

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO**

ETIENNE CÉSAR RIBEIRO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DE PROTOCOLOS PARA REDES DE
SENSORES E REDES AD HOC APLICADOS À TV
DIGITAL INTERATIVA E CIDADES DIGITAIS**

Dissertação de Mestrado em Ciência da Computação

**Niterói
2006**

ETIENNE CÉSAR RIBEIRO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DE PROTOCOLOS PARA REDES DE
SENSORES E REDES AD HOC APLICADOS À TV
DIGITAL INTERATIVA E CIDADES DIGITAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: Processamento Paralelo e Distribuído.

Orientador: Prof. Dr. CÉLIO VINICIUS NEVES DE ALBUQUERQUE

**Niterói
2006**

ETIENNE CÉSAR RIBEIRO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DE PROTOCOLOS PARA REDES DE
SENSORES E REDES AD HOC APLICADOS À TV
DIGITAL INTERATIVA E CIDADES DIGITAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: Processamento Paralelo e Distribuído.

Aprovada em Novembro de 2006.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque, Ph.D.
Universidade Federal Fluminense - UFF
Orientador

Prof^ª. Débora Christina Muchaluat Saade, D.Sc.
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D.Sc.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

**Niterói
2006**

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, **Paulo e Ignez**, por sempre acreditarem em mim e por terem abdicado de suas vidas em prol das realizações e da felicidade de seus filhos.*

*À minha irmã **Ana Paula**, por sua preocupação, carinho e incentivo.*

*À minha avó **Eurydice** (in memoriam), que desde os meus primeiros passos me chamava de professor.*

*À minha amada esposa **Simone** e à minha filha (princesa) **Giovanna**, por todo amor, incentivo, apoio e compreensão. Nada disso teria sentido se vocês não existissem na minha vida.*

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência. Obrigado por me permitir errar, aprender e crescer, por Sua eterna compreensão e tolerância, por Seu infinito amor, pela Sua voz “invisível” que não me permitiu desistir e principalmente por ter me dado uma família tão especial, enfim, obrigado por tudo. Ainda não descobri o que eu fiz para merecer tanto.

Ao **Prof. Célio**, pela orientação, competência, profissionalismo e dedicação tão importantes. Tantas vezes que nos reunimos e, embora em algumas eu chegasse desestimulado, bastavam alguns minutos de conversa e umas poucas palavras de incentivo e lá estava eu, com o mesmo ânimo do primeiro dia de aula. Obrigado por acreditar em mim e pelos tantos elogios e incentivos. Tenho certeza que não chegaria neste ponto sem o seu apoio. Você foi e está sendo muito mais que orientador: para mim será sempre mestre e amigo.

Aos membros da banca examinadora, **Prof^a Débora Christina Muchaluat Saade** e **Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein**, que tão gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta dissertação. À **Prof^a Débora**, agradeço ainda pelas conversas breves, porém importantíssimas.

Aos **Professores do IC**, pela dedicação, competência, apoio e todo conhecimento compartilhado. À **Prof^a. Ana Cristina Bicharra Garcia**, por ter sido a primeira a acreditar em mim. Embora o destino nos tenha traçado caminhos diferentes, ficaram as marcas de competência e respeito. À **Ângela e Maria**, mais que secretárias, verdadeiras anjas da guarda.

Ao amigo **Tiago Proença**, pelos trabalhos e disciplinas realizados em conjunto e, principalmente, pela preocupação e apoio constantes. Seus conhecimentos e dedicação foram fundamentais para que as implementações no simulador ns-2 se tornassem realidade. A todos os demais **amigos e amigas do IC**, obrigado pelo convívio, amizade e apoio demonstrado.

Aos professores **Adriano Cruz e Moacyr Azevedo do NCE/UFRJ**, pelas cartas de recomendação e conversas de incentivo.

Ao **IBGE**, em especial ao **Sérgio Baía, Arnaldo Lyrio e Robson Vaz**, pela oportunidade concedida para a realização deste curso e desta dissertação. E ao **José Luiz**, um eterno incentivador e um dos responsáveis pelo meu ingresso no IC.

Aos **colegas do IBGE, da GETES** e, em especial, ao **Alberto, Lúcia, Márcio e Martha** pelas leituras, revisões, questionamentos e discussões sempre tão produtivas. Agradeço também a todos os meus funcionários, que tiveram que trabalhar em dobro para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos amigos e padrinhos de casamento **Luis Eduardo (Maluco)** e **Sydney**. A crônica “Amigos”, de Vinícius de Moraes, descreve, de forma irrefutável, o quanto vocês são importantes para mim.

À minha família, tios(as), primos(as), cunhados(as) e aos meus sogros **Carlos e Ligia**, por apoiarem e compreenderem o meu isolamento em inúmeras tardes de domingo.

À minha **mãe** e ao meu **pai** deixo um agradecimento especial, por todas as lições de amor, companheirismo, amizade, caridade, dedicação, abnegação, compreensão e perdão que vocês me dão a cada novo dia. Sinto-me orgulhoso e privilegiado por ter pais tão especiais. E à minha **irmã** querida, sempre pronta a me apoiar em tudo nesta vida.

À minha amada esposa **Simone**, por todo amor, carinho, compreensão e apoio em tantos momentos difíceis desta caminhada. Obrigado por permanecer ao meu lado, mesmo sem os carinhos rotineiros, sem a atenção devida e depois de tantos momentos de lazer perdidos. Obrigado pelo presente de cada dia, pelo seu sorriso e por saber me fazer feliz.

À minha princesa **Giovanna**, por todo amor incondicional que você sempre me deu. Inúmeras foram as vezes que, às 3 ou 4 horas da manhã, após concluir algum trabalho, fui até o seu quarto e lá permaneci, feliz por você fazer parte da minha vida. A sua existência é o reflexo mais perfeito da existência de Deus.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

*E o futuro é uma astronave que tentamos pilotar,
Não tem tempo nem piedade, nem tem hora de chegar.
Sem pedir licença muda a nossa vida,
depois convida a rir ou chorar.
Nessa estrada não nos cabe conhecer ou ver o que virá.
O fim dela ninguém sabe bem ao certo onde vai dar.
Vamos todos numa linda passarela
De uma aquarela que um dia, enfim, descolorirá.*

(Toquinho e Vinícius de Moraes)

Resumo da Dissertação apresentada à UFF como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação (M.Sc.)

Etienne César Ribeiro de Oliveira

Novembro/2006

Orientador: Célio Vinicius Neves de Albuquerque

Programa de Pós-Graduação em Computação

O Governo Federal vem se esforçando para reduzir o percentual de brasileiros que sofrem com os problemas das exclusões social e digital através de incentivos e investimentos em vários programas de alcance diferenciado. Dentre esses projetos, dois se destacam em relação à capacidade de atingir uma quantidade significativa de brasileiros: Cidades Digitais e Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa.

O projeto Cidades Digitais deve prover acesso gratuito à Internet e, ainda, oferecer acesso a informações regionalizadas, tais como acesso à intranet de centros de pesquisa, órgãos do governo, universidades etc. Já a implantação do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa deverá possibilitar ao governo uma maior interação com a população mais carente, seja através de programas educativos e interativos, seja através da oferta de novos serviços à população, além de também prover acesso à Internet.

As redes *ad hoc* sem fio autoconfiguráveis são uma excelente alternativa para prover a infra-estrutura de comunicação necessária à implantação do projeto Cidades Digitais e do projeto Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa. Além da vantagem tecnológica óbvia de não necessitar de cabos, o custo reduzido das unidades de transmissão e recepção, a facilidade de implementação e o vasto alcance de determinadas tecnologias são algumas das características que se encaixam nas diretrizes dos projetos destacados.

Esta dissertação avalia e compara o desempenho de protocolos para redes *ad hoc* com o desempenho de protocolos para redes de sensores aplicados à TV Digital Interativa e Cidades Digitais, através de simulações realizadas com o simulador de redes ns-2 (*Network Simulator*). Os cenários utilizados retratam comunidades carentes de pequena, média e grande área geográfica.

Os resultados apontam que os protocolos de roteamento para redes de sensores, por disporem de características favoráveis aos padrões de tráfego Ponto-Multiponto e Multiponto-Ponto, representam alternativas promissoras aos protocolos tradicionais para redes *ad hoc* na infra-estrutura dos projetos Cidades Digitais e Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa.

Palavras-chave: Inclusão Digital; Redes Ad hoc; Redes de Sensores.

Abstract of Dissertation presented to UFF as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

Etienne César Ribeiro de Oliveira

November/2006

Advisor: Célio Vinicius Neves de Albuquerque

The Brazilian government has been working to reduce social and digital exclusion rates by investing in a number of programs, such as the Connected Citizen – Computers for Everyone, Tele-centers, Digital Cities and the Brazilian Interactive Digital TV (IDTV) System, among others, each aiming at variable-sized groups of the population. Of those, Digital Cities and IDTV are the ones that can potentially reach a more significant number of Brazilians.

The Digital Cities program aims at providing free Internet access, as well as access to regional information sources such as the intranets of government agencies, research centers and universities, for instance. The Brazilian Interactive Digital TV (IDTV) System, on the other hand, aims at a greater interaction between the government and needy communities by offering them educational programs and access to government provided services, besides Internet access.

The Self-configurable wireless ad hoc networks have been considered an excellent alternative to the communication infrastructure required by both Digital Cities and Brazilian IDTV programs. The low cost of the transmission and reception units, the easy implementation and the possibility to reach wide areas depending on the technology used are some of the attributes that make such networks the most adequate option to those programs, besides the obvious technological advantage of not using cables.

This dissertation evaluates protocols designed for ad hoc networks and protocols designed for sensor networks when applied to Brazilian IDTV and Digital Cities, comparing their performances through simulations generated with the ns-2 (Network Simulator) in small, medium and large area scenarios.

The results of these experiments point to sensor protocols as the most promising alternative to traditional ad hoc network protocols for the infrastructure required by the Digital Cities and the Brazilian Interactive Digital TV (IDTV) programs, since their attributes are more efficient to point-multipoint and multipoint-point traffic.

Keywords: Digital Inclusion, Ad hoc Networks, Sensor Networks

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS	xviii
Abreviaturas e Acrônimos	xix
Capítulo 1 – Introdução	25
1.1 – Objetivos.....	29
1.2 – Organização da Dissertação	29
Capítulo 2 – Exclusão Social e Digital no Brasil	31
2.1 – Introdução.....	31
2.2 – A Questão da Exclusão Social e Digital.....	31
2.2.1 – IDH – Índice de Desenvolvimento Humano	31
2.2.2 – IDH-M – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal.....	32
2.2.3 – Índice de Exclusão Social (IES) e o Atlas da Exclusão Social	33
2.2.4 – Índices do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	35
2.2.5 – Mapa da Exclusão Digital	36
2.3 – Programas do Governo Federal	39
2.3.1 – Cidadão Conectado – Computador Para Todos	39
2.3.2 – Telecentros	40
2.3.3 – GESAC – Governo Eletrônico Serviço de Atendimento ao Cidadão	41
2.3.4 – Casa Brasil.....	42
2.3.5 – Iniciativas Promissoras do Governo.....	42
Capítulo 3 – TV Digital Interativa.....	44
3.1 – Introdução.....	44
3.1.1 – A TV Analógica no Brasil.....	46
3.1.2 – Conceitos Básicos	47
3.2 – Sistemas de Transmissão para TV Digital Interativa	49
3.2.1 – Sistemas Híbridos.....	50
3.2.2 – Modelo de Referência ITU-T.....	51
3.2.3 – Padrão ATSC.....	52
3.2.4 – Padrão DVB	53
3.2.5 – Padrão ISDB.....	55
3.3 – Componentes da TV Digital Interativa.....	56
3.3.1 – Interatividade.....	57

3.3.2 – URD – Unidade Receptora-Decodificadora.....	60
3.3.3 – Alternativas para o Canal de Interatividade	61
3.3.4 – Modelo de Camadas	63
3.4 – Aplicações para a TV Digital Interativa	64
3.4.1 – Datacasting	65
3.4.2 – Camada de Aplicação	65
Capítulo 4 – Cidades Digitais	69
4.1 – Casos de Sucesso no Brasil	70
4.1.1 – Piraí Digital	70
4.1.2 – Sud Mennucci.....	71
4.1.3 – Ouro Preto – Cidade Digital.....	72
4.1.4 – Parintins.....	72
4.2 – Redes <i>Mesh</i>	73
4.2.1 – Características das Redes Mesh	74
4.2.2 – Aplicações para Redes Mesh.....	75
4.2.2.1 – Rede Doméstica de Alta Velocidade	75
4.2.2.2 – Rede Metropolitana.....	76
4.2.2.3 – Automação Predial.....	78
4.3 – Casos de Sucesso de Redes <i>Mesh</i>	79
4.3.1 – V Mesh	79
4.3.2 – Taipei – Cidade Digital	80
4.3.3 – Mountain View.....	80
4.3.4 – Projeto ReMesh	81
Capítulo 5 – Redes <i>Ad hoc</i> Sem Fio	83
5.1 – Introdução.....	83
5.1.1 – Características das Redes Ad hoc Sem Fio	84
5.1.2 – Aplicações para as Redes Ad hoc Sem Fio	85
5.2 – Protocolos de Roteamento para Redes <i>Ad hoc</i> Sem Fio.....	85
5.2.1 – Protocolos Pró-Ativos	87
5.2.1.1 – DSDV – <i>High Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector Protocol</i> .	87
5.2.1.2 – OLSR – <i>Optimized Link State Routing Protocol</i>	89
5.2.2 – Protocolos de Roteamento Reativos.....	90
5.2.2.1 – DSR – <i>Dynamic Source Routing Protocol</i>	91

5.2.2.2 – AODV – <i>Ad hoc On-demand Distance Vector Protocol</i>	93
5.2.3 – Protocolos Híbridos.....	95
5.2.3.1 – ZRP – <i>Zone Routing Protocol</i>	96
Capítulo 6 – Redes de Sensores Sem Fio	98
6.1 – Introdução.....	98
6.1.1 – Características das Redes de Sensores Sem Fio.....	101
6.1.1.1 – Roteamento Centrado em Dados	102
6.1.1.2 – Agregação de Dados	102
6.1.1.3 – Aplicações Específicas.....	103
6.1.2 – Aplicações para as Redes de Sensores Sem Fio.....	103
6.2 – Protocolos de Roteamento para Redes de Sensores Sem Fio.....	105
6.2.1 – Endereçamento em RSSFs	105
6.2.2 – Protocolos de Roteamento Plano	107
6.2.2.1 – <i>Directed Diffusion</i>	107
6.2.2.1.1 – <i>Esquema de Endereçamento</i>	108
6.2.2.1.2 – <i>Interesses e Gradientes</i>	109
6.2.2.1.3 – <i>Propagação de Dados</i>	111
6.2.2.1.4 – <i>Reforço para Estabelecimento de Caminho e Poda</i>	112
6.2.2.1.5 – <i>Algoritmos de Difusão</i>	114
6.2.2.1.5.1 – <i>2PP (Two Phase Pull)</i>	114
6.2.2.1.5.2 – <i>Push</i>	115
6.2.2.1.5.3 – <i>1PP (One Phase Pull)</i>	116
6.2.3 – Protocolos de Roteamento Hierárquico.....	118
6.2.3.1 – HAR – <i>Hierarchy-Based Anycast Routing Protocol</i>	118
6.2.4 – Protocolos de Roteamento Geográfico.....	119
6.2.4.1 – GEAR – <i>Geographical and Energy Aware Routing</i>	119
Capítulo 7 – Simulações	120
7.1 – Escopo	120
7.2 – Cenários	121
7.2.1 – Complexo da Maré	122
7.2.2 – Morro do Adeus e do Piancó.....	125
7.2.3 – Morro Santa Marta	127
7.3 – Metodologia.....	129

