenário 4.

<i>Outstation</i>	Início da transmissão
1	2 s
2	2 s
3	2 s
4	2 s
5	2 s
6	3 s
7	3 s
8	3 s
9	3 s
10	3 s

Fonte: Próprio autor.

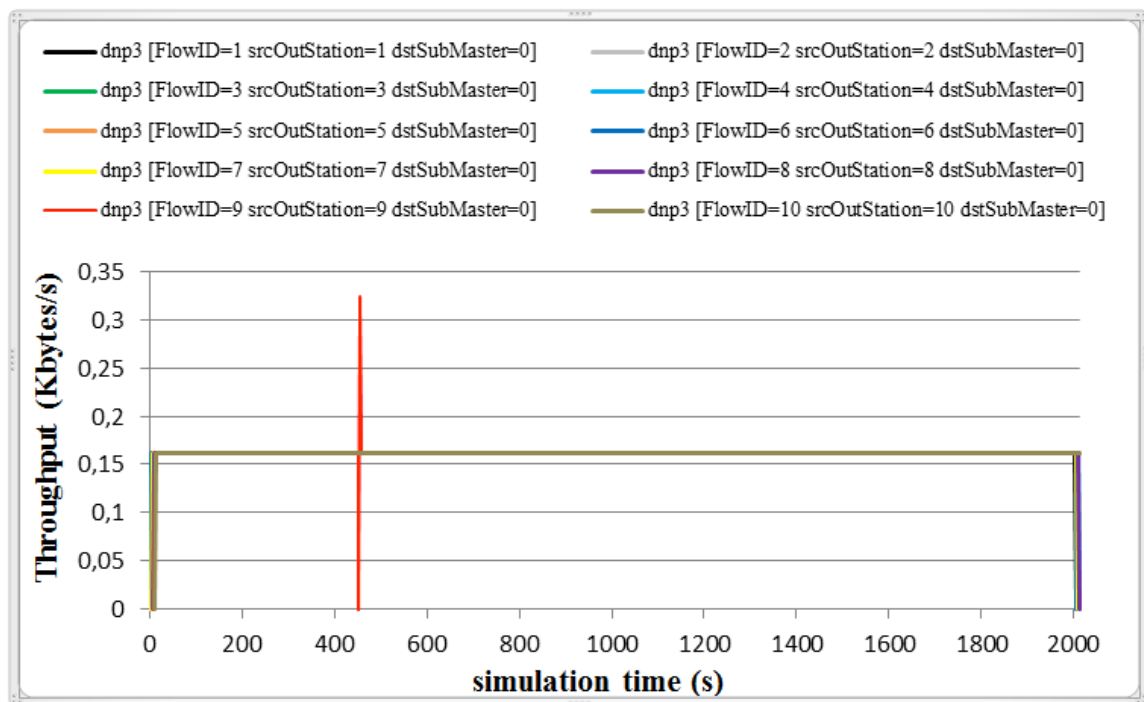
A configuração é um cenário simples que conta com uma estação *Submaster* definida no *node0* e dez estações *Outstation* definidas nos *node1* ao *node10*. Nesta simulação a comunicação de dados é na camada de aplicação.

Na Figura 67 mostra-se a vazão dos pacotes transmitidos das *Outstation1* à *Outstation10* para o *Submaster*. Com os parâmetros da topologia, o tráfego DNP3 é gerado a cada 2 s com tamanho de 292 bytes mais 40 bytes de cabeçalho do protocolo TCP/IP, totalizando 332 bytes por pacotes transmitidos. A vazão média esperada está em torno de 166 bytes/s (0,162 Kbytes/s).

O resultado mostra uma vazão bem próxima da teórica, nota-se também que somente a estação *Outstation9* (curva vermelha), teve a vazão zero no instante 451 s e logo em 453 s a vazão de 0,332 Kbytes/s mantendo-se constante até o final da simulação em 0,16 Kbytes/s.

A alteração da vazão de pacotes da estação *Outstation9* neste intervalo de tempo ocorreu pelo fato do pacote enviado não chegar ao seu destino, e encerrado o tempo de confirmação a estação torna a enviar o pacote perdido e mais outro pacote, com isso no tempo de 453 s foi enviado 2 pacotes de 332 bytes.

Figura 67 - Estatísticas média de vazão da dez *Outstation*'s do cenário 4.

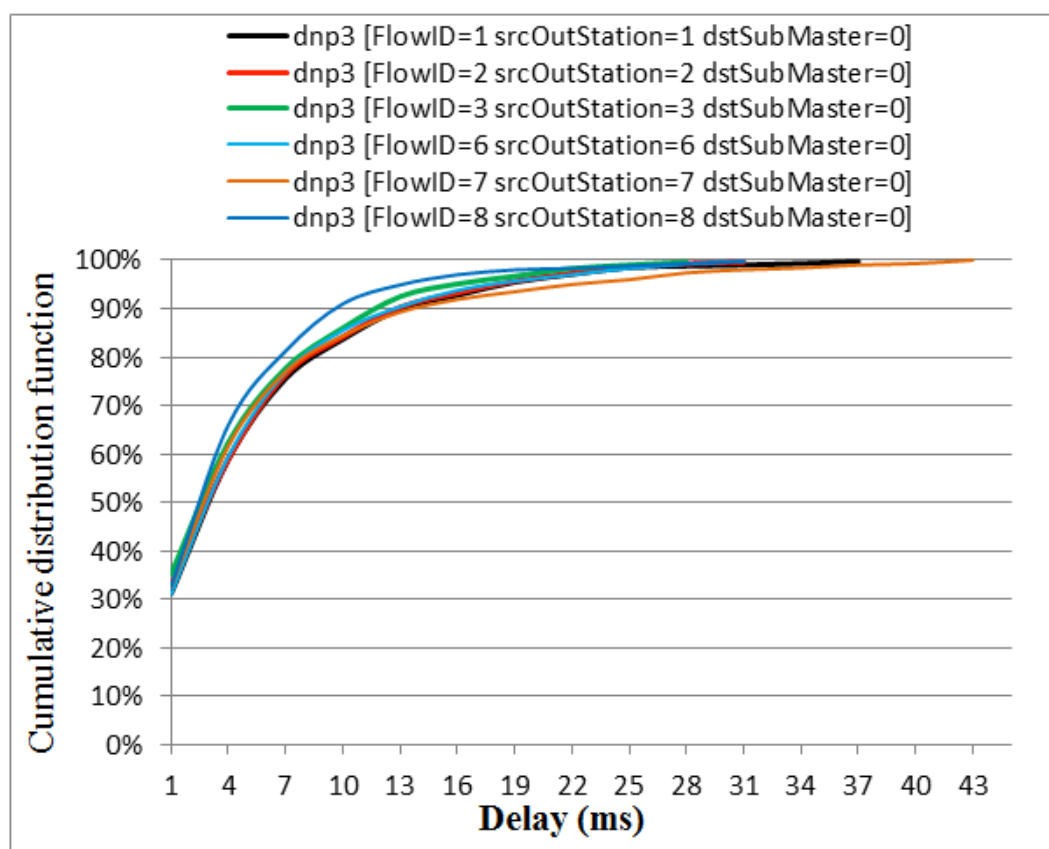


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 68, ilustra-se o atraso na entrega do tráfego DNP3 das estações *Outstation's* para a *Submaster* com até um salto. A distância entre as *Outstation's* e a *Submaster* está ilustrada na Figura 65 e Figura 66 a maior distância está entre a *Outstation8* e a *Submaster* por volta de 45 m, já as mais próximas da *Submaster* estão as *Outstation1* e *Outstation6*, em torno de 15 m.

Os resultados obtidos através da função de distribuição cumulativa (CDF) numa amostra de 1.000 pacotes, demonstra através das curvas que a tendência é que os pacotes enviados pelas *Outstation's* mais próximas da *Submaster* tenham um menor tempo de atraso, em geral 90% dos pacotes enviados possui um atraso menor ou igual do que 13 ms.

Figura 68 – Atraso das *Outstation's* com até um salto.

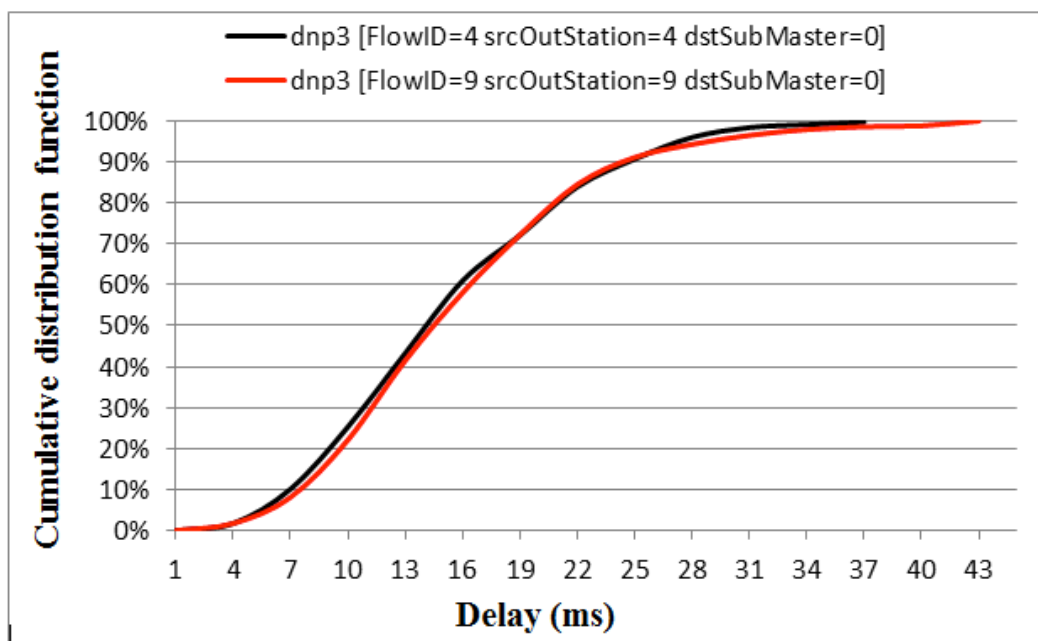


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 69, ilustra-se o atraso do tráfego dos *Outstation* com dois saltos, a análise é análoga ao atraso das *Outstation* com até um salto, pelo gráfico, 90% dos pacotes enviados com dois saltos possui um atraso menor ou igual a 25 ms.