7.4 – Resultados.....	134
7.4.1 – Ponto-Multiponto	134
7.4.1.1 – Atraso	135
7.4.1.2 – Percentual de Colisões	138
7.4.1.3 – Percentual de Perda por Congestionamento	142
7.4.1.4 – Percentual Total de Perdas.....	145
7.4.1.5 – Vazão	147
7.4.2 – Multiponto-Ponto	150
7.4.2.1 – Atraso.....	150
7.4.2.2 – Percentual de Colisões	154
7.4.2.3 – Percentual de Perda por Congestionamento	158
7.4.2.4 – Percentual Total de Perdas.....	161
7.4.2.5 – Vazão	163
Capítulo 8 – Conclusão	167
8.1 – Trabalhos Relacionados.....	170
8.2 – Contribuições.....	171
8.3 – Trabalhos Futuros	172
Bibliografia.....	173

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características Gerais dos Domicílios - PNAD de 2004 [BME 2006]	28
Figura 2 – IDHM-Educação, 2000 - 10 Maiores e Menores [PNUD 2004]	33
Figura 3 – Combinação de Dimensões e Indicadores do IES [Pochmann et al. 2004a]	34
Figura 4 – Exclusão Social no Brasil [Pochmann et al. 2004a]	35
Figura 5 – Inclusão Digital por Anos de Estudo [FGV 2003].....	37
Figura 6 – Mapa da Exclusão Digital [FGV 2003]	38
Figura 7 – Mapa da Luz [FGV 2003]	39
Figura 8 – Uso de Telecentros [RITS 2004].....	40
Figura 9 – Topologia GESAC [GESAC 2005]	42
Figura 10 – Jonh Logie Baird e a TV mecânica, Jornal “The Troy Record” (08/04/1927) e cena do filme “A Chegada de um trem a Ciotat” [TVhistory 2005]	45
Figura 11 – Formato 4:3 e formato 16:9 (Widescreen).....	48
Figura 12 – Combinação de resoluções [Mendes e Fasolo 2002]	49
Figura 13 – Comparação entre o sistema NTSC 4:3 e o HDTV 16:9 [Bastos 2005].....	51
Figura 14 – Modelo de Referência para TV Digital - ITU-T [Tome et al. 2001]	52
Figura 15 – Sistema ATSC [Tome et al. 2001]	53
Figura 16 – Sistema DVB [Tome et al. 2001].....	54
Figura 17 – Sistema ISDB [Tome et al. 2001]	56
Figura 18 – Estrutura Simplificada da TV Digital Interativa	57
Figura 19 – Seleção de cenas e ângulos [Bastos 2005]	59
Figura 20 – Unidade Receptora Decodificadora (URD) ou <i>Set Top Box</i> (STB).....	60
Figura 21 – Diagrama Simplificado do Canal de Interatividade [CPqD 2006].....	62
Figura 22 – Arquitetura do Subsistema Canal de Interatividade [CPqD 2006]	62
Figura 23 – Arquitetura em camadas da TV Digital [Fernandes et al. 2004].....	64
Figura 24 – Bill & Ben e Bob the Builder	66
Figura 25 – Sistema de Marcação de Consultas para TV Digital Interativa	67
Figura 26 – Rede Wireless Municipal [Sud Mennucci 2006]	71
Figura 27 – Instalação de uma antena WiMax na escola pública Lila Maia - Parintins [Intel 2006]	72
Figura 28 – Rede <i>Mesh</i> com múltiplas tecnologias [Akyildiz et al. 2005]	74
Figura 29 – Rede Doméstica de Alta Velocidade [Akyildiz et al. 2005]	76

Figura 30 – Rede metropolitana baseada em rede <i>mesh</i> sem fio [Akyildiz et al. 2005]	77
Figura 31 – Cobertura em Área com Baixa Densidade Populacional [Bruno et al. 2005]..	77
Figura 32 – Automação Predial com rede <i>mesh</i> sem fio [Akyildiz et al. 2005].....	78
Figura 33 – Arquitetura <i>V Mesh</i> [Tsarmopoulos et al. 2005].....	79
Figura 34 – Mapa de Cobertura de Google WiFi	81
Figura 35 – Protocolos de Roteamento para Redes <i>Ad hoc</i> [Abolhasan et al. 2004] e [Cordeiro e Agrawal 2002].....	86
Figura 36 – Construção do conjunto MPR [Abolhasan et al. 2004]	90
Figura 37 – <i>Route Request</i> do protocolo DSR [Royer e Toh 1999].....	92
Figura 38 – <i>Route Reply</i> do protocolo DSR [Royer e Toh 1999].....	93
Figura 39 – <i>Route Request</i> e <i>Route Reply</i> do protocolo AODV [Royer e Toh 1999].....	94
Figura 40 – Zona de Roteamento de 2 saltos [Haas e Pearlman 2001]	96
Figura 41 – Zona de Roteamento no Protocolo ZRP [Haas 1997].....	97
Figura 42 – Exemplos de Sensores (a) e (b) COTS Dust e (c) JPL com TinyOS [Loureiro et al. 2003] e [Zess 2006]	99
Figura 43 – Tipos de Rede Sem Fio [Loureiro et al. 2003].....	99
Figura 44 – Protocolos para RSSFs [Ruiz et al. 2004].....	100
Figura 45 – Roteamento Tradicional e Roteamento Centrado em Dados [Loureiro et al. 2003]	103
Figura 46 – Sensores para Monitoramento [JPL 2006].....	104
Figura 47 – Sensores para monitoramento de condições físicas [Loureiro et al. 2003]....	105
Figura 48 – Propagação de Interesse e Estabelecimento de Gradiente por inundação [Intanagonwiwat 2002].....	111
Figura 49 – Envio de reforço positivo e Dados pelo Caminho Reforçado [Intanagonwiwat 2002].....	113
Figura 50 – Mensagens do Algoritmo de Difusão 2PP [Silva et al. 2004a].....	115
Figura 51 – Mensagens do Algoritmo de Difusão Push [Silva et al. 2004a]	116
Figura 52 – Mensagens do Algoritmo de Difusão 1PP [Silva et al. 2004a].....	117
Figura 53 – Comunidades do Complexo da Maré [RioAtlas 2006].....	123
Figura 54 – Conectividade do Complexo da Maré.....	124
Figura 55 – Morro do Adeus e do Piancó [RioAtlas 2006].....	126
Figura 56 – Conectividade do Morro do Adeus e do Piancó.....	127
Figura 57 – Comunidade Santa Marta [RioAtlas 2006].....	128

Figura 58 – Conectividade do Morro Santa Marta	129
Figura 59 – Percentual de Cenários Desertos	132
Figura 60 – Complexo da Maré - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Atraso.....	136
Figura 61 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Atraso	137
Figura 62 – Morro Santa Marta - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Atraso.....	138
Figura 63 – Complexo da Maré - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Colisões	140
Figura 64 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Colisões.....	141
Figura 65 – Morro Santa Marta - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Colisões	141
Figura 66 – Complexo da Maré - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento	143
Figura 67 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento	144
Figura 68 – Morro Santa Marta - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento	144
Figura 69 – Complexo da Maré - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual Total de Perdas.....	145
Figura 70 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual Total de Perdas	146
Figura 71 – Morro Santa Marta - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual Total de Perdas.....	146
Figura 72 – Complexo da Maré - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Vazão	148
Figura 73 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Vazão	149
Figura 74 – Morro Santa Marta - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Vazão	149
Figura 75 – Complexo da Maré - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Atraso.....	151
Figura 76 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Atraso	153
Figura 77 – Morro Santa Marta - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Atraso.....	154
Figura 78 – Complexo da Maré - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Colisões	156
Figura 79 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Colisões.....	157

Figura 80 – Morro Santa Marta - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Colisões	158
Figura 81 – Complexo da Maré - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento	159
Figura 82 – Morro do Adeus e Piancó - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento	160
Figura 83 – Morro Santa Marta - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento	161
Figura 84 – Complexo da Maré - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual Total de Perdas.....	162
Figura 85 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual Total de Perdas	162
Figura 86 – Morro Santa Marta - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual Total de Perdas.....	163
Figura 87 – Complexo da Maré - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Vazão	164
Figura 88 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Vazão	165
Figura 89 – Morro Santa Marta - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Vazão	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução do Brasil [PNUD 2005]	32
Tabela 2 – Percentual de Evolução dos Sub-índices do IDHM-E de 1991 à 2000 [PNUD 2004]	33
Tabela 3 – Dados Consolidados da PNAD [BME 2006]	36
Tabela 4 – Dados Consolidados do Censo Demográfico de 2000 [BME 2006]	36
Tabela 5 – Distribuição de domicílios com bens duráveis por área urbana e área rural [BME 2006]	47
Tabela 6 – Formato de imagem [CPqD 2005].....	48
Tabela 7 – Distribuição de Habitantes e Domicílios por Comunidades do Complexo da Maré [BME 2006].....	122
Tabela 8 – Distribuição de Habitantes e Domicílios do Morros do Adeus e Piancó [BME 2006]	125
Tabela 9 – Distribuição de Habitantes e Domicílios do Morro Santa Marta [BME 2006]	127
Tabela 10 – Resumo das Simulações	170

Abreviaturas e Acrônimos

1PP	<i>One Phase Pull</i>
2PP	<i>Two Phase Pull</i>
8-PSK	<i>Eight-Level Phase Shift Keying</i>
8-VSB	<i>Eight-Level Vestigial Sideband</i>
ABR	<i>Associatively-Based Routing</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AODV	<i>Ad hoc On-demand Distance Vector</i>
AP	<i>Access Point</i>
API	<i>Application Program Interface</i>
ARA	<i>Ant-colony-based Routing Algorithm</i>
ATSC	<i>Advanced Television System Committee</i>
ATV	<i>Advanced Television</i>
BME	Banco Multidimensional de Estatísticas
BS	<i>Base Station</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CBRP	<i>Cluster-Based Routing Protocol</i>
CGSR	<i>Cluster-head Gateway Switch Routing</i>
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CSG	<i>Global State Routing</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance</i>
DDR	<i>Distributed Dynamic Routing</i>
DiBEG	<i>Digital Broadcasting Experts Group</i>
DREAM	<i>Distance Routing Effect Algorithm for Mobility</i>
DSDV	<i>Destination-Sequenced Distance-Vector</i>
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i>
DST	<i>Distributed Spanning Trees Based Routing Protocol</i>
DVB	<i>Digital Video Broadcasting</i>
DVR	<i>Digital Video Recorder</i>

EDTV	<i>Enhanced Definition Television</i>
ELG	<i>European Launching Group</i>
EPG	<i>Electronic Programming Guide</i>
ERB	Estação Rádio Base
ETV	<i>Enhanced Television</i>
EUA	Estados Unidos da América
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FORP	<i>Flow Oriented Routing Protocol</i>
FSR	<i>Fisheye State Routing</i>
GEAR	<i>Geographical and Energy Aware Routing</i>
GeoMote	<i>Geographic Multicast for Networked Sensors</i>
GESAC	Governo Eletrônico Serviço de Atendimento ao Cidadão
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPSR	<i>Greedy Perimeter Stateless Routing</i>
GSR	<i>Global State Routing</i>
HAR	<i>Hierarchy-Based Anycast Routing Protocol</i>
HD-MAC	<i>High Definition Multiplexed Analog Components</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
HDTV-T	<i>High Definition Television – Terrestrial</i>
HSR	<i>Hierarchical State Routing</i>
IARP	<i>IntraZone Routing Protocol</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICA	<i>Inter Cluster Routing Algorithm</i>
IDD	Inclusão Digital Doméstica
IDE	Inclusão Digital na Escola
IDEM	Inclusão Digital no Emprego
IDG	Inclusão Digital no Governo
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano

IDH-M	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IDHM-E	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal para Educação
IDHM-L	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal para Longevidade
IDHM-R	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal para Renda
IDN	Inclusão Digital no Negócio
IERP	<i>IntErzone Routing Protocol</i>
IES	Índice de Exclusão Social
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IFL	<i>Integrated Facility for Linux</i>
IID	Índice de Inclusão Digital
INEP	Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais
IRD	<i>Integrated Receiver Decoder</i>
ISDB	<i>Integrated Services Digital Broadcasting</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LAR	<i>Location-aided routing</i>
LDTV	<i>Low Definition Television</i>
LEACH	<i>Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>
LMR	<i>Light-weight Mobile Routing</i>
MAC	<i>Multiplexed Analog Components</i>
MANET	<i>Mobile Ad hoc Network</i>
MEC	Ministério da Educação
MEMS	<i>Micro-Eletro-Mechanical Systems</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MMWN	<i>Multimedia Support in Mobile Wireless Networks</i>
MPEG-2	<i>Moving Picture Experts Group-2</i>
MPEG-2 AAC	<i>Moving Picture Experts Group-2 Advanced Audio Coding</i>
MPEG-2:BC	<i>Moving Picture Experts Group-2 Backward Compatible</i>
MPEG-4 AVC	<i>Moving Picture Experts Group-4 Advanced Video Codec</i>
MPR	<i>Multipoint Relays</i>

MUSE	<i>Multiple Sub-Nyquist Sampling Encoding</i>
NPDU	<i>Network Protocol Data Unit</i>
NTSC	<i>National Television System Committee</i>
OLSR	<i>Optimized Link State Routing</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PAL	<i>Phase Alternation by Line</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistants</i>
PEGASIS	<i>Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PINTEC	Pesquisa Industrial de Inovação Tecnológica
PLC	<i>Power Line Communications</i>
PME	Pesquisa Mensal de Emprego
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
POF	Pesquisa de Orçamentos Familiares
PPV	Pesquisa de Padrões de Vida
PPV	<i>Pay-Per-View</i>
PROC	<i>Proactive Routing with Coordination</i>
PVR	<i>Personal Video Recorder</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RAIS	Relação Anual de Informações Sociais
RDH	Relatório de Desenvolvimento Humano
RDMAR	<i>Relative Distance Micro-discovery Ad hoc Routing</i>
RF	Rádio-Frequência
RFP	Requisição Formal de Proposta
RNP	Rede Nacional de Ensino e Pesquisa
ROAM	<i>Routing On-demand Acyclic Multi-path</i>
RREP	<i>Route Reply</i>

RREQ	<i>Route Request</i>
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
SAR	<i>Sequential Assignment Routing</i>
SBTVD	Sistema Brasileiro de Televisão Digital
SCADDS	<i>Scalable Coordination Architectures for Deeply Distributed Systems</i>
SDTV	<i>Standard Definition Television</i>
SECAM	<i>Séquentielle Couleur Avec Mémoire</i>
SHSW	Sistema Híbrido com Suporte <i>Wireless</i>
SLURP	<i>Scalable Location Update Routing protocol</i>
SPIN	<i>Sensor Protocols for Information via Negotiation</i>
SSA	<i>Signal Stability Adaptive</i>
SSR	<i>Signal Stability Routing</i>
STAR	<i>Source-Tree Adaptive Routing</i>
STFC	Sistema de Telefonia Fixa Comutada
STORM	<i>Self-organizing Topology Discovery and Maintenance/Adaptive Diffusion</i>
SUS	Sistema Único de Saúde
TBRPF	<i>Topology Broadcast Reverse Path Forwarding</i>
TEEN	<i>Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network</i>
TORA	<i>Temporally Ordered Routing Algorithm</i>
UCLA	<i>University of California, Los Angeles</i>
UFF	Universidade Federal Fluminense
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
URD	Unidade Receptora-Decodificadora
VDSL	<i>Very-High-Data-Rate Digital Subscriber Line</i>
VoD	<i>Video-on-Demand</i>
WEF	<i>World Economic Forum</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMax	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WMN	<i>Wireless Mesh Network</i>
WRP	<i>Wireless Routing Protocol</i>

ZHLS	<i>Zone-based Hierarchical Link State</i>
ZRP	<i>Zone Routing Protocol</i>

Capítulo 1 – Introdução

A cada dia fica mais notória a relação entre ter acesso à informação e entre as oportunidades de emprego e o relacionamento social. Na realidade, este paradigma sempre esteve presente na vida do ser humano, entretanto, com o advento da imprensa escrita e televisiva, assim como da informática, a distância entre aqueles que têm acesso à informação e aqueles que não têm acesso à informação tornou-se abissal.