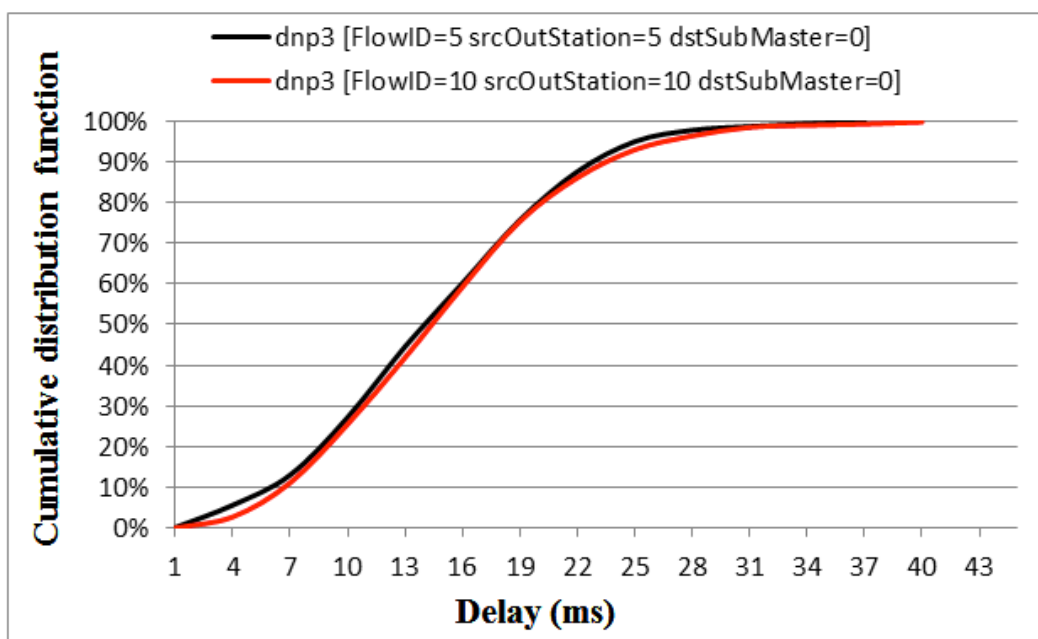
Na Figura 70 mostra-se o atraso de entrega do tráfego do DNP3 das estações *Outstation's* para a *Submaster* com até três saltos, a CDF é similar à obtida com até dois saltos.

Figura 69 – Atraso dos *Outstation's* com até dois saltos.



Fonte: Autoria própria.

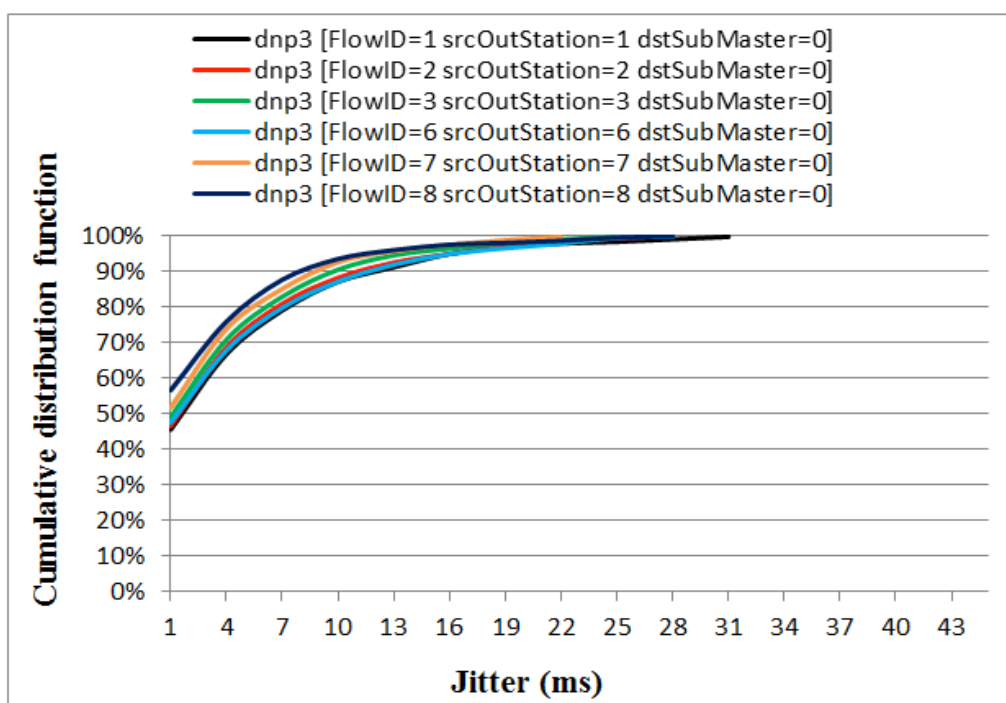
Figura 70 – Atraso das *Outstation's* com até três saltos.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 71, ilustra-se o *jitter* na entrega do tráfego de pacotes DNP3 das *Outstation's* para a *Submaster* com um salto. Os resultados obtidos através da CDF numa amostra de 1.000 pacotes, demonstra através das curvas que a tendência é que os pacotes enviados pelos *Outstation's* mais próximas da *Submaster* tenham um menor tempo de *jitter*. Em geral 90% dos pacotes enviados possui um *jitter* menor ou igual a 10 ms.

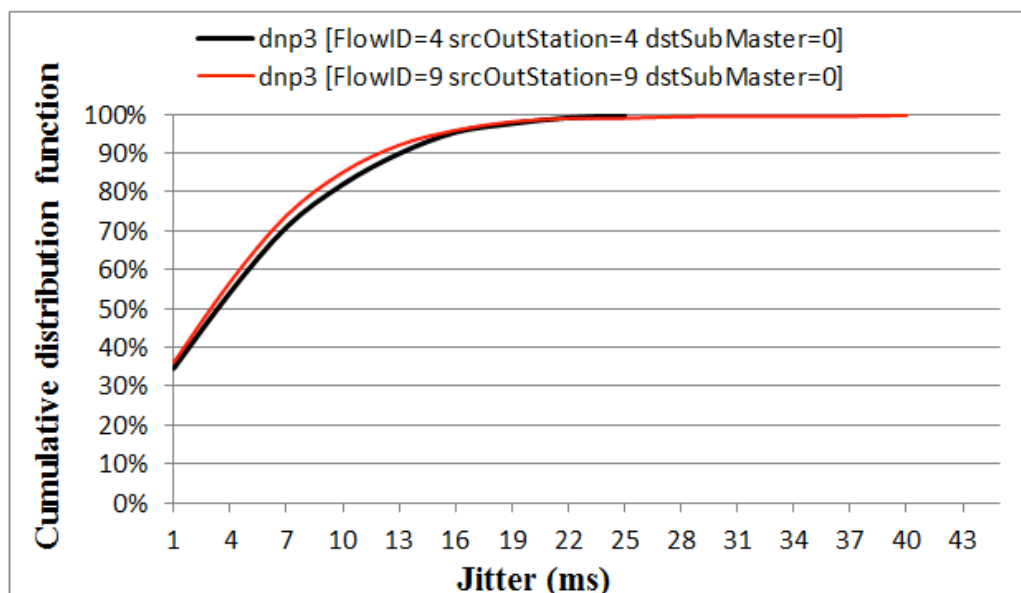
Figura 71 - *Jitter* das *Outstation* com até um salto.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 72, ilustra o *jitter* na entrega do tráfego de pacotes DNP3 das *Outstation's* para a *Submaster* com até dois saltos, a análise é análoga ao *jitter* das *Outstation's* com até um salto. Pelo gráfico, 90% dos pacotes transmitidos com dois saltos possui um *jitter* menor ou igual a 13 ms.

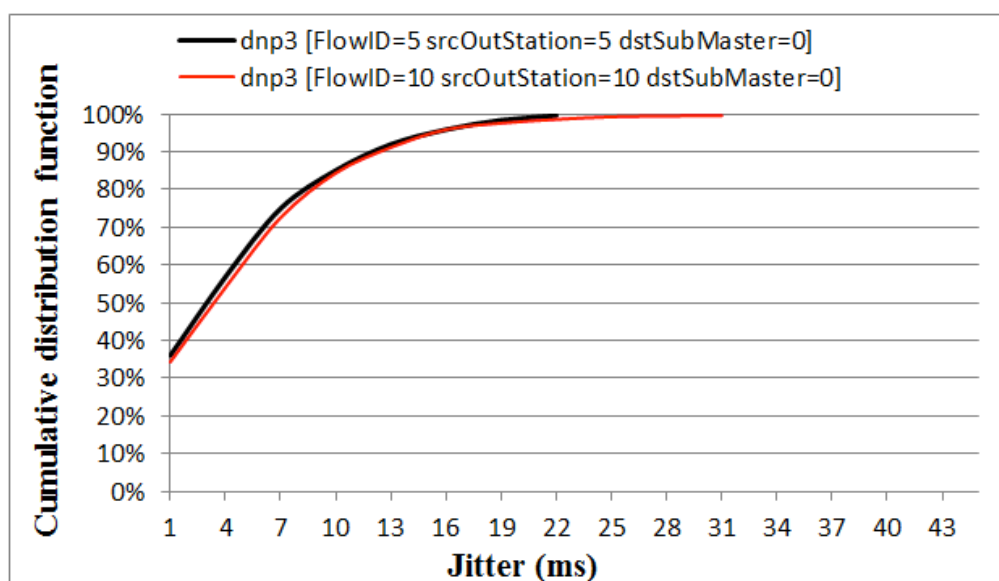
Figura 72 - *Jitter* das *Outstation* com até dois saltos.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 73 mostra-se o *jitter* na entrega do tráfego de pacotes DNP3 das *Outstation's* para a *Submaster* com até três saltos, o resultado da CDF é similar ao obtido com até dois saltos.

Figura 73 - *Jitter* dos *Outstation* com até três saltos.



Fonte: Próprio autor.

6.2.5 Simulação do cenário 5 com topologia multi-ponto em uma rede IEEE 802.11b ad-hoc em aplicações smart grid

Foi analisado um cenário com topologia hierárquica multi-ponto em uma rede WLAN 802.11b *ad-hoc* avaliando a possibilidade em aplicações *smart grid*. O cenário de simulação do protocolo DNP3 empregou a função de envio de mensagens não solicitadas, enviadas pelas estações Remotas para a estação *Master*.

A topologia da rede é composta por dez estações Remotas e uma estação *Master*. A comunicação entre os nós é ponto-a-ponto se estiver dentro do alcance, caso contrário a comunicação é realizado através de roteamento por outros nós intermediários pela retransmissão dos pacotes até o nó destino.

A Tabela 12 apresenta os principais parâmetros com valores diferentes da Tabela 8 do modelo da rede considerada na simulação de transmissão de mensagens não solicitadas com tamanho de pacotes de 292 bytes, incluindo os 250 bytes de dados e mais 32 bytes de CRC e mais 10 bytes de cabeçalho.

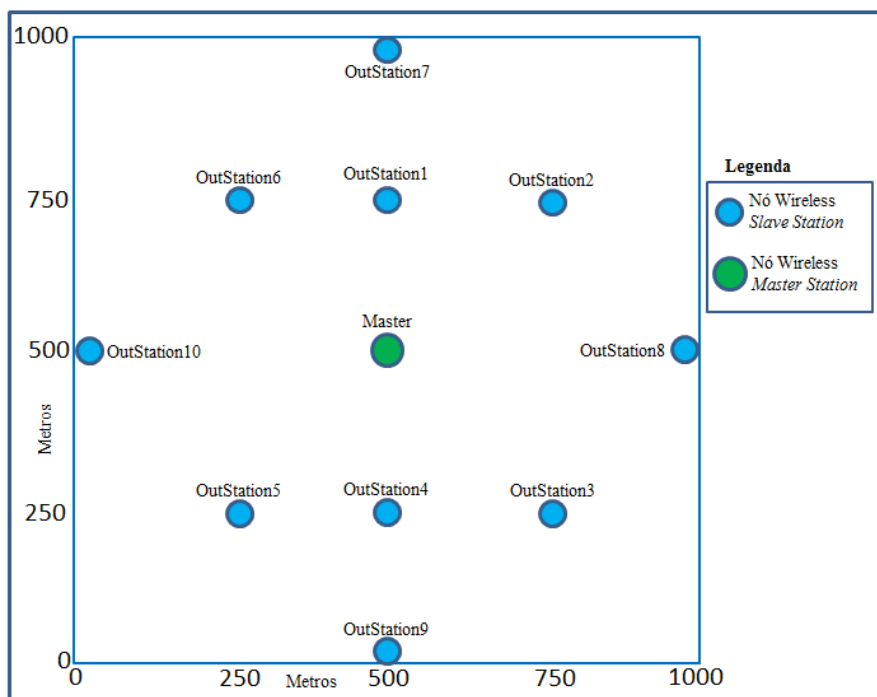
Tabela 12. Parâmetros da rede modelada do cenário 5.

Parâmetro	Valor
Número de nós sem fio	11
Protocolo de roteamento	AODV
Área de cobertura (XxY)	1.000 m x 1.000 m
Frequência	2.4 Ghz
Taxa de transmissão	11 Mb
Tamanho dos pacotes	292 bytes
Tipo de aplicação	DNP3
Evento	Mensagens não solicitados

Fonte: Próprio autor.

A Figura 74 apresenta a localização dos nós dentro do cenário simulado. Os *Outstation's* que estão mais próximas da estação *Master* cinturão 1 (tier 1) são os *Outstation's* (1 e 4) com 250 m de distância, já os *Outstation's* com distâncias intermediárias tier 2 são os *Outstation's* (2, 3, 5 e 6), e o tier 3 com os *Outstation's* (7, 8, 9 e 10) mais distantes.

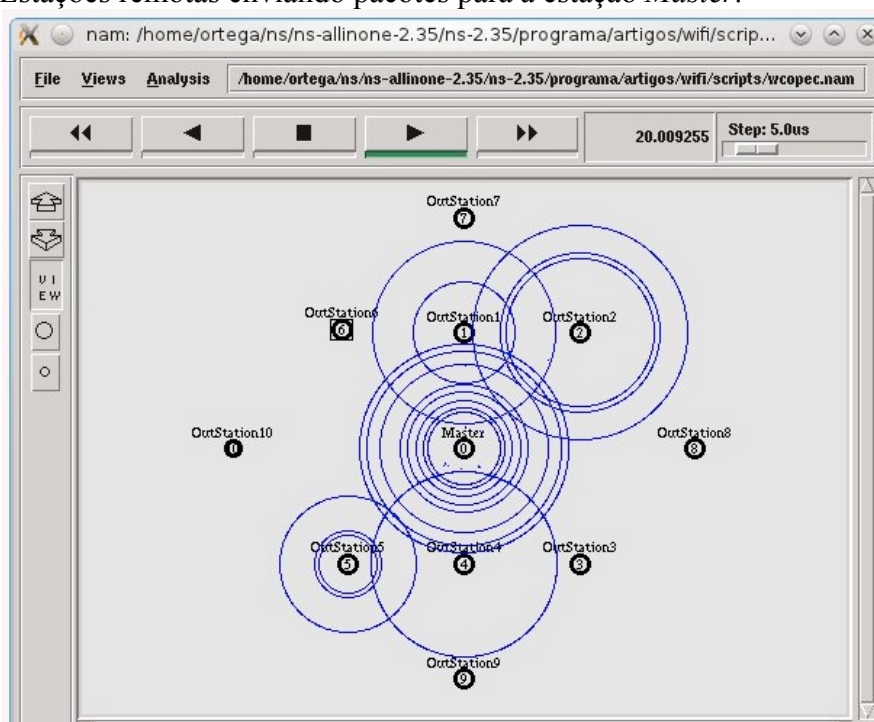
Figura 74 – A área da simulação e a localização de cada nó.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 75 mostra-se trecho da simulação pelo NAM, nessa ilustração é possível visualizar o tráfego dos *Outstation's* que estão no tier 1 e tier 2, todos esses nós estão dentro do alcance de comunicação com a estação *Master*.

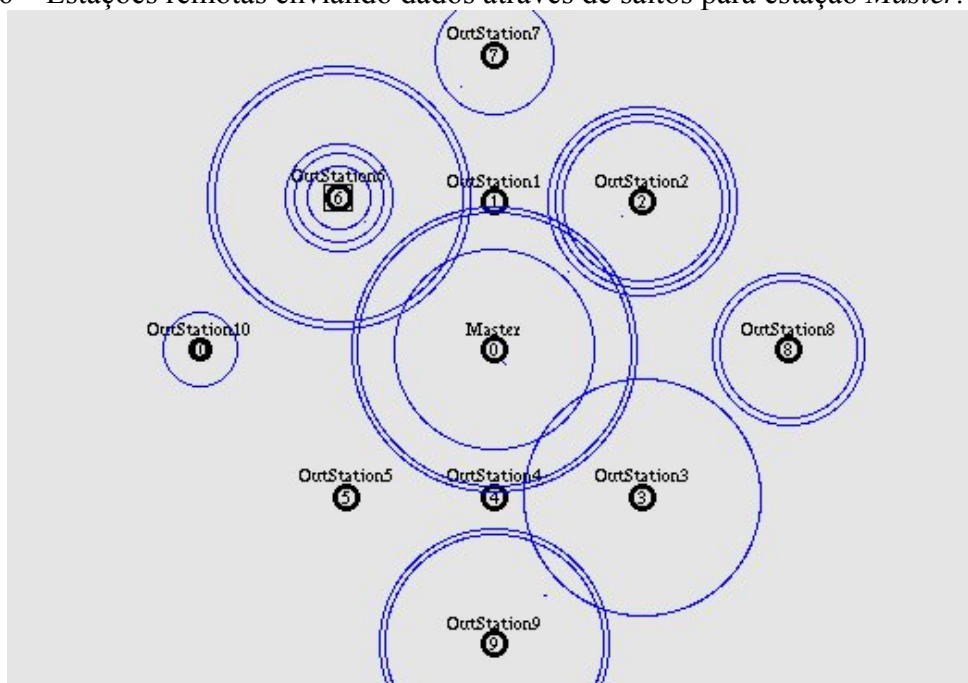
Figura 75 – Estações remotas enviando pacotes para a estação *Master*.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 76 mostra-se o trecho da comunicação das *Outstation's* (2, 3, 6, 7, 8, 9 e 10), observa-se que as *Outstation's* que estão no tier 3 o tráfego na rede é encaminhado através de saltos em nós vizinhos até alcançar o nó destino.

Figura 76 – Estações remotas enviando dados através de saltos para estação *Master*.

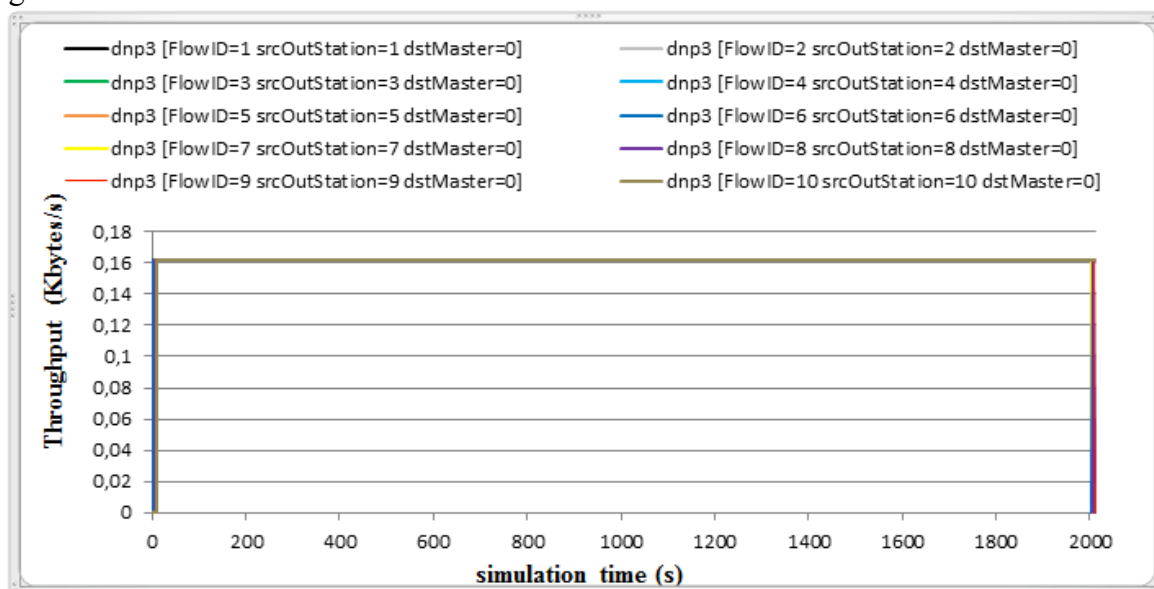


Fonte: Próprio autor.

O envio do pacote do DNP3 é constante com intervalos de 2 s em cada estação *Outstation*, o início da transmissão é no instante 2 s e finaliza no instante 2 004 s, a estação *Master* recebe as informações em intervalo de 1 s, o início das transmissões de cada *Outstation* e ilustrado na Tabela 11. A configuração é um cenário simples que conta com uma estação *Master* definida no *Master* e dez estações *Outstation's* definidas nos *Outstation1* a *Outstation10*.

A Figura 77 mostra a vazão dos pacotes transmitidos das *Outstation1* ao *Outstation10* para a estação *Master*. Com os parâmetros da topologia, o tráfego DNP3 é gerado a cada 2 s e com tamanho de 292 bytes mais 40 bytes de cabeçalho do protocolo TCP/IP totalizando 332 bytes por pacotes transmitidos. A vazão média esperada está em torno de 166 bytes/s (0,162 Kbytes/s) e o resultado mostra uma vazão bem próxima da teórica.

Figura 77 – Estatística média de vazão dos *Outstations*.



Fonte: Próprio autor.