No mundo moderno as transformações ocorrem em uma velocidade inimaginável para os nossos ancestrais e, manter-se informado e atualizado requer, cada vez mais, tempo e recursos. Ao observarmos os indivíduos por esta ótica, criamos uma nova forma de segregação, dividindo a humanidade em incluídos sociais e digitais e em excluídos sociais e digitais. De acordo com [Estivill 2003], na realidade esta segregação não é recente, pois em 1974, René Lenoir lançou a expressão “exclusão social” em sua obra *Les Exclus*, com o intuito de destacar a inabilidade da economia em incluir determinados grupos de indivíduos. Na realidade, o autor provavelmente não tinha consciência da abrangência da representatividade futura desta expressão, ensejando apenas ressaltar a incapacidade da economia em expansão de incluir determinados grupos de indivíduos. Estimava-se que, à época do lançamento da publicação, um em cada dez franceses encontrava-se excluído socialmente, sem acesso ou com acesso apenas parcial aos resultados econômicos e sociais, sendo esta a preocupação primordial do autor.

Podemos definir exclusão digital como a discriminação imposta a um ou mais grupos de indivíduos que, de alguma forma, encontram-se impedidos de ter acesso aos benefícios da tecnologia da informação, aumentando o *apartheid* social e elevando as diferenças entre os grupos de indivíduos excluídos e os grupos de indivíduos incluídos. Como a tecnologia da informação é considerada atualmente a base para se obter acesso ao conhecimento, as oportunidades para o grupo de excluídos estão cada vez mais restritas a trabalhos manuais e com baixa remuneração. Infelizmente, este problema atinge a grande maioria da população brasileira.

Alguns dos principais indicadores sociais, tais como os Índices de Desenvolvimento Humano (IDH e IDH-Municipal), o Índice de Exclusão Social (IES), o Atlas da Exclusão

Social e os resultados publicados pela Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) apresentados nesta dissertação, corroboram a necessidade de investimento em educação.

O Governo Federal vem se esforçando para reduzir o percentual de brasileiros que sofrem com os problemas das exclusões social e digital através de incentivos e investimentos em vários programas de alcances diferenciados, tais como Cidadão Conectado – Computador para Todos, Telecentros, Cidades Digitais, GESAC – Governo Eletrônico Serviço de Atendimento ao Cidadão, Projeto Casa Brasil, Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa etc. Dentre os projetos relacionados, dois se destacam em relação à capacidade de atingir uma quantidade significativa de brasileiros: Cidades Digitais e Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa.

Para que a população possa usufruir o projeto Cidades Digitais é imprescindível estar na sua área de cobertura, dispor de um microcomputador ou equipamento similar e, também, de um meio de comunicação que permita a conexão. O projeto Cidades Digitais deve prover acesso gratuito à Internet e, ainda, oferecer acesso a informações regionalizadas, tais como acesso à intranet de centros de pesquisa, órgãos do governo, universidades etc. Espera-se que, com acesso à informação, a população alvo possa se tornar parte dos grupos de incluídos digitais e sociais. Nos casos das comunidades mais carentes, haverá a necessidade do governo associar o uso de Telecentros com Cidades Digitais, provendo todos os recursos necessários para o acesso, assim como treinamento. O alcance do projeto Cidades Digitais é limitado pela área de cobertura e pelos recursos disponíveis à população.

Segundo dados da PNAD¹ de 2004 [BME 2006], 90,30% dos domicílios brasileiros têm um ou mais aparelhos de televisão, ou seja, o uso da televisão como instrumento para redução da exclusão social e digital teria um alcance extraordinário. A implantação do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa deverá possibilitar ao governo uma maior interação com a população mais carente, seja através de programas educativos interativos, seja pela oferta de novos serviços à população, além de prover o acesso à Internet. Deve-se ressaltar que o acesso à Internet, assim como os serviços interativos, requer um canal de comunicação entre o telespectador e a emissora ou o provedor de conteúdo.

¹ Dados obtidos da PNAD (Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios), realizada no último trimestre de 2004 e consolidados através do BME – Banco Multidimensional de Estatísticas (<http://ww.bme.ibge.gov.br>), acessado em Agosto de 2006. Na PNAD-2004 foram pesquisadas 139.157 unidades domiciliares distribuídas por todas as Unidades da Federação de um total estimado de 51.840.004 domicílios brasileiros. Estima-se que 43.850.472 ou 84,59% encontram-se em área urbana e que 7.989.532 ou 15,41% encontram-se em área rural. Não inclui domicílios da área rural de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Pará e Amapá.

Torna-se imprescindível um estudo sobre alternativas de viabilidades técnica e econômica para a definição de uma infra-estrutura de comunicação para o projeto Cidades Digitais e para o Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa, de forma que os referidos projetos possam, de fato, obter a abrangência desejada e atingir as metas de redução das exclusões social e digital planejadas pelo Governo Federal. Entre as alternativas mais comuns para a infra-estrutura estão a telefonia fixa convencional, a telefonia celular, a rede de energia elétrica, as redes sem fio, entre outras.

Com base nos dados obtidos pela PNAD de 2004 [BME 2006] e apresentados na Figura 1, podemos obter as seguintes informações:

- Telefonia fixa convencional – Cerca de 24.918.032 domicílios brasileiros ou aproximadamente 48,15% do total de domicílios dispõem de linhas telefônicas fixas convencionais e acusam a existência de televisão. Já cerca de 6.173.358 domicílios brasileiros ou aproximadamente 11,93% do total de domicílios dispõem de linhas telefônicas fixas convencionais e acusam a existência de microcomputador;
- Telefonia celular – Cerca de 24.145.157 domicílios brasileiros ou aproximadamente 46,66% do total de domicílios dispõem de linhas celulares e acusam a existência de televisão. Já cerca de 5.756.160 domicílios brasileiros ou aproximadamente 11,12% do total de domicílios dispõem de linhas celulares e acusam a existência de microcomputador;
- Rede de energia elétrica – Cerca de 46.581.043 domicílios brasileiros ou aproximadamente 92,94% do total de domicílios dispõem de rede de energia elétrica e acusam a existência de televisão. Já cerca de 6.322.940 domicílios brasileiros ou aproximadamente 12,62% do total de domicílios dispõem de rede de energia elétrica e acusam a existência de microcomputador.

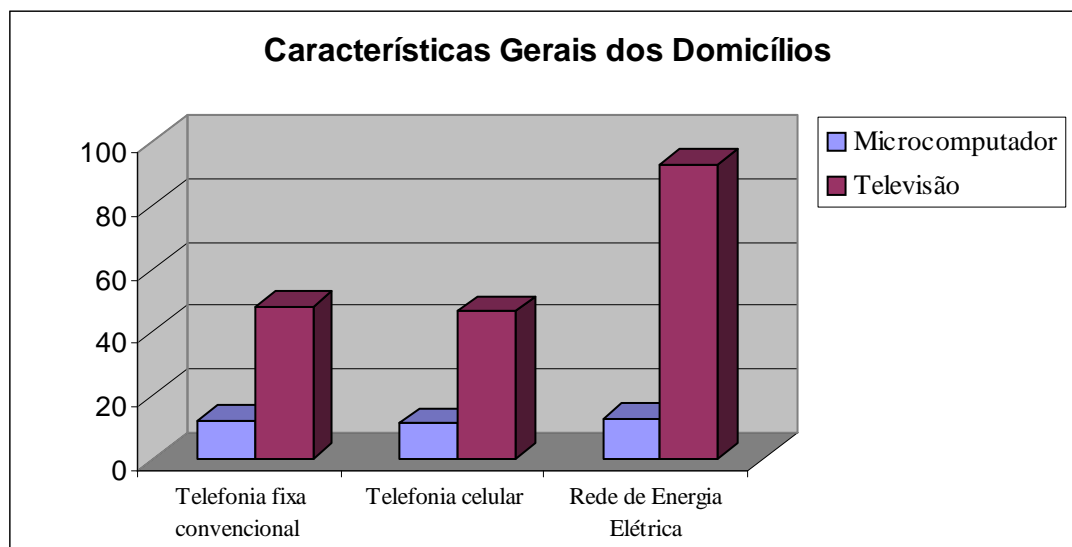


Figura 1 – Características Gerais dos Domicílios - PNAD de 2004 [BME 2006]

O poder de penetração da telefonia fixa convencional e da telefonia celular encontra-se aquém da expectativa traçada pelo Governo Federal. A tecnologia de transmissão de dados através de linhas de distribuição de energia elétrica (PLC – *Power Line Communications*) seria uma excelente solução, pois oferece o alcance desejado e praticamente não agregaria custo. Entretanto, as companhias de distribuição de energia elétrica ainda não se encontram preparadas para oferecer esta solução em larga escala.

As redes *ad hoc* sem fio autoconfiguráveis, cujas características, principais aplicações e principais protocolos encontram-se descritos no Capítulo 5 – Redes *Ad hoc* Sem Fio e no Capítulo 6 – Redes de Sensores Sem Fio, constituem uma excelente alternativa para prover a infra-estrutura de comunicação necessária à implantação do projeto Cidades Digitais e do projeto Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa. Além da vantagem tecnológica óbvia de não necessitar de cabos, o custo reduzido das unidades de transmissão e recepção, a facilidade de implementação e o vasto alcance de determinadas tecnologias são algumas das características que se encaixam nas diretrizes dos projetos destacados.

Protocolos para redes *ad hoc* são comumente utilizados no cenário das Cidades Digitais, assim como existem propostas para uso desta classe de protocolos para o canal de interatividade no cenário dos Sistemas de Televisão Digital Interativa [Campista et al. 2006]. O padrão de tráfego destes cenários pode ser fortemente caracterizado por:

- Ponto-Multiponto: No caso do Canal de Descida Complementar do Sistema de Televisão Digital Interativa, temos a emissora ou o provedor de conteúdo enviando

dados para os assinantes. No caso do *download* de dados da Cidade Digital, todos os dados serão encaminhados do ponto de acesso para as estações requisitantes;

- Multiponto-Ponto: No caso do canal de interatividade do Sistema de Televisão Interativa e do *upload* de dados através de pontos de acesso da Cidade Digital, temos todo o tráfego destinado a um único ponto. Este padrão de tráfego, em especial, indica um potencial para o uso de protocolos de redes de sensores, que são projetados com o intuito de enviar as informações coletadas para o nó que propagou o interesse.

1.1 – Objetivos

O objetivo desta dissertação é analisar o comportamento de protocolos de roteamento para redes *ad hoc* e o comportamento de protocolos de roteamento para redes de sensores, nos cenários cujo padrão de tráfego estabelecido seja aplicável ao Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa e às Cidades Digitais, mantendo-se o viés nas inclusões digital e social. Os protocolos AODV – *Ad hoc On-demand Distance Vector* [Perkins e Royer 1999], DSDV – *Destination-Sequenced Distance Vector* [Perkins e Bhagwat 1994] e DSR – *Dynamic Source Routing* [Johnson e Maltz 1996] para redes *ad hoc* e os algoritmos de difusão 1PP – *One Phase Pull* [Silva et al. 2004a], 2PP – *Two Phase Pull* [Silva et al. 2004a] e *Push* [Heidemann et al. 2003] do protocolo *Directed Diffusion* [Estrin et al. 1999, Intanagonwiwat et al. 2000] para redes de sensores são utilizados nas simulações.

Os resultados obtidos através das simulações foram analisados, possibilitando avaliar a aplicabilidade dos protocolos para redes *ad hoc* e dos protocolos para redes de sensores nos cenários dos projetos Cidades Digitais e Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa.

1.2 – Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em 8 capítulos, a saber:

- O capítulo 2 apresenta alguns dos principais índices nacionais e internacionais que apontam o nível de desenvolvimento das nações e o grau de exclusão social e exclusão digital. Nesse capítulo ainda são apresentados os principais programas do Governo Federal que objetivam minimizar os efeitos nocivos das exclusões social e digital, oferecendo oportunidades para que os cidadãos brasileiros de classes menos privilegiadas possam ter acesso à informação;

- O capítulo 3 descreve conceitos básicos sobre televisão digital interativa, detalha os principais sistemas de televisão digital interativa assim como os seus respectivos componentes e aplicações;
- O capítulo 4 apresenta o projeto Cidades Digitais e descreve, sucintamente, alguns casos de sucesso no Brasil e no exterior. Além disso, introduz alguns conceitos básicos sobre Redes *Mesh*, suas principais características e aplicações;
- O capítulo 5 aborda as redes *ad hoc* sem fio. Neste capítulo, os conceitos básicos, as características, as aplicações e alguns dos principais protocolos de roteamento para redes *ad hoc* sem fio são apresentados e detalhados. Do conjunto de protocolos apresentados, os protocolos AODV, DSR e DSDV são utilizados nas simulações para os cenários do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa e Cidades Digitais;
- O capítulo 6 provê o leitor com informações sobre as redes de sensores sem fio (RSSF), suas características, aplicações e alguns dos principais protocolos. O foco deste capítulo é abordar a mudança de paradigma das redes de sensores sem fio e, principalmente, o protocolo *Directed Diffusion* e seus algoritmos de difusão *One Phase-Pull* (1PP), *Two Phase-Pull* (2PP) e *Push*. Os algoritmos de difusão relacionados serão utilizados nas simulações para os cenários do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa e Cidades Digitais;
- O capítulo 7 descreve o escopo e a metodologia utilizados nas simulações para os cenários do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa e para as Cidades Digitais, e avalia os resultados das simulações em termos de atraso, vazão, perdas e conectividade;
- Por fim, o capítulo 8 apresenta a conclusão final desta dissertação, assim como propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Exclusão Social e Digital no Brasil

2.1 – Introdução

Inúmeros estudos e pesquisas publicados periodicamente demonstram a real necessidade de investimento para que a parcela mais carente da população brasileira seja capaz de ingressar no grupo de incluídos sociais e digitais. De acordo com [Oliveira e Albuquerque 2005b], o processo de aprendizagem para uso do computador e da Internet possibilitará a estes cidadãos o uso destes conhecimentos, beneficiando os seus próprios interesses e necessidades, assim como os interesses e as necessidades de sua comunidade.

O programa Cidadão Conectado – Computador para Todos, um dos programas subsidiados e financiados pelo Governo Federal, possibilita à camada da população de baixa renda a aquisição de computadores que poderão se conectar à Internet através do programa Cidades Digitais. Da mesma forma, a implantação do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa permitirá a interatividade dos telespectadores com inúmeros programas televisivos e com expectativa de acesso à Internet, favorecendo as inclusões social e digital da população de baixa renda. Dentre os programas mantidos pelo Governo Federal, estima-se que estes tenham o maior poder de penetração no grupo dos excluídos.

2.2 – A Questão da Exclusão Social e Digital

Os índices IDH, IDH-M e IES, assim como resultados obtidos de alguns trabalhos realizados pela Fundação Getúlio Vargas [FGV 2003] e pela Universidade Estadual de Campinas [Pochmann et al. 2004a, Pochmann et al. 2004b], apresentam informações relevantes à questão da exclusão social e digital. Em função desta relevância, estes indicadores encontram-se descritos nas subseções seguintes.

2.2.1 – IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

Até o surgimento do conceito de desenvolvimento humano, utilizava-se o valor do PIB *per capita* como métrica para quantificar o desenvolvimento de nações, regiões ou cidades. Em 1990, o economista paquistanês Mahbub ul Haq e o economista indiano Amartya Sen (Prêmio Nobel de Economia em 1998) criaram o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) com o intuito de retratar com mais fidelidade as características das condições de vida da

população. Além da questão da renda, o índice é composto pela expectativa de vida no momento do nascimento e a relação entre a taxa de alfabetização de adultos e a taxa de matrícula nos três níveis de ensino. O IDH é representado por valores que variam de 0 (nenhum desenvolvimento humano) a 1 (desenvolvimento humano total). Países com IDH até 0,499 são considerados de desenvolvimento humano baixo, já os países com índices entre 0,500 e 0,799 são considerados de desenvolvimento humano médio e, finalmente, países com índices maiores que 0,800 são considerados de desenvolvimento humano alto. Apesar de ter sido criado em 1990, o IDH foi calculado para todos os anos anteriores, até 1975 [PNUD 2005].

Tabela 1 – Evolução do Brasil [PNUD 2005]

RDH	POSIÇÃO NO RANKING	EXPECTATIVA DE VIDA	TAXA DE ALFABETIZAÇÃO	TAXA DE MATRÍCULA	PIB PER CAPITA (US\$)	IDH
2004	63	70,2 ANOS	88,4%	90%	7,918.00	0,790
2005	63	70,5 ANOS	88,4%	91%	7,790.00	0,792

De acordo com Relatório de Desenvolvimento Humano (RDH) de 2005, o Brasil ocupa a 63^a posição no *ranking* do IDH, mantendo-se na mesma posição anotada no RDH 2004. Embora o Brasil não tenha subido de posição, houve melhora nas dimensões Longevidade e Educação, mas piora na dimensão Renda, conforme dados da Tabela 1. Deve-se, ainda, ressaltar que o Brasil é a nação que mais galgou posições no IDH, considerando-se os cálculos realizados com dados a partir de 1975 [PNUD 2005].

2.2.2 – IDH-M – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal

O IDH-M, Índice de Desenvolvimento Humano Municipal, foi criado com objetivo de avaliar de forma mais precisa o nível de desenvolvimento dos municípios. O cálculo do IDH-M baseia-se na média aritmética dos indicadores de renda (IDHM-R), educação (IDHM-E) e longevidade (IDHM-L), da mesma forma que o IDH, porém adequado às características dos municípios [PNUD 2005].

Tabela 2 – Percentual de Evolução dos Sub-índices do IDHM-E de 1991 à 2000 [PNUD 2004]

REGIÃO	IDHM-E	TAXA DE ALFABETIZAÇÃO	TAXA DE FREQUÊNCIA AO ENSINO FUNDAMENTAL	TAXA DE FREQUÊNCIA AO ENSINO MÉDIO	TAXA DE FREQUÊNCIA AO ENSINO SUPERIOR
NORTE	17,30%	11,51%	26,74%	150,71%	178,75%
NORDESTE	25,56%	18,65%	43,63%	110,08%	78,14%
SUDESTE	10,04%	5,57%	14,86%	104,50%	66,06%
SUL	11,44%	4,67%	17,38%	120,33%	108,13%
CENTRO-OESTE	12,15%	6,79%	16,47%	109,69%	119,88%
BRASIL	13,96%	8,06%	24,90%	110,56%	72,67%

A Tabela 2 apresenta o percentual de evolução dos indicadores apurados através do IDHM-E de 1991 e do IDHM-E de 2000. Percebe-se, claramente, que houve evolução em todos os níveis, embora seja público e notório o quanto as diferenças sociais ainda permanecem marcantes.

Dos 10 municípios brasileiros com melhor IDHM-E, 9 encontram-se nas regiões Sul e Sudeste. Já em relação aos 10 piores municípios brasileiros, todos encontram-se nas regiões Norte e Nordeste, conforme pode ser observado na Figura 2.

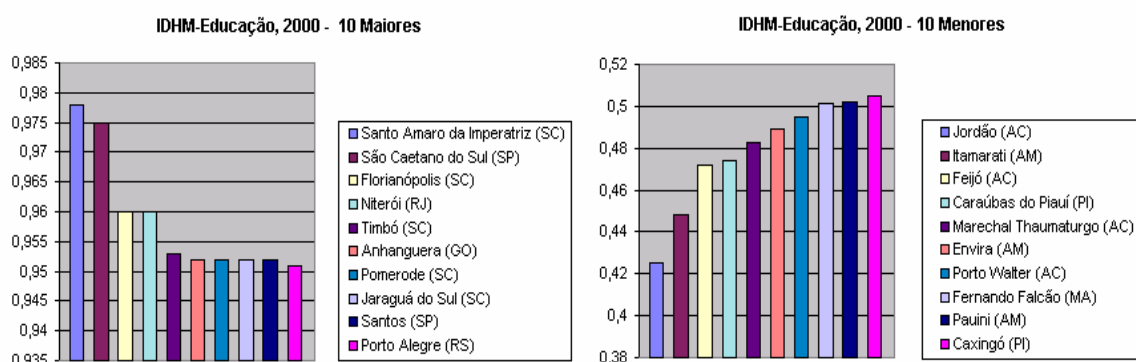


Figura 2 – IDHM-Educação, 2000 - 10 Maiores e Menores [PNUD 2004]

2.2.3 – Índice de Exclusão Social (IES) e o Atlas da Exclusão Social

O IES foi criado em 2002, na Unicamp, com o intuito de identificar o grau de desigualdade social existente nas diversas regiões do país e orientar a implantação de programas direcionados à inclusão social. O IES é composto por sete indicadores, a saber: pobreza, violência, escolarização, alfabetização, juventude, desemprego e desigualdade; estes

indicadores são apresentados na Figura 3. [Pochmann et al. 2004a] apresentaram, em uma visão macro, as dimensões da vida humana, que podem ser agrupadas em:

- Vida Digna – investiga o bem-estar material da população e é, na verdade, resultante de indicadores de pobreza, desemprego e desigualdade;
- Conhecimento – quantifica o acúmulo simbólico e cultural da população e é resultante dos índices de alfabetização e escolarização superior;
- Vulnerabilidade – apura a exposição da parcela mais jovem da população a situações caracterizadas pela violência e é composta por indicadores de homicídios e presença de população infantil nestes dados.

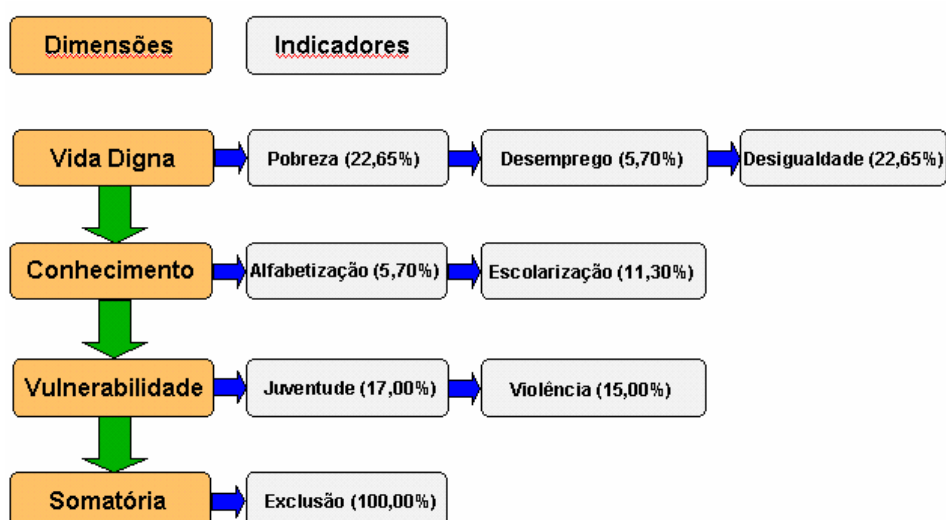


Figura 3 – Combinação de Dimensões e Indicadores do IES [Pochmann et al. 2004a]

Segundo [Pochmann et al. 2004a], apesar do Brasil ocupar a 63ª posição no *ranking* do IDH, classificando-se próximo ao terço superior entre as nações analisadas, ocupa apenas a 109ª posição no *ranking* do IES entre as 175 nações analisadas. Já em relação à desigualdade, o Brasil ocupa a 167ª posição, a 99ª posição em relação à taxa de desemprego e a 161ª posição em relação à taxa de homicídios. Esses indicadores posicionam o Brasil no mesmo nível de Serra Leoa e Guatemala em relação ao Índice de Exclusão Social e com taxas de homicídios superior a nações que encontram-se em guerra civil. Deve-se ressaltar que, na época (2003), o Brasil era a 15ª economia mundial (cálculo baseado no PIB – Produto Interno Bruto) e dona da 31ª maior renda *per capita* mundial [MRE 2006].

O Atlas da Exclusão Social – Agenda Neoliberal da Inclusão Social no Brasil, publicado no final de 2004, identificou os municípios brasileiros de Jordão (AC), Guarajá (AM) e Belágua (MA) com os piores IES e os municípios brasileiros de São Caetano do Sul (SP), Águas de São Pedro (SP) e Florianópolis (SC) com os melhores IES. O estudo revela, ainda, outros indicadores da desigualdade social existentes, tais como: 25% dos brasileiros vivem em situação precária, 42% dos municípios possuem altos índices de exclusão social, apenas 3,6% dos municípios possuem algum padrão adequado de atendimento social etc [Pochmann et al. 2004b].

A Figura 4 apresenta o processo evolutivo da Exclusão Social no Brasil. O aumento observado no ano de 2000 deve-se, principalmente, ao aumento do desemprego e do nível de violência crescente das principais capitais brasileiras, que não existiam na mesma proporção em 1980 e 1960 [Pochmann et al. 2004a].

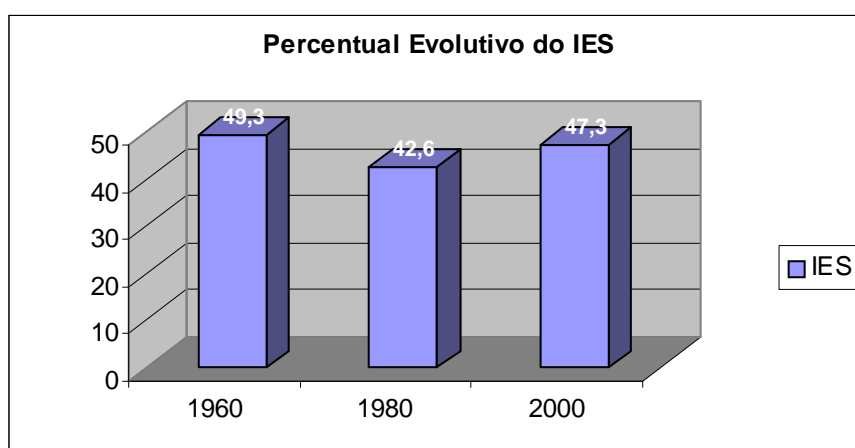


Figura 4 – Exclusão Social no Brasil [Pochmann et al. 2004a]

2.2.4 – Índices do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Dados consolidados na Tabela 3, obtidos a partir da série histórica de microdados da PNAD (Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio) realizada pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, apresentam um avanço, ainda que tímido, no percentual de domicílios com microcomputadores com e sem acesso à Internet. Já o percentual de domicílios com aparelhos de televisão manteve-se praticamente estável [BME 2006]. Esses dados corroboram a necessidade de manutenção de uma política governamental que incentive a aquisição de microcomputadores.

Tabela 3 – Dados Consolidados da PNAD [BME 2006]

DOMICÍLIOS	PNAD 2002	PNAD 2003	PNAD 2004
MICROCOMPUTADOR COM ACESSO À INTERNET	10,34%	11,45%	12,22%
MICROCOMPUTADOR SEM ACESSO À INTERNET	3,84%	3,83%	4,12%
SEM MICROCOMPUTADOR	85,82%	84,72%	83,66%
COM TELEVISÃO	89,99%	90,10%	90,32%
SEM TELEVISÃO	10,01%	9,90%	9,68%

Embora sejam menos recentes, os dados apurados do questionário amostra do Censo Demográfico de 2000 e exibidos na Tabela 4, cujo período de coleta ocorreu entre 1º de Agosto e 30 de Novembro de 2000, apresentam, com maior nitidez, o nível de desigualdade em relação à inclusão digital. Enquanto o percentual de domicílios com pelo menos um aparelho de televisão manteve-se praticamente constante, independente de se tratar de uma comunidade carente ou de um bairro de alta classe social, o percentual de microcomputadores deixa à mostra a questão da exclusão digital.