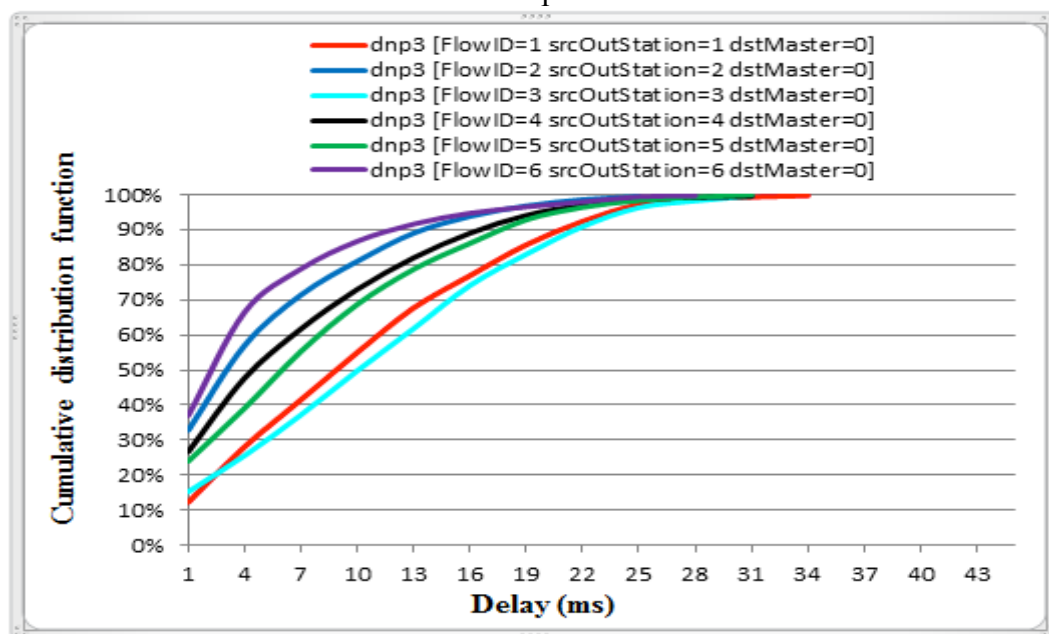
Na Figura 78, ilustra-se o atraso na entrega dos pacotes DNP3 das *Outstation's* para a estação *Master* com salto simples.

A distância entre as *Outstation's* e a *Master* está ilustrada na Figura 74, a maior distância está entre a *Outstation7* a *Outstation10* até a estação *Master*, cerca de 500 m, as mais próximas da estação *Master* estão as *Outstation1* e *Outstation4* em torno de 250 m. As outras *Outstation's* estão localizadas próximas de 353,56 m da estação *Master*. Os resultados obtidos através da CDF (Figura 78) numa amostra de 1.000 pacotes, demonstra através das curvas que a tendência é que os pacotes enviados pelas *Outstations* mais próximas da estação *Master* tenham um menor tempo de atraso.

Em geral, 90% dos pacotes enviados possui um atraso menor ou igual a 16 ms, exceto a *Outstation1* que está mais próxima da estação *Master* como a *Outstation4* porém os tempos são distintos. O mesmo ocorreu com a *Outstation3* que possui a mesma distância do *Outstation6*, mas o tempo de atraso é diferente. Isto ocorre devido ao fato do início da operação do *Oustation1*, na geração de pacotes DNP3 há a concorrência pelos canais de comunicação do mesmo, no suporte do serviço de roteador para os outros *Outstations* que se encontram fora do alcance da estação *Master*. Já em relação ao *Oustation3* quando inicia a transmissão de pacotes se depara com o tráfego congestionados dos roteadores mais próximos e assim a transmissão é realizada passando por mais de um roteador e com isso o tempo de atraso é bem maior em relação ao *Outstation6*. nota-se que 90% dos pacotes transmitido do *Outastation4* é menor que 16 ms já no *Outstation3* e maior que 16 ms e menor ou igual a 20

ms, já no *Outstation6* 90% dos pacotes transmitidos tiveram o tempo de atraso menor ainda que o *Oustation4* com o tempo de atraso menor de 12 ms, em compensação no *Oustation3* o tempo de atraso foi menor ou igual a 22 ms, bem maior comparando com o *Outstation6*.

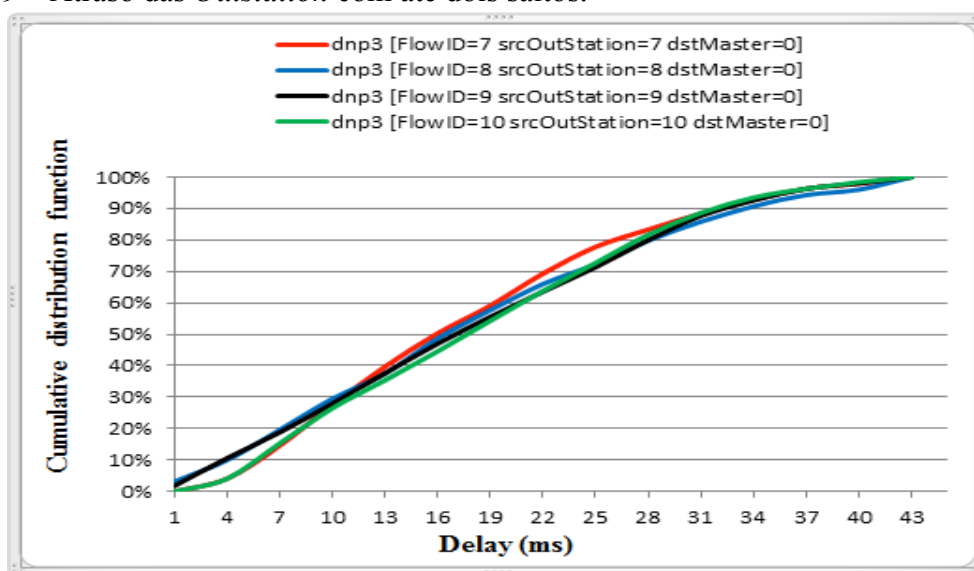
Figura 78– Atraso das *Outstation* com salto simples.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 79, ilustra-se o atraso do tráfego das *Outstation's* com até dois saltos, a análise é análoga ao atraso das *Outstation's* com até um salto. Pelo gráfico, 90% dos pacotes enviados com até dois saltos possui um atraso menor ou igual a 31 ms.

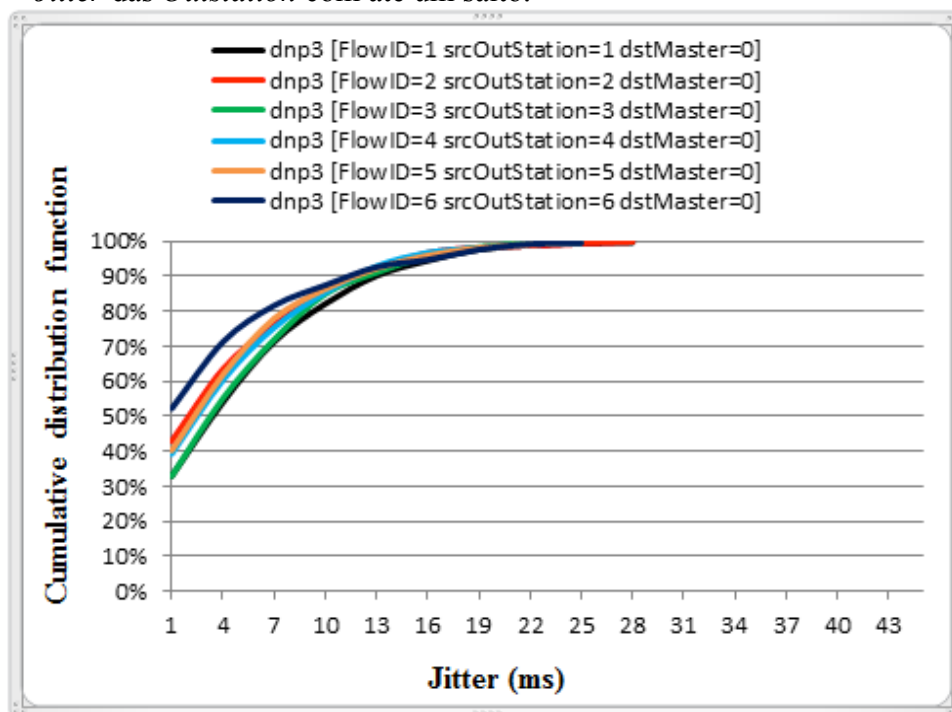
Figura 79 – Atraso das *Outstation* com até dois saltos.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 80, ilustra-se o *jitter* na entrega do tráfego de pacotes DNP3 das *Outstation's* para a estação *Master* com até um salto. Os resultados obtidos através da CDF numa amostra de 1.000 pacotes, demonstra através das curvas que a tendência é que os pacotes enviados pelas *Outstation's* mais próximas da *Submaster* tenham um menor tempo de *Jitter*, em geral 90% dos pacotes enviados possui um *jitter* menor ou igual a 13 ms.

Figura 80 – *Jitter* das *Outstation* com até um salto.

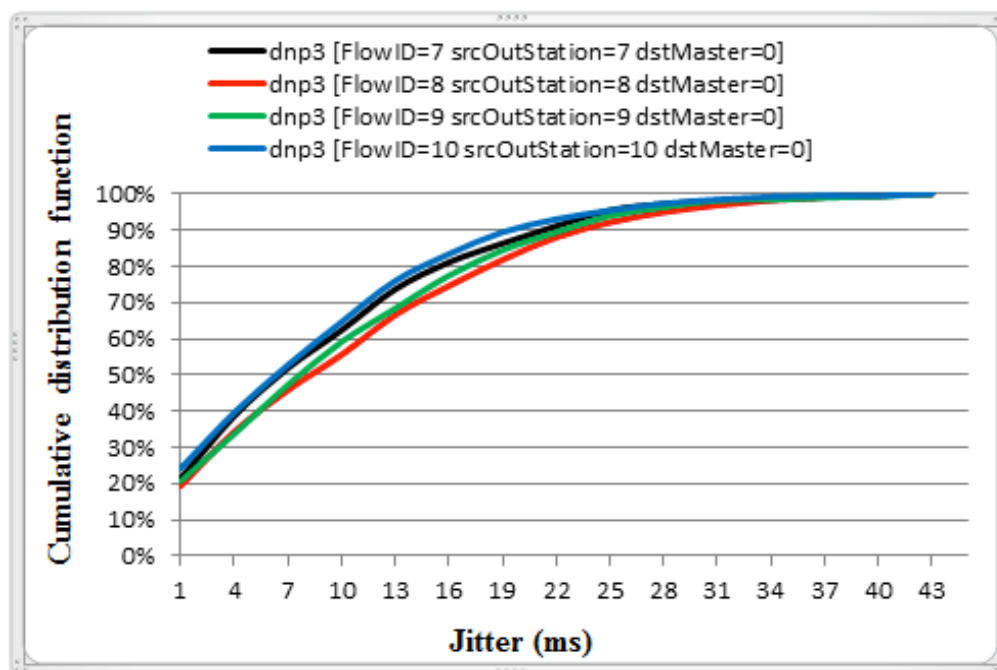


Fonte: Próprio autor.