Tabela 4 – Dados Consolidados do Censo Demográfico de 2000 [BME 2006]

LOCALIDADE	COM MICROCOMPUTADOR	COM TELEVISÃO	COM LINHA TELEFÔNICA FIXA	COM ILUMINAÇÃO ELÉTRICA	POPULAÇÃO RESIDENTE / DOMICÍLIOS
MORRO SANTA MARTA (FAVELA – RJ)	5,07%	99,98%	43,34 %	100%	4.482 / 1.372
MORRO DO ADEUS E DO PIANCÓ (FAVELA – RJ)	2,25%	99,98%	13,78%	100%	2.993 / 817
COMPLEXO DA MARÉ (FAVELA – RJ)	2,70%	99,88%	12,14%	100%	12.558 / 3.707
RAMOS (BAIRRO – RJ)	21,31%	99,90%	73,87%	100%	37.535 / 11.818
BOTAFOGO (BAIRRO – RJ)	45,70%	99,82%	86,41%	100%	78.370 / 29.842
BARRA DA TIJUCA (BAIRRO – RJ)	68,23%	99,8%	94,07%	100%	92.068 / 30.606

2.2.5 – Mapa da Exclusão Digital

O Mapa da Exclusão Digital, publicado pela Fundação Getúlio Vargas em Abril de 2003, teve por objetivo divulgar informações acerca da exclusão digital no Brasil, com o intuito de proporcionar o aumento no número de indivíduos digitalmente incluídos.

Através da consolidação de dados coletados pela PNAD, foi possível obter o percentual de indivíduos com acesso a computadores e à Internet. Percebe-se, claramente, que o acesso à educação é um fator fundamental para as inclusões social e digital, pois à medida que os cidadãos brasileiros têm condições de prolongar o tempo de estudo, as oportunidades de crescimento profissional e social tornam-se mais amplas. A Figura 5 apresenta os valores consolidados a respeito da relação entre o tempo de estudo e o acesso a computadores e à Internet.

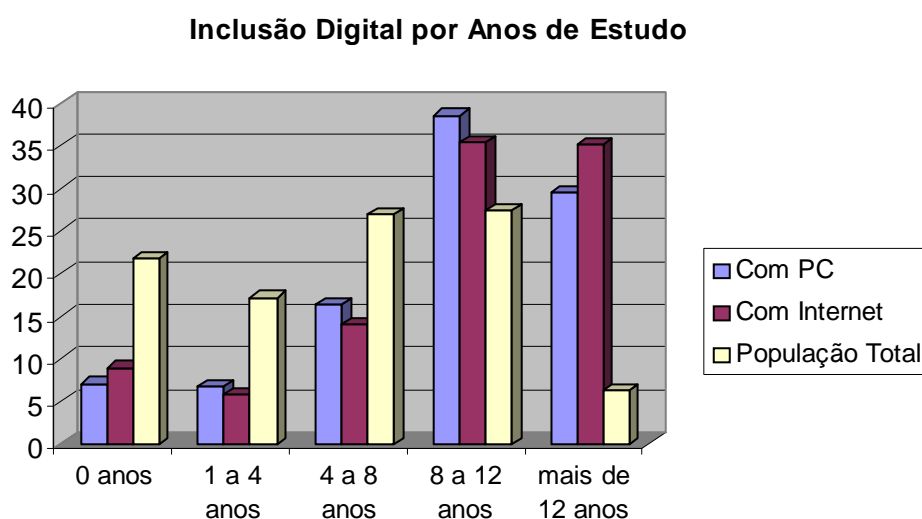


Figura 5 – Inclusão Digital por Anos de Estudo [FGV 2003]

A FGV criou uma metodologia capaz de medir o nível de inclusão digital através de uma base de dados composta por índices de pesquisas domiciliares (PNAD/IBGE, Censo Demográfico/IBGE, PME/IBGE, POF/IBGE, PPV/IBGE, PCV/SEADE), de registros administrativos e de pesquisas em estabelecimentos (MEC, RAIS, PINTEC/IBGE, ONU, WEF, etc). A partir do IID – Índice de Inclusão Digital, resultado do IDG (Inclusão Digital no Governo), IDE (Inclusão Digital na Escola), IDD (Inclusão Digital Doméstica), IDEM (Inclusão Digital no Emprego) e IDN (Inclusão Digital no Negócio) foi possível a construção do Mapa da Exclusão Digital apresentado pela Figura 6.

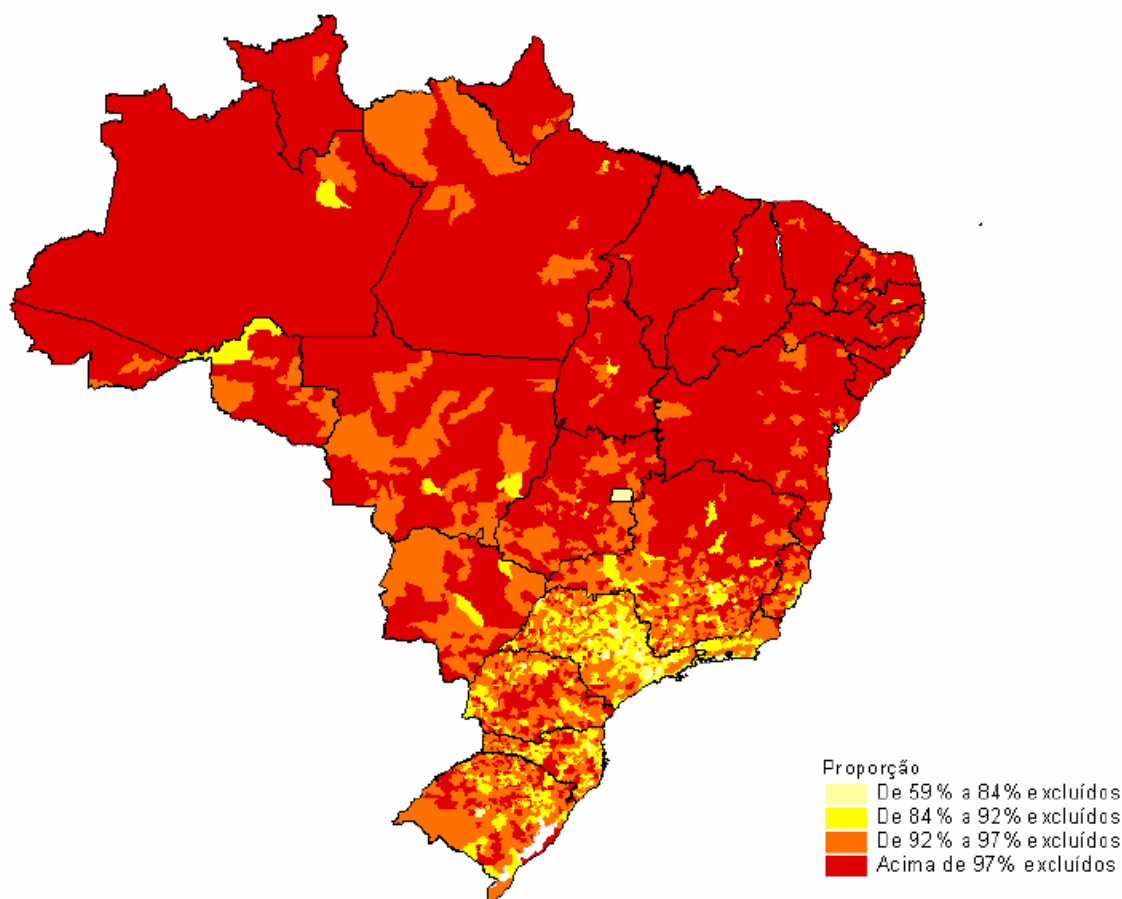


Figura 6 – Mapa da Exclusão Digital [FGV 2003]

Dados do Censo Demográfico de 2000, específicos do município do Rio de Janeiro, apontam os sub-distritos da Lagoa (59,23%), Barra da Tijuca (52,64%) e Botafogo (52,51%) como os três mais incluídos, enquanto que as comunidades da Maré (4,18%), Jacarezinho (3,93%) e do Complexo do Alemão (3,78%) encontram-se entre as três menos incluídas [FGV 2003]. No caso das áreas rurais e de favelas urbanas que apresentam, em sua maioria, uma taxa de exclusão digital superior a 90%, as redes sem fio poderiam prover a infra-estrutura necessária para se ter acesso à informação, reduzindo, desta forma, o nível de exclusão digital.

Um outro mapa, bastante interessante, é o mapa da luz que pode ser observado através da Figura 7. O fato da existência de luz, seja através de energia elétrica ou de qualquer outra fonte, indica a distribuição geográfica da população e algum nível de desenvolvimento, possibilitando a comparação, ainda que superficial, da conjuntura de todas as nações.



Figura 7 – Mapa da Luz [FGV 2003]

2.3 – Programas do Governo Federal

O Governo Federal vem se empenhando no combate às exclusões social e digital através de inúmeros programas. Alguns destes programas, tais como Cidadão Conectado - Computador para Todos, Telecentros, GESAC e Casa Brasil são apresentados nas subseções seguintes. A TV Digital Interativa e as Cidades Digitais serão discutidas, com maior detalhamento, nos capítulos 3 – TV Digital Interativa e 4 – Cidades Digitais, respectivamente.

2.3.1 – Cidadão Conectado – Computador Para Todos

O projeto Cidadão Conectado - Computador para Todos, instituído pelo Governo Federal através do decreto 5.542 de 20 de Setembro de 2005, permite a aquisição de computadores novos, com uma configuração específica para prover acesso à tecnologia da informação e sustentado por um programa especial de financiamento do Governo Federal. O projeto, além de promover a inclusão digital, tem como metas ampliar o acesso à Internet, aumentar a produção nacional de computadores, aumentar a informatização de pequenas empresas e, por consequência, a sua produção, reduzir o uso de *software* ilegal etc [SERPRO 2005].

O Computador para Todos virá configurado com mais de 20 aplicativos baseados em *software* livre, incluindo sistema operacional, editor de texto, planilha de cálculo, editor de

desenho, gravador de CD, cliente de e-mail, navegador, *firewall* pessoal, ferramenta de atualização automática, jogos e entretenimento etc.

2.3.2 – Telecentros

Os Telecentros são organizados em espaços públicos, idealizados através de parcerias entre o governo, seja do âmbito federal, estadual ou municipal, e as organizações não governamentais, a iniciativa privada e as próprias comunidades locais, possibilitando o acesso à tecnologia da informação para indivíduos que não dispõem de recursos e oportunidade de aprendizado.

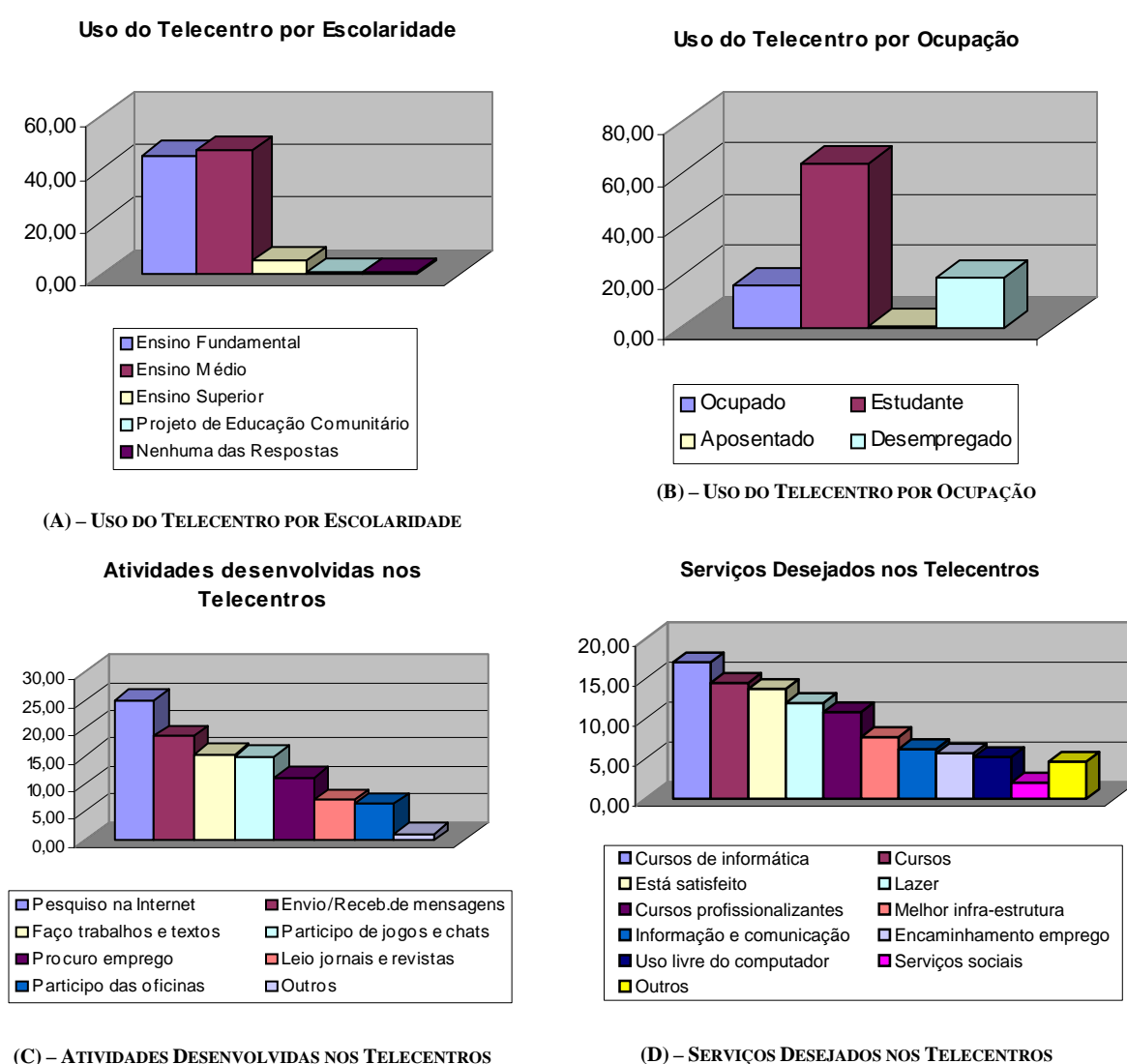


Figura 8 – Uso de Telecentros [RITS 2004]

Os alunos do ensino fundamental e do ensino médio, cuja ocupação principal é estudante, são os principais usuários dos Telecentros e buscam, em sua maioria, acesso à

Internet, como fonte de pesquisa e consulta para trabalhos escolares e como forma de melhorar o processo de aprendizagem. No entanto, os próprios usuários dos Telecentros reconhecem que não basta ter o recurso (computador e acesso à Internet) à disposição, pois a maioria clama por cursos de informática que possibilitem a utilização dos recursos disponíveis nos Telecentros com mais eficiência e, principalmente, voltados para o mercado de trabalho. Os gráficos apresentados pela Figura 8 comprovam esta análise [RITS 2004].

2.3.3 – GESAC – Governo Eletrônico Serviço de Atendimento ao Cidadão

O GESAC – Governo Eletrônico Serviço de Atendimento ao Cidadão é mais um programa de inclusão social do Ministério das Comunicações com objetivo de promover a inclusão digital, equipando comunidades carentes, escolas, sindicatos e organizações não governamentais com computadores e toda a infra-estrutura necessária para acesso à Internet. O acesso dos pontos de presença à rede do GESAC é disponibilizado através de uma conexão de 256 Kbps com antenas VSAT e cada ponto de presença dispõe, em média, de 7 computadores instalados exclusivamente com *software* livre [GESAC 2005].