A tendência do *Oustatiton1* era para ter um menor tempo, pois está mais próxima do *Submaster*, mas nota-se que o tempo foi maior em relação ao *Oustation2* que está mais distante. Este fato ocorreu pelo fato do *Outstation1* servir de roteador para os outros *Outstations* que estão mais distante e não ter o alcance para realizar a transmissão direta ao *Submaster* e quando o *Oustation1* inicia a transmissão dos seus pacotes pode acontecer que a transmissão da fila esteja lotada.

Na Figura 81, ilustra-se o *jitter* na entrega do tráfego de pacotes DNP3 das *Outstation's* para a estação *Master* com até dois saltos, a análise é análoga ao *jitter* das *Outstation's* com até um salto. Pelo gráfico, 90% dos pacotes transmitidos com dois saltos possui um *jitter* menor ou igual a 22 ms.

Figura 81 – *Jitter* das *Outstation* com até dois saltos.



Fonte: Próprio autor.

6.2.6 Simulação do cenário 6 com topologia multi-ponto em uma rede IEEE 802.11g *ad-hoc* em aplicações *smart grid*

Foi analisado um cenário com topologia hierárquica multi-ponto em uma rede WLAN 802.11g *ad-hoc* com taxas de transmissão de até 54 Mb/s avaliando a possibilidade em aplicações *smart grid*. O cenário de simulação do protocolo DNP3 empregou a função de envio de mensagens não solicitadas, enviadas pelas estações Remotas para a estação *Master*.

O cenário da simulação é composta por dez estações Remotas e uma estação *Master*. A comunicação entre os nós é ponto-a-ponto se estiver dentro do alcance de comunicação entre os nós, caso contrário a comunicação é realizado através de roteamento por outros nós intermediários pela retransmissão dos pacotes até o nó destino.

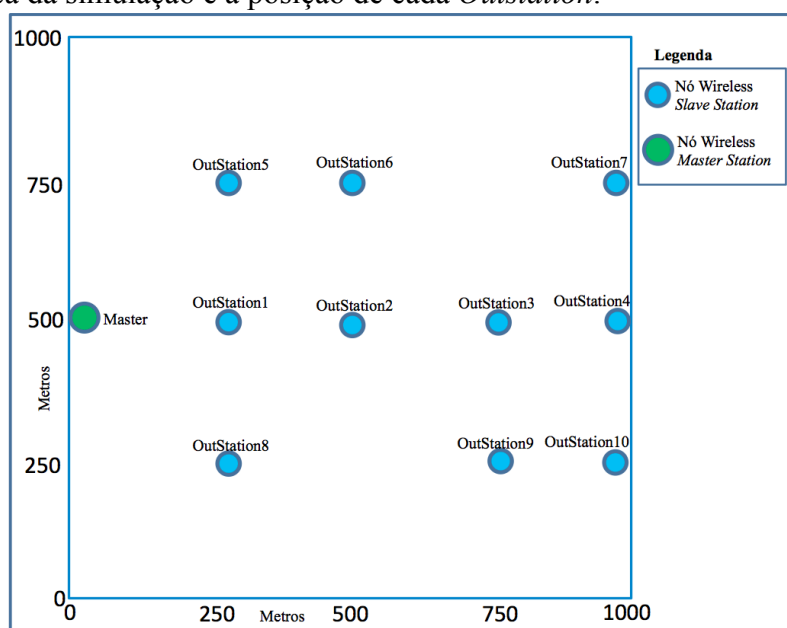
A Tabela 13 apresenta os principais parâmetros com valores diferentes da Tabela 8 do modelo da rede considerada na simulação de transmissão de mensagens não solicitadas com tamanho de pacotes de 292 bytes, incluindo os 250 bytes de dados e mais 32 bytes de CRC e mais 10 bytes de cabeçalho.

Tabela 13. Parâmetros da rede modelada do cenário 6.

Parâmetro	Valor
Frequência	2.4 Ghz
Taxa de transmissão	54 Mb
Tamanho dos pacotes	292 bytes
Tipo de aplicação	DNP3
Evento	Mensagens não solicitados

Fonte: Próprio autor.

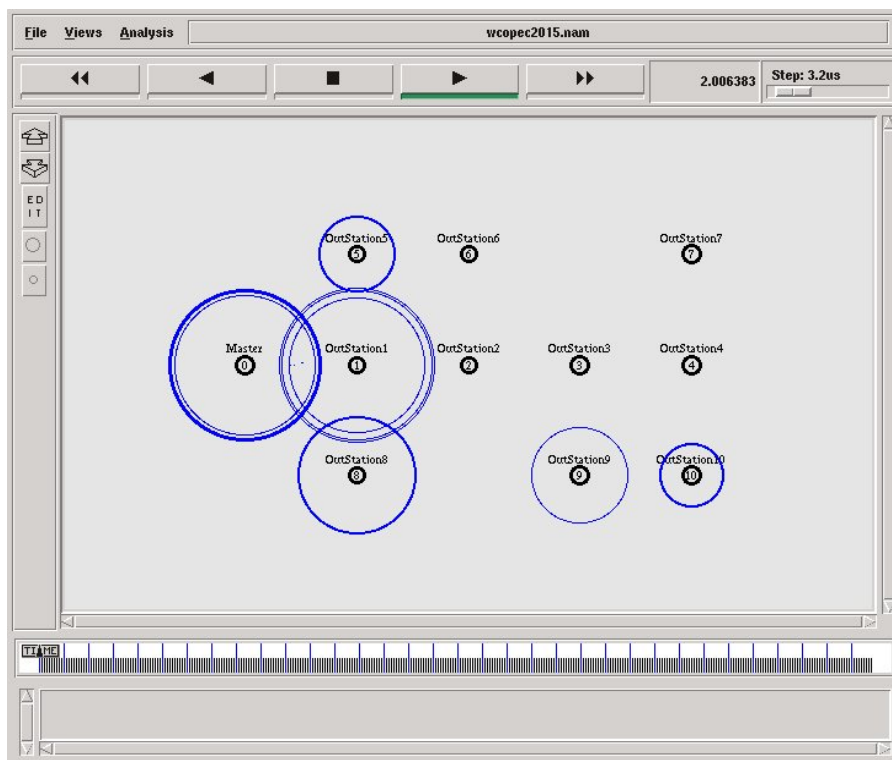
A Figura 82, ilustra a localização das estações *Outstations* e da estação *Master* dentro do cenário simulado.

Figura 82 – Área da simulação e a posição de cada *Outstation*.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 83, ilustra trecho da simulação no NAM, nessa ilustração é possível visualizar o tráfego dos *Outstation* (1, 5 e 8) que estão localizadas mais próximas do *Master* e todos esses nós estão dentro do alcance de comunicação com o estação *Master*. A Figura 3 mostra o trecho da comunicação dos *Outstations* (2, 3, 4, 6, 7, 9 e 10), observa-se que os *Outstations* (4, 7 e 10) estão localizados mais distantes da estação *Master* e nesses *Outstations* que estão mais afastados da estação *Master* a transmissão de dados na rede é realizada através de saltos entre as estações *Outstation* vizinhos até alcançar a estação *Master*.

Figura 83 – Estações *Outstations* enviando pacotes para a estação *Master*.



Fonte: Próprio autor.

A transmissão dos pacotes do DNP3 são constantes com um intervalo de 2.0 s em cada estações *Outstations*, iniciando-se a transmissão no instante 2.0 s nos *Outstation1* a *Outstation5* e em 3.0 s no *Outstation6* a *Outstation10* e terminando a transmissão no instante de 2004 s, já a estação *Master* recebe os pacotes de informações num intervalo de 1.0 s.

A vazão dos pacotes transmitidos das estações *Outstation1* ao *Outstation10* para a estação *Master*. Com os parâmetros da topologia do DNP3, o tráfego do protocolo DNP3 é gerado a cada 2 s com o tamanho de 292 bytes de informações adicionadas mais 40 bytes de informações do cabeçalho do protocolo TCP/IP totalizando 332 bytes por pacotes transmitidos. A vazão média de pacotes foi de 166 bytes/s (0,162 Kbytes/s) como esperado, o resultado mostra uma vazão idêntica do teórico.

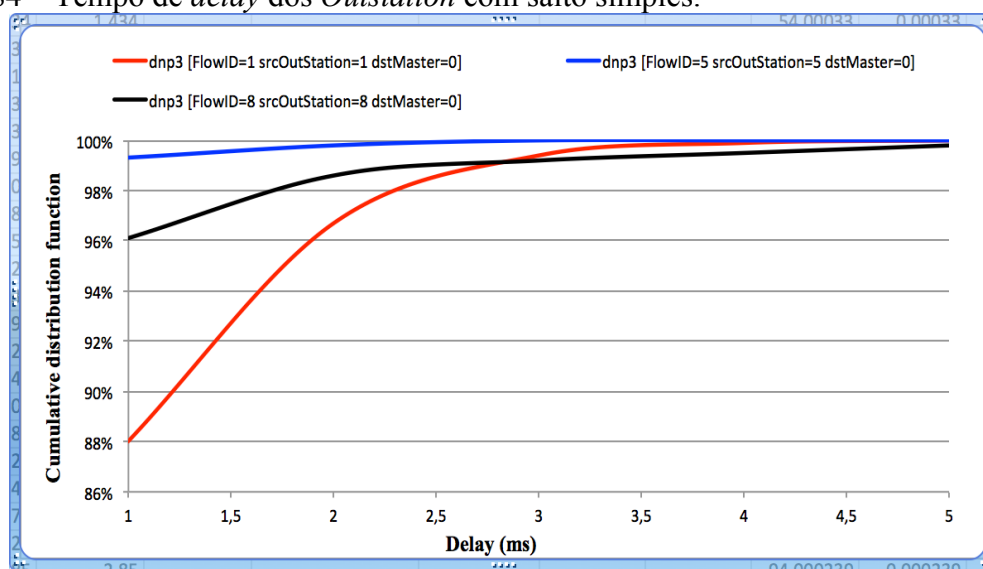
A Figura 84, ilustra o gráfico do tempo de *delay* na entrega dos pacotes DNP3 dos *Outstations* para a estação *Master* com um salto simples.

A distância entre as estações *Outstations* e a estação *Master* está ilustrada na figura 82, os *Outstation7*, *Outstation4* e *Outstation10* estão mais distante da estação *Master* por volta de 1000 m, já as mais próximas da estação *Master* estão as *Outstation1*, *Outstation5* e *Outstation8* em torno de 250 m e 353,56 metros da estação *Master*.

Para gerar os gráficos foi utilizada a *Cumulative Distribution Function* (CDF) numa amostra de 1000 pacotes. O resultado demonstra através das curvas que a tendência é que os pacotes enviados pelas *Outstations* que estão mais próximos da estação *Master* tenha um menor tempo de atraso.

Em geral 90% dos pacotes transmitidos possui um *delay* menor que 1 ms, exceto a estação *Outstation1* que possui um *delay* menor ou igual a 1,2 ms. Este fato ocorreu devido a *Outstation* mesmo estando mais próximas da estação *Master* serviu de ponte para outros *Outstation* retransmitirem as informações até a estação *Master*.

Figura 84 – Tempo de *delay* dos *Outstation* com salto simples.

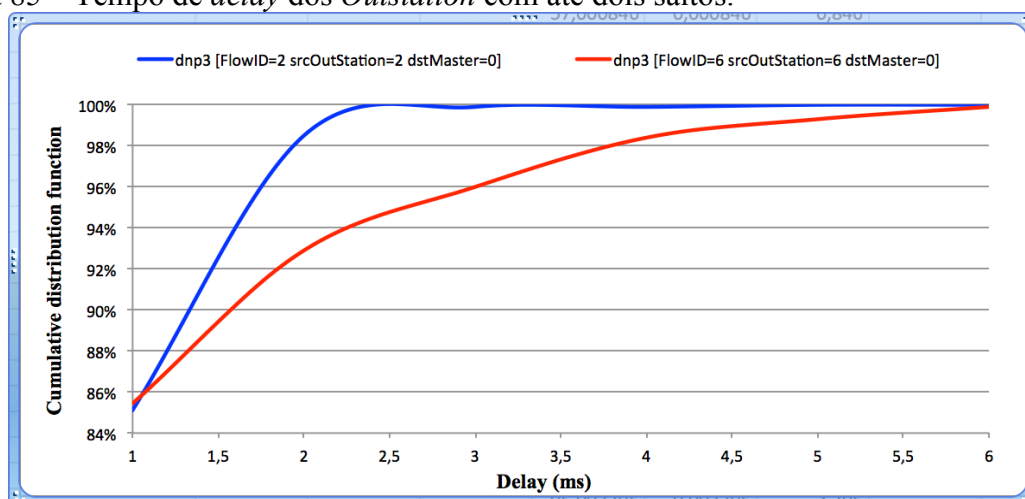


Fonte: Próprio autor.

A Figura 85 ilustra o tempo de atraso do tráfego das estações *Outstations* com até dois saltos, a análise é análoga ao atraso das *Outstations* com salto simples, pelo gráfico 90% dos pacotes enviados com até dois saltos possui um tempo de *delay* menor ou igual à 1,5 ms.

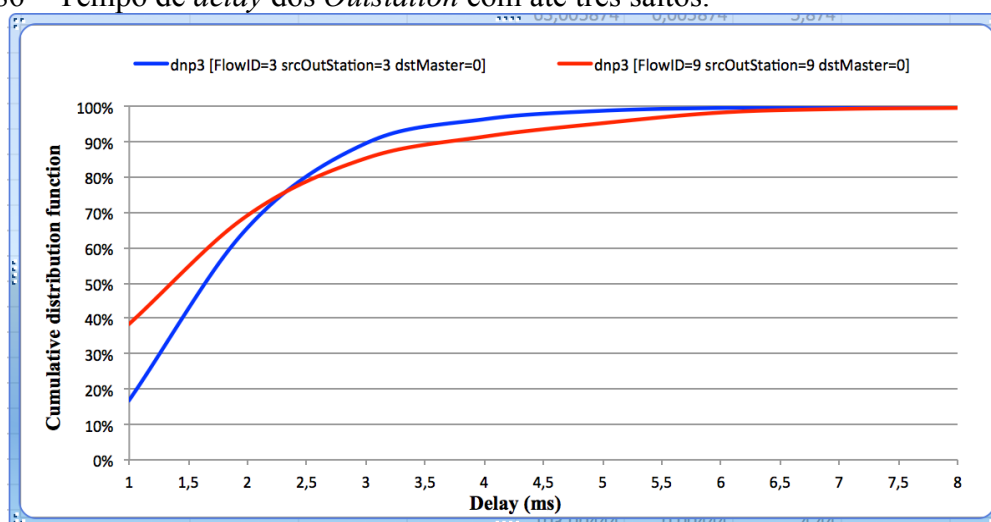
A Figura 86 ilustra o tempo de atraso do tráfego das estações *Outstations* com até três saltos, a análise é análoga ao atraso das estações *Outstations* com até dois saltos, observado o gráfico pode notar que 90% dos pacotes enviados com até três saltos possui um tempo de atraso menor ou igual à 3,5 ms.

Figura 85 – Tempo de *delay* dos *Outstation* com até dois saltos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 86 – Tempo de *delay* dos *Outstation* com até três saltos.



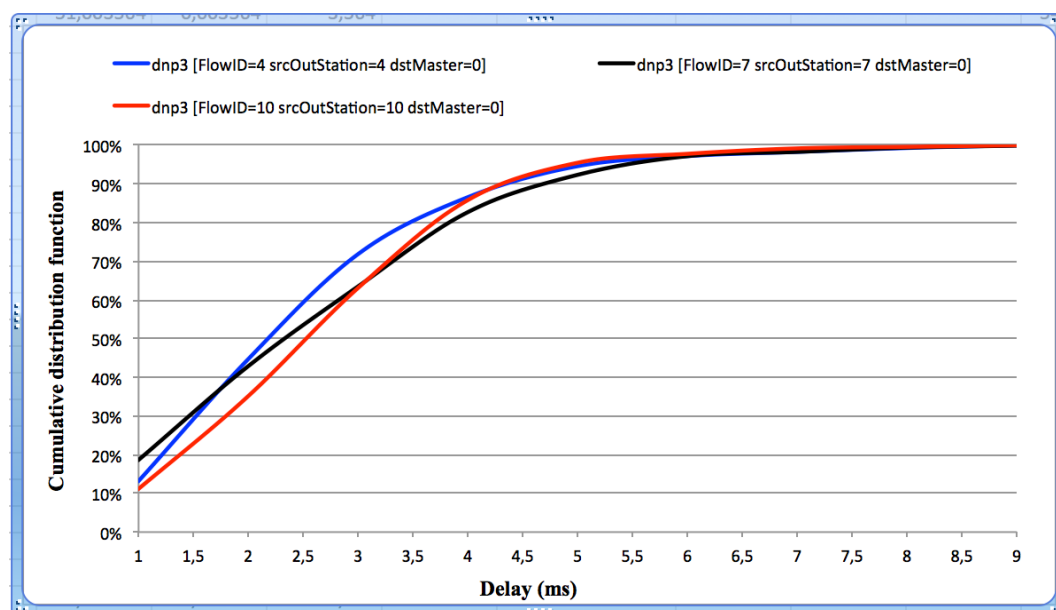
Fonte: Próprio autor.

A Figura 87 ilustra o tempo de atraso do tráfego das estações *Outstations* com até quatro saltos, a análise é análoga ao tempo de atraso das estações *Outstations* com até 3 saltos, observando o gráfico pode ser notado que 90% dos pacotes enviados com até quatro saltos possui um tempo de atraso menor ou igual à 4,5 ms, pode ser observado que com o aumento da distância e o número de saltos o tempo de atraso será maior, por este motivo o tempo gasto para concluir a comunicação será maior.

A Figura 88 ilustra o *Jitter* na comunicação de pacotes do protocolo DNP3 das estações *Outstations* para a estação *Master*. Os resultados obtidos através da CDF numa amostra de 1000 pacotes, demonstra através das curvas que a tendência é que os pacotes

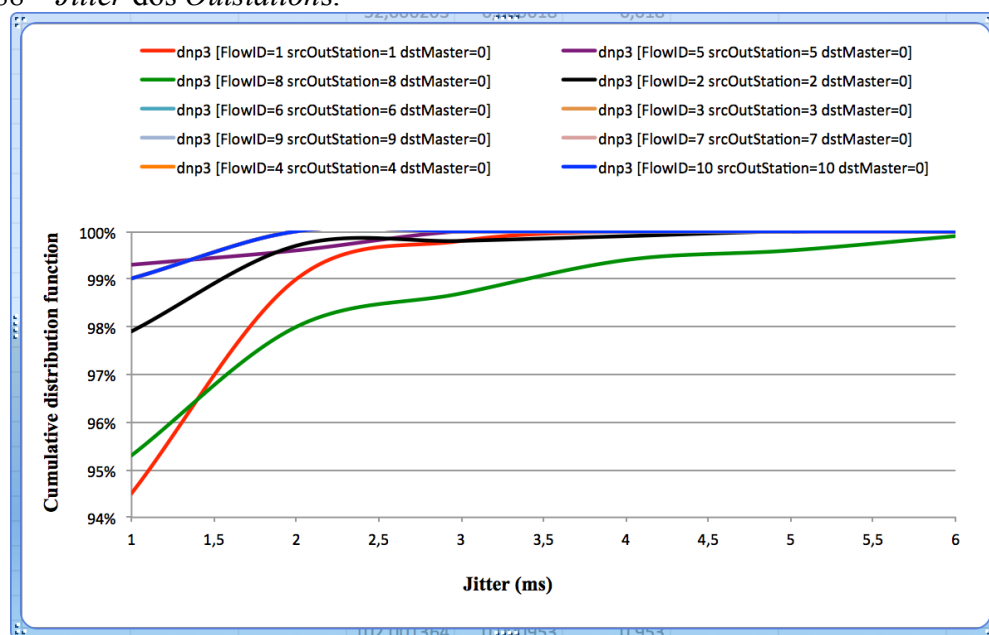
enviados pelas *Outstations* mais próximas da *Master* tenha um menor tempo de *Jitter*, em geral 90% dos pacotes enviados possui um *Jitter* menor do que 1 ms.

Figura 87 – Tempo de *delay* dos *Outstation* com até quatro saltos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 88 – *Jitter* dos *Outstations*.



Fonte: Próprio autor.

6.2.7 Conclusões dos resultados obtidos das simulações dos cenários

6.2.7.1 Conclusões dos resultados obtidos de simulações do cenário 1

Nesse cenário observou-se que a integração DNP3 encapsulado sob TCP/IP apresenta qualidade aceitável quando não há uma utilização saturada do enlace de transmissão. Com os resultados obtidos com a simulação das operações básicas e essenciais do protocolo de comunicação DNP3 observa-se que a atividade heterogênea do enlace pode interferir significativamente na comunicação de dados.

Na simulação proposta do DNP3 foi utilizado um cenário de envio de mensagens não solicitadas, de 250 bytes, a cada 5 s. Assim, em um intervalo de 520 s foram transmitidas 104 mensagens não solicitadas.

As transmissões ocorreram em ambiente de tráfego heterogêneo. Com os resultados pode-se observar que a partir de 60% de utilização do canal começam a haver perdas de mensagens. Quando essa utilização ultrapassa os 85%, a taxa de erro e atraso elevado tornam inviáveis as aplicações com o protocolo DNP3 para monitoração em tempo real.