Entre as comunidades atendidas por este programa encontra-se, por exemplo, a escola indígena Baniwa, no Alto do Rio Negro e a comunidade Quilombola de Ivaporunduva na região do Vale do Ribeira, no Estado de São Paulo, que possui 300 habitantes e o único canal de comunicação com a Internet é estabelecido via GESAC. A Figura 9 apresenta a topologia utilizada pelo programa [GESAC 2005].

O GESAC possui cerca de 18.000 computadores conectados a partir de aproximadamente 3.200 pontos de presença e atende a cerca de 4 milhões de brasileiros. Na cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, existem pontos de presença na Associação de Moradores do Bairro de Nova Brasília, no Centro Ação Comunitária Madre Tereza de Calcutá, na Vila Olímpica da Mangueira, no CEFET - RJ - Unidade General Canabarro etc [GESAC 2005].

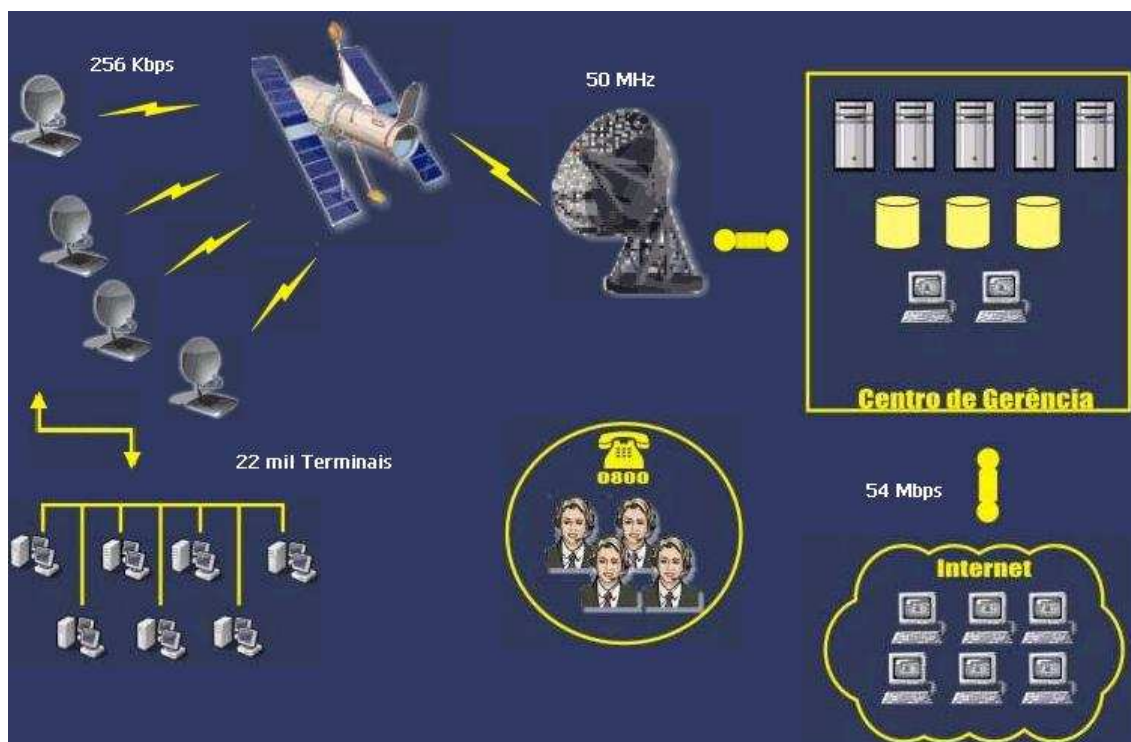


Figura 9 – Topologia GESAC [GESAC 2005]

2.3.4 – Casa Brasil

A Casa Brasil é mais um dos projetos de inclusão social e digital do Governo Federal lançado com o objetivo de alcançar a parcela mais carente da população brasileira, que efetivamente não dispõe de recursos para adquirir um computador ou para ter acesso à Internet. A previsão inicial é que sejam instaladas 90 unidades, sendo 55 nas capitais brasileiras, 7 unidades nas cidades mais populosas de cada região e as demais em cidades com mais de 700 mil habitantes [ITI 2005].

Cada unidade da Casa Brasil terá um telecentro com pelo menos 10 computadores com acesso público gratuito, além de sala de leitura e auditório. As unidades ficarão localizadas, preferencialmente, nas localidades com grande densidade populacional e níveis de violência e desemprego elevados [ITI 2005].

2.3.5 – Iniciativas Promissoras do Governo

Entre as iniciativas mais promissoras do Governo Federal encontra-se o Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa. Este novo paradigma permitirá à população brasileira ter acesso à informação, seja através da oferta de serviços governamentais, seja através da veiculação de aplicações educativas destinadas à formação de professores e alunos, como as apresentadas

pela TV Escola Interativa [Silva 2004b] que influenciam de forma positiva no processo de aprendizagem e nas inclusões social e digital, etc. Os conceitos básicos sobre televisão digital interativa, os principais sistemas de televisão digital interativa assim como os seus respectivos componentes e aplicações encontram-se detalhados no capítulo 3 – TV Digital Interativa.

As Cidades Digitais são erguidas com o intuito de atender às comunidades reais, oferecendo serviços de acordo com as necessidades da população, tais como comunicação entre pessoas e grupos, comunicação com o serviço público, acesso à Internet e, eventualmente, promovendo as inclusões social e digital. O capítulo 4 – Cidades Digitais aborda o projeto Cidades Digitais e descreve, sucintamente, alguns casos de sucesso no Brasil e no exterior. Além disso, introduz alguns conceitos básicos sobre Redes *Mesh*, suas principais características e aplicações.

Capítulo 3 – TV Digital Interativa

3.1 – Introdução

A preocupação de registrar fatos ocorridos está presente no ser humano desde as civilizações mais primitivas. Os registros mais antigos remontam à época em que vivíamos em cavernas e reverenciávamos os fatos mais marcantes desenhando nas paredes. A descoberta de um novo animal, as caçadas heróicas e os atos de bravura são exemplos clássicos de pinturas dos nossos antepassados.

Com a evolução natural da humanidade, foram desenvolvidas técnicas e materiais mais adequados, como telas, pincéis e tintas, com o objetivo de retratar fidedignamente cenas históricas, a beleza feminina, a magnitude de reis e o heroísmo de cavaleiros. O surgimento da fotografia permitiu a impressão em papel de momentos da realidade cotidiana.

Entretanto era preciso dar vida aos momentos captados através das lentes dos fotógrafos e dos pincéis dos artistas. Em 1894, Thomas Alvas Edison apresentou à sociedade científica um equipamento capaz de permitir a visualização de imagens em movimento a um único observador, o cinetoscópio. Um ano depois, em 1895, os irmãos Auguste e Louis Lumière criaram, a partir do aperfeiçoamento do cinetoscópio, o cinematógrafo, possibilitando a projeção de imagens. A primeira exibição pública foi marcada pela fuga de inúmeros espectadores amedrontados pela visão de um trem que deslocava-se em direção à platéia em “A Chegada de um trem a Ciotat”, representada através da Figura 10. Por fim, a década de 1920 ficou marcada por experiências que culminaram com nascimento da televisão [Name 2003]. Conforme pode ser observado na Figura 10, em 1924 Jonh Logie Baird demonstrou um sistema mecânico de televisão analógica com a transmissão de uma imagem estática, porém somente em 1936, na Inglaterra, a BBC de Londres efetuou a primeira transmissão em canal aberto.

A partir de uma visão macroscópica, um sistema de televisão pode ser decomposto em 3 componentes, a saber:

- A produção do programa engloba as etapas de gravação das cenas, edição nos casos onde o programa não for ao vivo e transmissão de uma unidade externa até a emissora, além do processo de armazenagem;

- Após a produção do programa, torna-se necessário transmiti-lo para os telespectadores através de sistemas de transmissão analógicos ou digitais;
- Complementando os componentes, temos a televisão e os dispositivos necessários para recepção do sinal transmitido pela emissora.



Figura 10 – Jonh Logie Baird e a TV mecânica, Jornal “The Troy Record” (08/04/1927) e cena do filme “A Chegada de um trem a Ciotat” [TVhistory 2005]

Apesar da primeira transmissão em cores com sistema analógico nos EUA ter sido realizada em 1929, as transmissões regulares em cores somente foram iniciadas em 1954. O padrão utilizado para as transmissões em preto e branco foi modificado, dando origem a um novo sistema de transmissão, o NTSC (*National Television System Committee*). Bem mais tarde, em 1967, a Alemanha passa a utilizar o sistema PAL (*Phase Alternation by Line*) e a França o sistema SECAM (*Séquentielle Couleur Avec Mémoire*) [TVhistory 2005].

Na década de 1990 surge, então, a TV digital, como a evolução da TV analógica, permitindo, principalmente, uma melhoria significativa na qualidade das transmissões de vídeo e áudio e, ainda, interatividade com os telespectadores, recepção do sinal em aparelhos móveis, e a possibilidade de uma mesma emissora transmitir, em um único canal, diversos programas.

Para que seja possível entender corretamente como as imagens projetadas pelo cinema e pela televisão são interpretadas, é necessário observar alguns detalhes importantes acerca do organismo humano. Células especiais, denominadas cones e bastonetes que encontram-se localizadas no olho humano, são responsáveis pela percepção da visão. De uma forma simplista, é possível afirmar que, em função de uma característica especial conhecida por persistência da visão, o olho humano é capaz de reter, por um período mínimo de tempo, uma imagem captada. Logo, torna-se possível enganar o cérebro humano através da exposição, em

intervalos fixos de tempo, de inúmeras imagens sobrepostas. Baseado nesta afirmativa, podemos concluir que as filmadoras são, na realidade, máquinas fotográficas especiais, que fotografam várias vezes por segundo as cenas filmadas. No momento da projeção, cria-se a ilusão de que os personagens encontram-se em movimento [Fernandes et al. 2004].

A exposição de 15 quadros (fotografias) por segundo já é suficiente para que o cérebro humano identifique a presença de movimento, entretanto para se obter uma qualidade ideal, torna-se necessário expor o olho humano a uma taxa de pelo menos 24 quadros por segundo. Nos monitores tradicionais, as imagens são formadas nos aparelhos de televisão através do bombardeamento de energia nos átomos de fósforo que, ao serem excitados, emitem luz e depois voltam ao estado normal. Torna-se, então, necessário bombardear os átomos de fósforo com uma frequência mínima por segundo, de forma que o olho humano não perceba que o átomo de fósforo se apagou [Fernandes et al. 2004].

A magia da televisão foi capaz de encantar os telespectadores, que apesar de terem consciência que estavam vendo imagens ilusórias, compostas de cenários e atores, deixavam-se enganar e encaravam as transmissões como a mais fiel realidade. Essa relação de dependência tornou a televisão um sucesso inquestionável, capaz de alcançar todos os países do mundo, independente de quesitos fundamentais como cultura, raça, religião e poder econômico.

3.1.1 – A TV Analógica no Brasil

Durante uma feira realizada no Rio de Janeiro, no ano de 1939, ocorreu a primeira transmissão de televisão no sistema analógico em ambiente fechado no Brasil. As primeiras transmissões abertas somente ocorreram a partir de 1948, ainda em fase de teste, com a transmissão de cenas do Congresso Eucarístico e de um jogo de futebol entre as agremiações do Bangu (Rio de Janeiro) e do Tupy (Juiz de Fora). Em 1950 foi inaugurada a primeira emissora de televisão brasileira, a TV Tupi de São Paulo. A evolução para o sistema de cores somente ocorreu em 1972.

Desde então, a televisão tornou-se um dos bens de consumo mais desejados em todo o mundo, principalmente no Brasil, presente em inúmeros lares em todas as camadas da população. Segundo dados coletados em 2004 pela PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios, a televisão está presente no território brasileiro em 94,02% dos domicílios de

área urbana, ou seja, em 41.230.035 domicílios. Em relação à área rural, a televisão encontra-se presente em 68,88% dos domicílios, alcançando 5.503.085 domicílios. O percentual de penetração dos aparelhos de televisão em áreas urbanas é superior ao de rádios e de geladeiras, sendo inferior somente a presença de fogões. Já nas áreas rurais, existem mais domicílios com rádio e fogão que com aparelhos de televisão e geladeiras. Os dados apresentados pela Tabela 5 fornecem a medida exata do nível de importância da televisão, seja por ser um instrumento capaz de formar opiniões, seja por razões culturais, razões financeiras ou simplesmente por proporcionar entretenimento [Oliveira e Albuquerque 2005a].

Tabela 5 – Distribuição de domicílios com bens duráveis por área urbana e área rural [BME 2006]

PNAD	TELEVISÃO		FOGÃO		GELADEIRA		RÁDIO	
	ÁREA RURAL	ÁREA URBANA	ÁREA RURAL	ÁREA URBANA	ÁREA RURAL	ÁREA URBANA	ÁREA RURAL	ÁREA URBANA
2004	68,88%	94,02%	97,34%	98,31%	61,24%	91,98%	80,83%	88,88%
2003	68,27%	93,49%	97,06%	99,01%	60,86%	91,58%	82,58%	88,51%

3.1.2 – Conceitos Básicos

A imagem projetada em um monitor de televisão possui características próprias que definem a resolução e, em função da qualidade, permite que a imagem seja classificada. Entre as características que podem ser avaliadas encontramos o número de linhas horizontais e verticais, o formato da tela, o número de quadros por segundo e o tipo de varredura.

O número de quadros por segundo descreve a quantidade de imagens que são apresentadas no monitor no intervalo de um segundo. A varredura do monitor representa a forma como a imagem é reconstruída de acordo com a frequência de quadros da transmissão. Nas varreduras entrelaçadas, alterna-se a exibição de linhas pares com linhas ímpares, enquanto que na varredura progressiva, a imagem é reconstruída seqüencialmente. O formato da tela é mais uma característica que influencia na qualidade da imagem apresentada. A Figura 11 apresenta a mesma imagem vista sob o formato 16:9 (*widescreen*) e no formato 4:3. Podemos perceber que o formato 16:9 é capaz de apresentar partes da imagem inexistentes no formato 4:3.