6.2.7.2 Conclusões dos resultados obtidos de simulações do cenário 2

Esse cenário empregou *patch* desenvolvido para o NS-2 com a finalidade de simular o protocolo de comunicação DNP3 sobre redes WLAN. Nas simulações, observou-se que a integração do DNP3 encapsulado sob TCP/IP apresentou as funcionalidades esperadas quando utilizado em redes *Wireless* 802.11 sem mobilidade e sem saltos, dos pacotes transmitidos sem perdas e descarte de pacotes.

6.2.7.3 Conclusões dos resultados obtidos de simulações do cenário 3

O objetivo foi realizar simulações em um cenário de uma unidade consumidora e analisar o desempenho do protocolo de comunicação DNP3 encapsulado sob TCP/IP em redes LAN e WLAN. Foi simulada a viabilidade de utilização da banda larga fixa presentes nas unidades consumidoras para comunicação entre os medidores inteligentes e a concessionária de energia elétrica, água e gás, e que permita a gestão do consumo por parte dos consumidores.

Os resultados demonstraram que é aceitável o tráfego de DNP3 em redes heterogêneas e que é possível este tipo de serviço, pois os usuários de banda larga utilizam em sua maioria mais *downloads* do que *uploads*, ficando mais tempo ocioso o qual poderia ser utilizado com a comunicação de *smart metering*.

6.2.7.4 Conclusões dos resultados obtidos de simulações do cenário 4

Na simulação de uma rede sem fio com enlace *ad-hoc* além do aumento da vazão, é necessário analisar todos os detalhes que envolvem o meio de comunicação tais como: o meio de transmissão, erros de transmissão, quantidade de saltos, perdas de pacote e a latência da transmissão, fatores que degradam a rede de uma forma considerável.

A simulação proposta de utilização do protocolo de comunicação DNP3 encapsulado sob TCP/IP numa rede IEEE 802.11b *ad-hoc*, em um cenário contendo dez *Outstation* e um *Submaster*, utilizando a função de envio de mensagens não solicitadas das estações *Outstation* para a estação *Submaster*, apresentou resultados promissores no monitoramento em tempo real e aquisição de dados dos *smart meter*.

Na simulação de envio de eventos com tamanho de pacotes de 250 bytes, a cada 2 s, em um intervalo 2.004 s foram transmitidas 1.000 pacotes. As estações *Outstation1* a *Outstation5* inicializaram a transmissão no instantes 2 s e as estações *Outstation6* a *Outstation10* no instante 3 s.

Através dos resultados das simulações, foi possível notar que os nós que tiveram apenas um salto obtiveram melhores desempenhos no tempo de atraso em relação aos nós que tiveram mais de um salto, porém mesmo os que tiveram até três saltos obtiveram um tempo ótimo de atraso para monitoramento em tempo real, pois todos ficaram abaixo de 40 ms.

Esse cenário realizou a simulação em uma rede não estruturada sem fio *ad-hoc* com onze nós, futuramente será desenvolvida a integração com o IEEE 802.16 para transmissões mais longas.

6.2.7.5 Conclusões dos resultados obtidos de simulações do cenário 5

O objetivo deste cenário foi realizar simulações do protocolo de comunicação DNP3 encapsulado sob TCP/IP em uma rede 802.11b sem fio *ad-hoc*. É através das simulações

poder analisar o desempenho quanto a: perdas de pacotes, colisões de pacotes e tempo gasto para entrega de uma informação transmitida de uma estação remota até a estação central.

Com os resultados obtidos das simulações foi possível analisar que o sistema de comunicação 802.11 sem fio *ad-hoc* é adequado para o sistema de monitoração em tempo real, bem como para a comunicação entre os medidores inteligentes até as concessionárias. O tempo de atraso admissível no sistema da *smart grid* para o sistema de tele-proteção é de 3 a 16 ms. Já para o sistema de monitoramento em tempo real é de até 100 ms. Nos resultados obtidos nas simulações, o maior tempo de atraso alcançado foi de 42 ms.

6.2.7.6 Conclusões dos resultados obtidos de simulações do cenário 6

Com os resultados obtidos das simulações foi possível realizar a análise de desempenho do sistema de comunicação 802.11g *wireless* ad-hoc juntamente com o protocolo de comunicação DNP3 e verificar que a rede 802.11g é adequada para o sistema de tele-proteção e monitoração em tempo real, bem como para a comunicação entre os *smart meter* e o centro de controle, o tempo de *delay* admissível no sistema *smart grid* para o sistema de tele-proteção é de 3 a 16 ms, já para o sistema de monitoramento em tempo real é de até 100 ms. Nos resultados obtidos na simulação, o maior tempo de *delay* alcançado foi de 7 ms.

Como continuação do trabalho pretende-se realizar as simulações utilizando o IEEE 802.11n *wireless* para verificar o tempo de *delay* na transmissão de pacotes de dados.

7 CONCLUSÕES

Com os avanços nas áreas de tecnologia de informação e comunicação, os sistemas de automação, de redes de computadores com maiores capacidades de transmissão e processamento de dados, além das tecnologias empregadas na construção de atuadores e sensores, têm contribuído bastante na automatização das redes de energia tornando-as mais modernas e inteligentes.

Isto é feito, utilizando-se de tecnologias de eletrônica embarcadas em todas as partes que compõem a rede de energia, adicionando novas funções no gerenciamento e operações dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, de forma mais eficiente, confiável, sustentável, ecológico e econômico.

Com os sensores coletando informações juntamente com os *smart meter* pode-se acompanhar em quase que em tempo real as características da rede, estados dos componentes de geração, transmissão e distribuição, bem como a utilização da energia, possibilitando em uma tarifação mais dinâmica.

O conceito do *smart grid* visa ampliar as funcionalidades e melhorar o funcionamento da rede elétrica, tornando-a mais inteligente, possibilitando que a mesma seja capaz de prever e responder ao comportamento e ações de todos os consumidores conectados a ela.

O objetivo principal do trabalho foi realizar pesquisas e verificar a forma mais econômica de realizar os estudos sobre o *smart grid* na parte de comunicação de dados. Após as pesquisas foi constada que a forma mais econômica de realizar os estudos e experimentos na área do sistema de comunicação do *smart grid* é através de softwares simuladores de rede, pois para montar um cenário real com equipamentos reais é inviável porque os equipamentos são muito onerosos e dependendo da extensão e quase impossível de se montar. Já os simuladores existentes tem o valor muito alto além de poder realizar simulações somente de certas redes e com as configurações já definidas dos fabricantes de equipamentos de telecomunicações.

Optou-se pela implementação do protocolo de comunicação DNP3 encapsulado sob TCP/IP no NS-2 e assim possibilitando realizar as simulações e obter os resultados para efetuar as análises de desempenho da rede de comunicação seja ela cabeada ou sem fio, ou ambos. A vantagem do NS-2 é um software de código aberto que permite realizar novas implementações e atualização dos protocolos já existentes a fim de realizar estudos similares com algumas restrições e aproximações de funcionamento de protocolos reais. O NS-2

funciona sobre um sistema operacional livre, assim pode-se realizar qualquer estudo e simulações sobre redes mistas, cabeadas ou sem fio com baixo custo com software e sistema operacional.

Pretende-se nos trabalhos futuros realizar implementação do protocolo de comunicação DNP3 sob o simulador de redes NS-3, pois esse novo software é o substituto do NS-2 e com a vantagem de ter vários protocolos de redes já implementados.

REFERÊNCIAS

- ADAMIAK, M.; PREMERLANI, W. The role of utility communications in a deregulated environment. In: ANNUAL HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS SCIENCES, 32., 1999, Hawaii. **Proceedings...** Hawaii: IEEE Comput, 1999. p. 1-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=772861>>. Acesso em: 8 abr. 2014, 1999.
- ADAMIAK, M.; REDFERN, M., "Communications systems for protective relaying," in **Computer Applications in Power, IEEE**, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 14–18, 1998. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=694931&isnumber=15188>>. Acesso em: 10 fev. 2014.
- ADVANCED METERING INFRASTRUCTURE (AMI). California: Electric Power Research Institute (EPRI), 2007. Disponível em: <<http://www.ferc.gov/eventcalendar/Files/20070423091846-EPRI-AdvancedMetering.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2013.
- AGUERO, J. R. Applying self-healing schemes to modern power distribution systems. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2012, San Diego. **Proceedings...** San Diego: IEEE, 2012. p. 1-4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6344960>>. Acesso em: 27 fev. 2014.
- BAGARIA, S.; PRABHAKAR, S. B.; SAQUIB, Z. Flexi-DNP3: flexible distributed network protocol version 3 (DNP3) for SCADA security. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT TRENDS IN INFORMATION SYSTEMS, 2011, Kolkata. **Proceedings...** Kolkata: IEEE, 2011. p. 293-296. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6146884>>. Acesso em: 21 fev. 2014.
- BIGHAM, J.; GAMEZ, D.; LU, N. Safeguarding SCADA Systems with Anomaly Detection. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON MATHEMATICAL METHODS, MODELS, AND ARCHITECTURES FOR COMPUTER NETWORK SECURITY, MMM-ACNS. 2., 2003, Berlin. **Proceedings...** Berlin: Springer-Verlag, 2003. p. 171-182.
- CAMARGO, C. "Smart Grid: a rede elétrica inteligente", artigo apresentado na pagina <http://www.tecmundo.com.br/3008-smart-grid-a-rede-eletrica-inteligente.htm> em 29/10/2009. Acesso em: 3 abr. 2013.
- CHUNG, J.; CLAYPOOL, M. **NS by example**. Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 1995. Disponível em: <<http://nile.wpi.edu/NS>>. Acesso em: 4 fev. 2012.
- CLARKE, G.; REYNDERS, D.; WRIGHT, E. **Practical Modern SCADA Protocols: DNP3, 60870.5 and Related Systems**. Mumbai: Newnes, 2004.
- CORMANE, J. A. A. **Compressão de dados para sinais de distúrbios no ambiente das redes elétricas inteligentes**. 2013. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e de Automação) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E ENERGIA - GEPE. **Arquitetura do Smart Grid**. Guimarães: [S. n.], 2013. Disponível em: <http://www.gepe.dei.uminho.pt/includes/cepium.html>>. Acesso em: 20 set. 2013.

GONÇALVES, L. C.; CORRÊA, M. E. de O. **Tutorial de NS-2**. [S. l.: s. n.], 2005. Disponível em: <http://www.midiacom.uff.br/~debora/redes1/pdf/tutorial-ns2.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2013.

GREIS, M. **Tutorial for the Network Simulator “NS”**. California: University of Southern California, 1996. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/tutorial/index.html>>. Acesso em: 15 mar. 2012.

HASSAN, R.; RADMAN, G. Survey on Smart Grid. In: IEEE SOUTHEASTCON 2010 (SOUTHEASTCON), 2010, Concord, NC. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2010. p. 210-213. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5453886>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

HEYDT, G.T.; LIU, C.C.; PHADKE, A.G.; VITTAL, V., "Solution for the crisis in electric power supply," in *Computer Applications in Power, IEEE*, [S. l.], v.14, n.3, p. 22-30, 2001. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=952933&isnumber=20599>>. Acesso em: 15 fev. 2014.