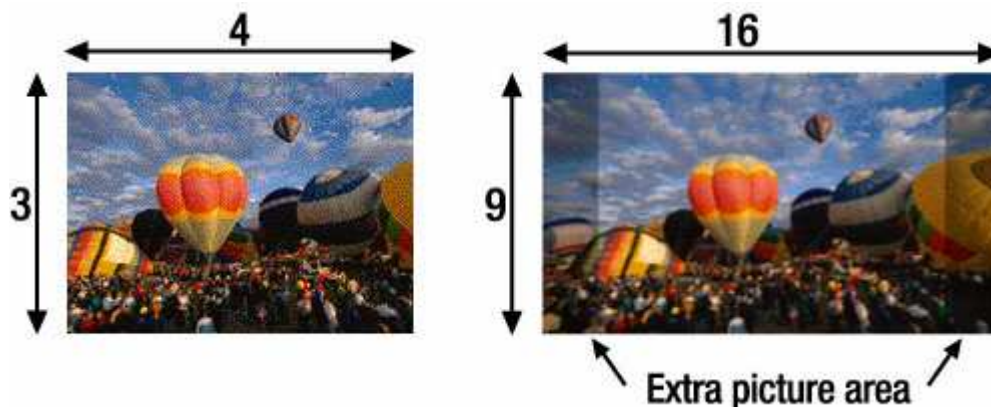


Figura 11 – Formato 4:3 e formato 16:9 (Widescreen)

Em função das características relacionadas acima, podemos classificar o formato das imagens em SDTV (*Standard Definition Television*), EDTV (*Enhanced Definition Television*) e HDTV (*High Definition Television*). A SDTV possui uma definição similar à da televisão analógica e, apesar de utilizar comumente o formato 4:3, pode ser utilizado o formato 16:9. O formato HDTV oferece definição superior, enquanto o formato EDTV apresenta uma resolução intermediária. A Tabela 6 apresenta algumas características dos formatos apresentados. Na coluna “Quadros por segundo e tipo de varredura”, os valores xyp representam a quantidade de quadros apresentada de forma progressiva e os valores xxe representam a quantidade de quadros apresentada de forma entrelaçada.

Tabela 6 – Formato de imagem [CPqD 2005]

Qualidade	Nº de linhas horizontais	Nº de linhas verticais	Formato de tela	Quadros por segundo e tipo de varredura
HD	1080	1920	16:9	24p, 30e, 30p
HD	720	1280	16:9	24p, 30p
ED	480	853	16:9	24p, 30p
SD	480	853	16:9	30e
SD	480	640	4:3	30e

Em relação à ocupação do espectro disponível para transmissão, é possível fazer um uso eficiente, misturando os formatos. Na Figura 12, o campo D representa o espectro reservado para a transmissão de dados para o usuário, permitindo o uso desta faixa do espectro de transmissão como canal de interatividade ou para permitir acesso à Internet através da televisão.

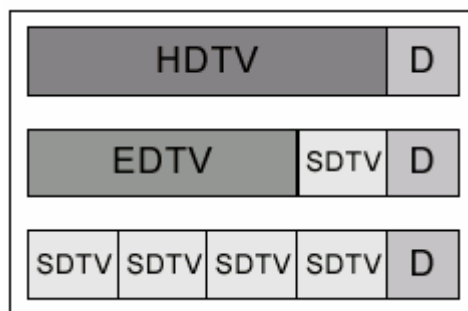


Figura 12 – Combinação de resoluções [Mendes e Fasolo 2002]

Os meios de difusão mais comuns para o conteúdo produzido pelas emissoras, direcionado aos receptores, são via satélite, cabo e difusão terrestre (radiodifusão).

[Becker e Montez 2004] afirmam que as plataformas baseadas em cabos possuem como grande vantagem uma largura de banda normalmente superior à necessária, tanto para o canal de difusão, quanto para o canal de interatividade. A grande desvantagem do uso do cabo está relacionada ao alcance de transmissão, já que é necessário lançar cabos da emissora até o receptor. Os EUA constituem uma exceção a esta regra, pois mais de 80% dos lares americanos assistem televisão através de TV a cabo. Já as plataformas baseadas em satélite têm como vantagem as principais desvantagens da plataforma baseada em cabos: o alcance e a inexistência de custo intermediário para retransmissão do sinal. O principal problema desta plataforma está relacionado ao canal de interatividade, indispensável para serviços interativos. Por fim, em relação à plataforma de difusão terrestre, a grande vantagem está relacionada ao fato de que as emissoras de televisão aberta fazem uso desta plataforma para transmitir seus programas. Logo, uma migração gradual do sistema analógico para o sistema digital seria menos traumática para os usuários. No entanto, a ausência de um canal de interatividade e a largura de banda estreita são duas grandes desvantagens desta plataforma. Como pode ser facilmente comprovado, a radiodifusão terrestre tem bem menos canais que as plataformas por satélite e por cabo.

3.2 – Sistemas de Transmissão para TV Digital Interativa

O sistema analógico NTSC, que foi desenvolvido nos EUA e que foi o primeiro sistema de transmissão a cores do mundo, forma as imagens através da transmissão constante de 30 quadros por segundo com 525 linhas. Neste sistema, os quadros são divididos em campos

pares, que contêm somente as linhas pares da imagem, e campos ímpares, que contêm as linhas ímpares. Logo, para que seja possível alcançar a taxa de 30 quadros por segundo, torna-se necessário a transmissão de 60 campos, sendo 30 pares e 30 ímpares. Esta forma de transmissão evita a ocorrência de cintilação. Já nos sistemas analógicos SECAM e PAL as imagens são formadas com 625 linhas, através da transmissão constante de 25 quadros por segundo, com 50 campos alternados e entrelaçados. As 100 linhas a mais destes sistemas proporcionam uma melhor definição da imagem quando comparada com aquela gerada pelo sistema NTSC mas, devido à taxa inferior, é possível perceber a ocorrência de pequenas trepidações. O sistema analógico PAL-M, uma variação do sistema PAL desenvolvido no Brasil, forma imagens com 525 linhas, 30 quadros por segundo, frequência de 60 Hz e necessita de uma largura de banda de 6 MHz [Fernandes et al. 2004].

3.2.1 – Sistemas Híbridos

Segundo [Tome et al. 2001] e [Usui et al. 1996], com o intuito de aprimorar a qualidade da imagem e do som providos pelos sistemas analógicos, pesquisadores japoneses apresentaram, no início da década de 1980 um novo padrão batizado de MUSE (*Multiple Sub-Nyquist Sampling Encoding*). Este padrão possibilitava a transmissão de imagens em alta definição com som de qualidade superior e, ainda, uma tela de dimensões também superiores, aproximando a televisão do cinema. Apesar da complexidade e do custo do projeto, o primeiro sistema de televisão de alta definição (HDTV – *High Definition Television*) MUSE entrou em operação comercial ainda na década de 1980, tendo sido implementado em canais de 27 MHz para transmissões via satélite. Cabe ressaltar que o MUSE misturava o uso de subportadoras analógicas com técnicas de processamento digital.

Da mesma forma que o padrão japonês, o padrão MAC (*Multiplexed Analog Components*), desenvolvido na Europa, combinava técnicas analógicas e digitais. As características de alta definição foram providas pelo padrão HD-MAC, operando, da mesma forma, em canais de 27 MHz que são ideais para transmissão via satélite. Em paralelo ao desenvolvimento do padrão MAC, outros padrões europeus foram surgindo, tais como o Spectre na Inglaterra, o HDTV-T na Alemanha etc [Tome et al. 2001].

A dificuldade tecnológica para obter um sistema de alta definição impulsionou o surgimento de alguns padrões intermediários, tais como ATV (*Advanced Television*), ETV (*Enhanced Television*) e EDTV (*Enhanced Definition Television*). Apenas para efeito de

comparação, podemos observar na Figura 13 a diferença de nitidez entre a imagem produzida pelo sistema NTSC e pelo formato HDTV.

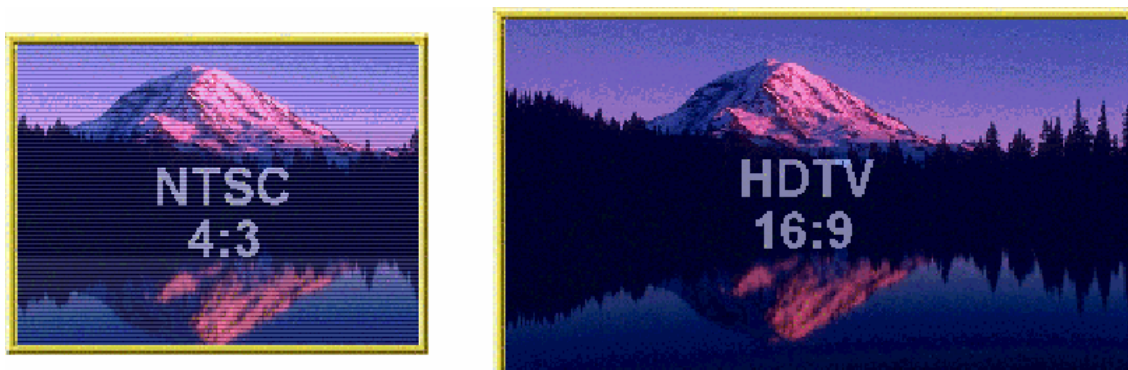


Figura 13 – Comparação entre o sistema NTSC 4:3 e o HDTV 16:9 [Bastos 2005]

3.2.2 – Modelo de Referência ITU-T

O modelo de referência para TV Digital, proposto pelo ITU-T e adotado pelos padrões ATSC (*Advanced Television System Committee*), DVB (*Digital Video Broadcasting*) e ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*), agrupa as funcionalidades do sistema de transmissão em três blocos distintos [Tome et al. 2001]:

- Codificação de sinal-fonte – Grupo responsável pela conversão e compressão de sinais de áudio e vídeo em feixes digitais denominados de fluxos elementares de informação;
- Multiplexação de sinais – Grupo responsável pela multiplexação dos diferentes fluxos elementares, sejam fluxo de áudio, vídeo ou dados, formando um único feixe digital de saída;
- Codificação de canal e modulação – Grupo responsável por converter o feixe digital previamente multiplexado em um sinal (ou grupo de sinais) capaz de ser transmitido em um meio físico.

A Figura 14 apresenta a estrutura do modelo de referência citado.

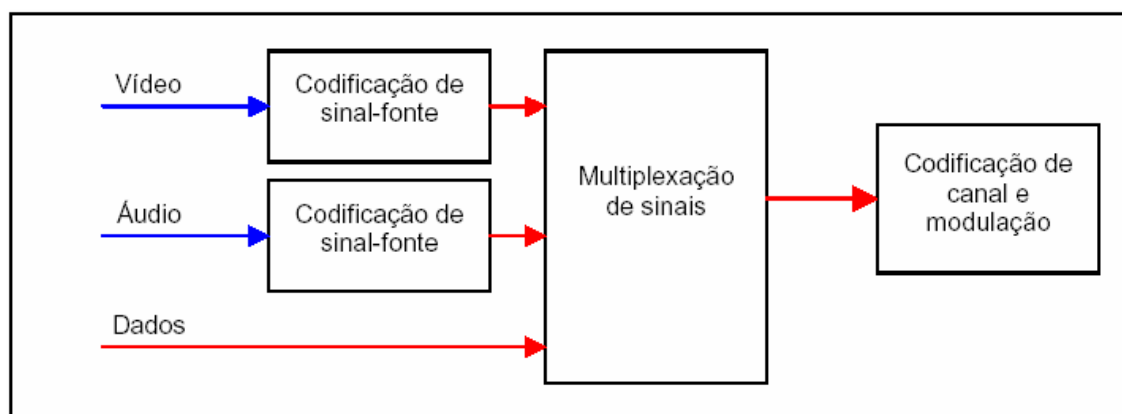


Figura 14 – Modelo de Referência para TV Digital - ITU-T [Tome et al. 2001]

3.2.3 – Padrão ATSC

No final da década de 1980, o governo norte-americano e as emissoras de televisão identificaram a necessidade de desenvolvimento de um padrão para transmissões digitais. Em 1996, o FCC (*Federal Communications Commission*) adotou o padrão ATSC (*Advanced Television System Committee*) [ATSC 2006]. Conforme [Wu et al. 2000], o padrão norte-americano ATSC foi desenvolvido pelo *Advanced Television System Committee* com o intuito de possibilitar a transmissão de sinais de áudio e vídeo em HDTV. [Tome et al. 2001] e [Fernandes et al. 2004] descrevem o mapeamento das funcionalidades do padrão ATSC, em conformidade com o modelo de referência do ITU-T, de acordo com as definições abaixo:

- Codificação de sinal-fonte – A codificação do sinal de vídeo é provido pelo padrão MPEG-2 Vídeo e a codificação do sinal de áudio pelo sistema Dolby AC-3;
- Multiplexação de sinais – A multiplexação de sinais é provida pelo MPEG-2 Sistemas, produzindo um fluxo de 19,39 Mbps;
- Codificação de canal e modulação – O ATSC pode operar em canais de 6 MHz, 7 MHz ou 8 MHz e utiliza a modulação 8-VSB para rádio-difusão terrestre (com taxa de transmissão de 19,8 Mbps), a modulação 64 QAM para transmissão a cabo e a modulação QPSK para transmissão via satélite.

A Figura 15 apresenta um esquema dos padrões e modulações utilizados pelo ATSC.

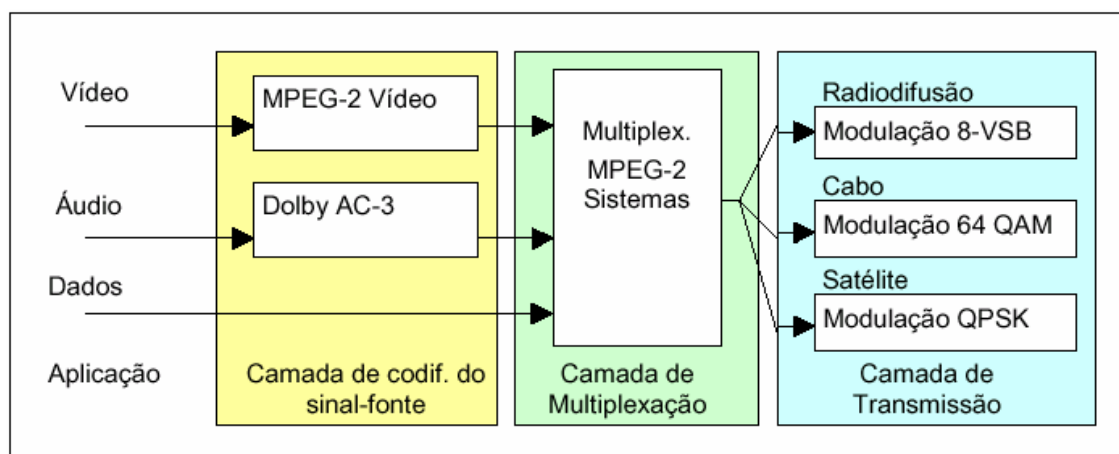


Figura 15 – Sistema ATSC [Tome et al. 2001]

[Batista 2005], [Bolaño e Vieira 2004] e [Fernandes et al. 2004] afirmam que o padrão ATSC apresenta deficiências tecnológicas importantes em relação à radiodifusão, pois a modulação 8-VSB dispõe de baixa robustez, provocando problemas na recepção em aparelhos fixos localizados em áreas com presença de interferência e em aparelhos portáteis com antena interna. Como na época do desenvolvimento da modulação 8-VSB a telefonia móvel ainda não havia adquirido a importância dos dias de hoje, o objetivo principal a ser alcançado era oferta de vídeos em alta definição. Embora tenha ocorrido uma evolução dos receptores 8-VSB, a utilização da modulação 8-VSB em aparelhos móveis ainda permanece prejudicada.