HEYDT, G. T.; LIU, C.C.; JUNG, J.; VITTAL, V. e PHADKE, A. G. "The strategic power infrastructure defense (SPID) system. A conceptual design," in *Control Systems, IEEE*, [S. l.], v. 20, n. 4, p. 40–52, 2000. Doi:10.1109/37.856178. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=856178&isnumber=18591>>. Acesso em: 25 fev. 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **Recommended Practice for Data Communications Between Remote Terminal Units and Intelligent Electronic Devices in a Substation**. [S.l.: s.n.], 2001. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=912952&queryText%3DIEEE+Recommended+Practice+for+Data+Communications+Between+Remote+Terminal+Units+and+Intelligent+Electronic+Devices+in+a+Substation>>. Acesso em: 2 abr. 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **standard definition, specification, and analysis of systems used for supervisory control, data acquisition, and automatic control**. [S.l.: s.n.], 1987. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=26498>>. Acesso em: 2 abr. 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **standard for SCADA and automation systems: 3 park avenue**. New York: [s.n.], 2008. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4518930&isnumber=4518929>>. Acesso em: 2 abr. 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **Standard for electric power systems communications: distributed network protocol (DNP3)**. [S.l.: s.n.], 2010.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **Standard for electric power systems communications: distributed network protocol (DNP3)**. [S. l.: s. n.], Redline, 2012.

ISSARIYAKUL, T.; HOSSAIN, E. **Introduction to network simulator NS2**. [S. l.], Springer, 2009.

JAIMES, O. E. R. **Estudios de desempeño de escenarios SCADA que utilizan el protocolo DNP3**. 2012. 142 f. Tesis (Magíster en Ingeniería Electrónica y de Computadores) - Universidad de los Andes, Bogotá D. C. Colombia, 2012.

JAIN, R. **The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling**. India: Wiley India Pvt., 2008.

JANAKA, E.; JENKINS, N.; LIYANAGE, K.; JIANZHONG WU, A. Y. **Smart grid: technology and applications**. New Delhi: Chicester/GB, 2012.

JENHUI, C.; SHIANN-TSONG, S.; CHIN-AN, Y. **A new multichannel access protocol for IEEE 802.11 ad hoc wireless LANs**. In: IEEE PROCEEDINGS ON PERSONAL, INDOOR AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS, 14., 2003, Beijing, China. PIMRC 2003. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2003. p. 2291-2296. Doi: 10.1109/PIMRC.2003.1259126
Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1259126>>. Acesso em: 8 abr. 2014.

LAMIN, H. **Medição eletrônica em baixa tensão: aspectos regulatórios e recomendações para implantação**. 2009. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

LIMA, C. A. F.; JANNUZZI, G. M. Capítulo VI – **Smart Grid será realidade em seu potencial com o envolvimento do órgão regulador e com compromissos com o consumidor**. Smart grids – Redes Inteligentes, Santa Cecília, 2012. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed70_fasciculo_smart_grids_cap6.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2013.

LU, X.; WANG, W.; MA, J. An empirical study of communication infrastructures towards the smart grid: design, implementation, and evaluation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 170–183, 2013. Doi:10.1109/TSG.2012.2225453.

MAJDALAWIEH, M.; PARISI PRESICCE, F.; WIJESEKERA, D. DNPSec: distributed network protocol version 3 (DNP3) security framework. In: ELLEITHY, K. et al. (Ed.). **Advances in computer, information, and systems sciences, and engineering**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. p. 227–234.

MEDEIROS, A. L. **Avaliação de perdas não técnicas de energia elétrica: desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão**. 2013. 186 f. Tese (Doutorado em Administração, área de concentração em Gestão de Negócios, Economia e Mercado) - Univerdidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

MEENEGHAN, P.; DELANEY, D. **An introduction to ns, nam and otcl scripting**. Maynooth: National University of Ireland, 2004. Disponível em:

<<http://old.shahed.ac.ir/references/AnIntroductiontoNS,NamandOTclscripting.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2012.

ROS, F. J.; RUIZ, P. M. **Implementing a new manet unicast routing protocol in NS2**. Murcia: Department of Information and Communications Engineering, University of Murcia, Spain, 2004. Disponível em: <<http://www.cs.mun.ca/~yzchen/papers/papers/testing/nsrt-howto.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2012.

SILVA, M. J. L. V. R. da. **Smart grids em Portugal: plano de negócio para serviço de planeamento e gestão remota de consumos eléctricos**. 2011. 89 f. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

SINHA, A. et al. Smart grid initiative for power distribution utility in India. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2011, San Diego, CA. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2011. p. 1-8. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6038943>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

TANENBAUM, A. S. **Redes de Computadores**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

NETWORK SIMULATOR - NS. **The network simulator: NS-2**. [S. l.: s. n.], 2006. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/index.html>>. Acesso em: 8 abr. 2014.

TORRI, L. B. **Uma proposta de arquitetura extensível para micro medição em Smart Appliances**. 2012. 117 f. Dissertação (Mestrado Ciência da Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

VINT. **Virtual inter network testbed**. California: University of Southern California, 1996. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/vint/index.html>>. Acesso em: 11 set. 2012.

XIANG LU et al. On network performance evaluation toward the smart grid: a case study of DNP3 over TCP/IP. In: IEEE GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE - GLOBECOM 2011, 2011, Houston, TX, USA. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6134406>>. Acesso em: 8 abr. 2014.

ZARUR, P. D. **Supervisão e controle em tempo real de sistemas eléctricos baseada em computação grid**. 2005. 128 f. Disertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

APÊNDICE A – Artigos Publicados Relacionados ao Presente Trabalho

Ortega, A.; Akira Shinoda, A., "Simulation in NS-2 of DNP3 protocol encapsulated over TCP/IP in smart grid applications, "Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2013 IEEE PES Conference On, vol., no., pp.1,8, 15-17 April 2013
DOI: 10.1109/ISGT-LA.2013.6554430
Print ISBN:978-1-4673-5272-7
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6554430&isnumber=6554355>

Ortega, A.; Akira Shinoda, A.; Schweitzer, C. M., "Performance analysis of smart grid communication protocol DNP3 over TCP/IP in a heterogeneous traffic environment," *Communications and Computing (COLCOM), 2013 IEEE Colombian Conference on*, vol., no., pp.1,6, 22-24 May 2013.
DOI: 10.1109/ColComCon.2013.6564828
E-ISBN : 978-1-4799-0365-8
Print ISBN: 978-1-4799-0366-5
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6564828&isnumber=6564809>

Alcides Ortega; Ailton A. Shinoda; Christiane M. Schweitzer; Aleciana V. Ortega, "Simulação Computacional do Protocolo de Comunicação em Aplicações de Smart Grid," *Congresso de Matemática Aplicada Computacional (SMAC Sudoeste 2013)*, Bauru-SP, Brasil, pp.370,375, Setembro 2013.
ISSN:2237-7166
<http://www.sbmac.org.br/cmacts/cmac-se/2013/trabalhos/PDF/4560.pdf>

Ortega, A.; Akira Shinoda, A.; Schweitzer, C. M., "Simulação Aplicada à Infraestrutura da Rede Elétrica com Smart Grid Empregando Comunicação Sem Fio," *Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (XV SIGE)*, ITA - SÃO JOSÉ DOS CAMPOS-SP, Brasil, pp.183,187, Setembro 2013.
ISSN:1983-7402
http://www.sige.ita.br/sige_old/XVSIGE/pdf/P_5.pdf

Ortega, A.; Akira Shinoda, A.; Schweitzer, C. M.; Ortega, Aleciana, V.; Prete, Ligia, R., "Performance Analysis of Smart Grid Communication Protocol DNP3 over IEEE 802.11," *X Latin-American Congress on Electric Power Generation, Transmission and Distribution (CLAGTEE)*, Viña del Mar, Chile, October, 2013.

Ortega, A.; Akira Shinoda, A.; Schweitzer, C. M.; Ortega, Aleciana, V., "DNP3 integration performance with IEEE 802.11 in Smart Grid Applications Through the CDF of delay and Jitter," *5th IEEE Latin-American Conference on Communications (IEEE LATINCOM 2013)*, Santiago, Chile, November, 2013.

Alcides Ortega, Ailton Akira Shinoda, Christiane Marie Schweitzer, "Análise e Desempenho do Protocolo de Comunicação DNP3 Sobre Redes Wireless em Aplicações Smart Grid," *XIII International Conference on Engineering and Technology Education (INTERTECH'2014)*, Guimarães, Portugal, Março, 2014.
DOI: 10.14684/intertech.13.2014.154-158
ISSN 2317-4382
<http://proceedings.copec.org.br/index.php/intertech/article/view/1803>

Alcides Ortega, Ailton A. Shinoda, Christiane M. Schweitzer, Fabrizio Granelli, Aleciana V. Ortega, Fabiola Bonvecchio, “*Performance Evaluation of the DNP3 Protocol for Smart Grid Applications over IEEE 802.3/802.11 Networks and Heterogeneous Traffic*,” *INASE and CSCC Conferences, Zakynthos Island, Greece*, pp.232,237, 22-24 July 16-20, 2015

Proceedings of the 19th International Conference on Communications, Series: Recent Advances in Electrical Engineering Series 5^o

ISSN: 1790-5117

ISBN: 978-1-61804-318-4

<http://www.inase.org/library/2015/zakynthos/bypaper/COMMUN/COMMUN-35.pdf>

Alcides Ortega, Ailton Akira Shinoda, Christiane M. Schweitzer, Fabrizio Granelli, Aleciana V. Ortega, Fabiola Bonvecchio, “*Proposal DNP3 Protocol Simulation on NS-2 in IEEE 802.11g Wireless Network Ad Hoc Over TCP/IP in Smart Grid Applications*,” *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2015 IEEE PES Conference On*, vol., no., Montevideo, Uruguay, pp.1,6, 5-7 October 2015

A. Ortega, A. A. Shinoda, C. M. Schweitzer, F. Granelli, A. V. Ortega, “*Performance Analysis of the DNP3 Protocol Over IEEE 802.11g Wireless Network in Smart Grid Application through of the Simulation in the NS-2*,” *XI Latin-American Congress on Electric Power Generation, Transmission (CLAGTEE 2015)*, São José dos Campos, Brazil, 08-11 November 2015

Alcides Ortega, Ailton Akira Shinoda, Christiane Marie Schweitzer, Fabrizio Granelli, “*Simulações do Protocolo de Comunicação DNP3 Sobre Protocolo TCP/IP em uma Rede Wireless 802.11g em Aplicações Smart Grid*,” *World Congress on Systems Engineering and Information Technology (WCSEIT'2015)*, Vigo, Spain, November 15-18, 2015