3.2.4 – Padrão DVB

A necessidade de efetuar um estudo de viabilidade para implantação de um sistema de transmissão digital na Europa propiciou a criação do ELG (*European Launching Group*), composto por órgãos reguladores, emissoras de televisão e produtoras de equipamentos eletrônicos. Em 1995, o ELG passou a se chamar DVB (*Digital Video Broadcasting*) [DVB 2006]. O padrão DVB foi desenvolvido com o intuito de prover um padrão único para vários países europeus, independente das peculiaridades das nações européias. [Tome et al. 2001] e [Fernandes et al. 2004] descrevem o mapeamento das funcionalidades do padrão DVB, em conformidade com o modelo de referência do ITU-T, de acordo com as definições abaixo:

- Codificação de sinal-fonte – A codificação do sinal de vídeo é provida pelo padrão MPEG-2 Vídeo e a codificação do sinal de áudio pelo padrão MPEG-2 Áudio:BC;
- Multiplexação de sinais – A multiplexação de sinais é provida pelo MPEG-2:BC Sistemas;

- Codificação de canal e modulação – O DVB utiliza a modulação COFDM para rádio-difusão terrestre, podendo operar em canais de 6 MHz, 7 MHz ou 8 MHz com taxa de transmissão de até 19,8 Mbps e em 2 modos de operação, conhecidos por 2k e 8k. Já a modulação QAM é utilizada para transmissão a cabo (variando de 16, 32, 64, 128 e 256 QAM) e a modulação QPSK (códigos convolucionais com relação 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8) para transmissão via satélite. No caso da difusão terrestre por microondas com frequência abaixo de 10 GHz, recomenda-se a modulação QAM; já para frequências superiores a 10 GHz, a modulação recomendada é a QPSK.

A Figura 16 apresenta um esquema dos padrões e modulações utilizados pelo DVB.

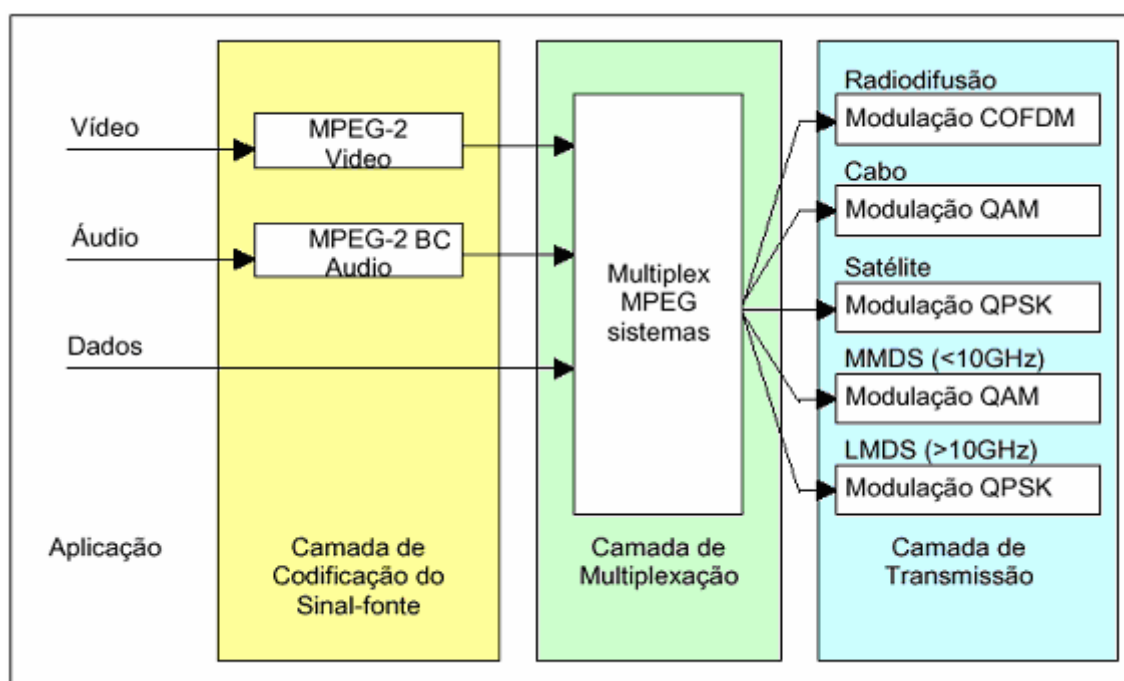


Figura 16 – Sistema DVB [Tome et al. 2001]

Segundo [Tome et al. 2001], a modulação hierárquica do sistema DVB possibilita a transmissão de parte das informações com uma robustez superior a de uma outra parte ou, ainda, a transmissão simultânea de programas com níveis de resolução diferenciados, tais como em HDTV (maior volume de dados, menos robusto) e SDTV (menor volume de dados, mais robusto). Desta forma, seria factível a recepção do programa em SDTV em terminais móveis.

[Batista 2005] identifica a multiprogramação em SDTV como foco original do DVB. Embora a transmissão em HDTV esteja disponível na Europa e na Austrália, locais com

largura de banda de 8 MHz e 7 MHz respectivamente, no Brasil, em função da largura de banda de 6 MHz, teríamos, possivelmente, problemas de robustez. Esses problemas poderiam ser minimizados com a substituição do MPEG-2 por algoritmos de compressão com taxas superiores. Como a tecnologia de modulação COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) utilizada no DVB não segmenta o espectro de transmissão, a recepção em terminais móveis pode sofrer com problemas de robustez.

3.2.5 – Padrão ISDB

De acordo com [DiBEG 2006], [Fernandes et al. 2004] e [Tome et al. 2001], embora a transmissão analógica de programas televisivos em HDTV no Japão tenha sido iniciada em 1992, no processo de transmissão digital o Japão encontrava-se tecnologicamente atrasado em relação ao resto do mundo. O consórcio DiBEG (*Digital Broadcasting Experts Group*), formado em 1997 por várias empresas e operadoras de televisão (principalmente pela emissora pública japonesa NHK) propôs, em 1999, a especificação do padrão ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*). O mapeamento das funcionalidades do padrão ISDB, em conformidade com o modelo de referência do ITU-T, encontra-se abaixo:

- Codificação de sinal-fonte – A codificação do sinal de vídeo é provida pelo padrão MPEG-2 Vídeo; já a codificação do sinal de áudio é provida pelo padrão MPEG-2 AAC. [Batista 2005] acrescenta que, para a transmissão de vídeo em aparelhos móveis, o ISDB optou pelo padrão H.264, conhecido por MPEG-4 Parte 10 ou MPEG-4 AVC (*Advanced Video Codec*);
- Multiplexação de sinais – A multiplexação de sinais é provida pelo MPEG-2 Sistemas;
- Codificação de canal e modulação – O ISDB utiliza a modulação COFDM para rádio-difusão terrestre, podendo operar em canais de 6 MHz, 7 MHz ou 8 MHz com taxa de transmissão de até 23,23 Mbps e em 3 modos de operação, conhecidos por 2k, 4k e 8k. Já a modulação 64 QAM é utilizada para transmissão a cabo e a modulação 8-PSK para transmissão via satélite.

A Figura 17 apresenta um esquema dos padrões e modulações utilizados pelo ISDB.

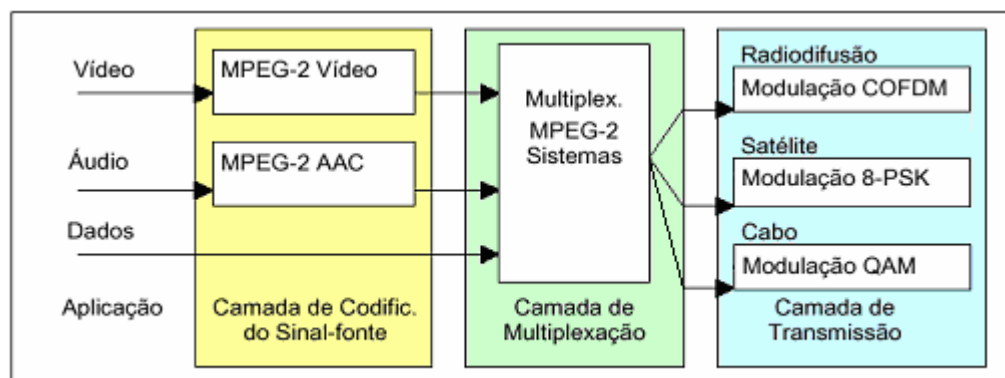


Figura 17 – Sistema ISDB [Tome et al. 2001]

[Batista 2005] e [Bolaño e Vieira 2004] corroboram que o padrão japonês, por ter sido desenvolvido após os padrões ATSC e DVB, apresenta características técnicas superiores aos seus antecessores, tais como: transmissão hierárquica (tal qual o DVB), imunidade superior a interferências, recepção móvel em HDTV para transmissões terrestres, além de segmentação de banda. A segmentação de banda permite a subdivisão de um único canal em 13 serviços ou emissoras diferentes, possibilitando a convergência de programas televisivos com Internet, telefonia celular, etc. No entanto, conforme [Tome et al. 2001], especificamente para a transmissão de programas televisivos, os segmentos são agrupados em no máximo 3 camadas.

3.3 – Componentes da TV Digital Interativa

Os sistemas de TV Digital Interativa incorporaram inúmeras características até então inexistentes nos sistemas analógicos tradicionais. Com o advento da transmissão digital, as alternativas das empresas foram ampliadas, permitindo a criação de um novo modelo de negócios. Já para os telespectadores, a implantação dos sistemas de TV Digital permitiu a oferta de novos produtos e serviços.

Neste novo modelo, a produção, a edição, o armazenamento e a transmissão de vídeos, seja de câmeras externas para as emissoras, seja das emissoras para as residências dos telespectadores, ocorre de forma digital. Nas residências dos telespectadores deve haver, então, uma unidade receptora capaz de identificar corretamente os sinais digitais transmitidos pelas emissoras. Entretanto, os aparelhos de televisão utilizados nos sistemas analógicos tradicionais não estão preparados para interpretar corretamente sinais digitais, sendo imprescindível a existência de um equipamento denominado URD (Unidade Receptora-Decodificadora), também conhecido por *Set Top Box*, para executar esta função.

A interface de comunicação que possibilita a interatividade entre o telespectador e o sistema televisivo é implementada através do controle remoto ou de um teclado conectado a uma URD mais avançada. Uma estrutura simplificada da TV Digital Interativa é apresentada na Figura 18.



Figura 18 – Estrutura Simplificada da TV Digital Interativa

3.3.1 – Interatividade

Interatividade significa a capacidade de um dispositivo interagir ou permitir interação com o seu respectivo usuário. Deve-se observar que a existência de interatividade está estritamente relacionada à existência de um meio eletrônico, intermediando a interação. De acordo com [Reisman 2002], é possível classificar o conceito de interatividade em três níveis de abrangência:

- Interatividade com o conjunto televisivo – Nesse nível a interatividade está restrita ao uso do controle remoto, permitindo a troca de canais e o avanço, o retrocesso e a pausa de imagens no vídeo-cassete. O telespectador não pode alterar o conteúdo, apenas a forma como o mesmo é visualizado;
- Interatividade com o conteúdo do programa da televisão – Nesse nível a interatividade é plena e representa o maior desafio para os produtores. Nessa visão, o telespectador pode controlar o conteúdo do programa que está assistindo, bem como controlar a programação que gostaria de assistir;

- Interatividade com o conteúdo que encontra-se na televisão – Também chamado de coativo, esse nível contém as mesmas características que o nível anterior e, ainda, funcionalidades que mudarão radicalmente a forma como assistiremos televisão pelas próximas décadas: obter informações a qualquer momento sobre as condições climáticas, esportes, a programação das emissoras, notícias etc, assim como obter informações detalhadas de produtos anunciados e poder comprá-los.

[Lemos 1997] classifica a interatividade em relação à televisão em cinco níveis distintos, conforme pode ser observado a seguir:

- Nível 0 – este é o nível mais baixo de interatividade, sendo possível ao telespectador apenas a troca de canal, a regulagem de volume, contraste, brilho e ligar ou desligar o aparelho de televisão. A transmissão ainda ocorre em preto e branco, com apenas um ou dois canais;
- Nível 1 – Surge, então, a televisão colorida, e outras emissoras. O controle remoto vem suprir a demanda de conforto requerida pela possibilidade de navegar entre os inúmeros canais disponíveis, assim como efetuar ajustes na forma como a programação é assistida. Essa navegação (troca de canais), também chamada de *zapping*, é considerada a precursora da navegação da *Web* (*World Wild Web*);
- Nível 2 – O aparelho de televisão passa a poder ser utilizado para outros fins, não apenas para assistir aos programas transmitidos pelas emissoras de televisão. Jogos eletrônicos, vídeos-cassete e câmeras portáteis permitem que o usuário se aproprie da televisão para jogar ou simplesmente assistir a filmagens previamente gravadas. O vídeo-cassete ainda permite que o usuário possa se apropriar dos programas transmitidos pelas emissoras, podendo gravá-los e assisti-los quando bem desejar;
- Nível 3 – Os primeiros sinais de interatividade digital surgem neste nível, onde o telespectador pode interferir no conteúdo na programação através de fax, telefone ou mensagens de correio eletrônico (*e-mail*). Programas como *BigBrother*, *Intercine* e *Você Decide* da Rede Globo, *Casa dos Artistas* do SBT e outros similares encontram-se classificados neste nível;
- Nível 4 – Neste nível surge a TV interativa, possibilitando ao telespectador utilizar o controle remoto para interferir na programação, selecionando cenas ou ângulos de

câmeras que melhor lhe convenha. O canal SportTV Premiere oferece este recurso, conforme pode ser observado na Figura 19 abaixo.



Figura 19 – Seleção de cenas e ângulos [Bastos 2005]

Existem, ainda, mais três níveis complementares propostos por [Becker e Montez 2004] que possibilitam ao telespectador interferir plenamente na programação e não apenas reagir aos programas transmitidos pelas emissoras:

- Nível 5 – Neste nível o próprio telespectador pode participar da programação, enviando vídeos de baixa qualidade, produzidos através de *web cams* ou filmadoras analógicas. Surge a necessidade de um canal de interatividade, também denominado canal de interação ou canal de retorno, que seja capaz de prover recursos para a transmissão do vídeo do telespectador para a emissora;
- Nível 6 – Oferece os mesmos recursos que o nível 5, entretanto permite a transmissão de vídeos de alta qualidade. O canal de interatividade deve, obrigatoriamente, dispor de banda superior à oferecida no nível 5;
- Nível 7 – Neste nível o telespectador alcança a interatividade plena, gerando conteúdo da mesma forma que a emissora. O telespectador rompe o monopólio de produção e veiculação das redes de televisão e passa a atuar como se fosse um internauta na *Web*, com capacidade e recursos necessários à publicação de *sites* com o conteúdo que desejar.

3.3.2 – URD – Unidade Receptora-Decodificadora

O sinal transmitido pelas emissoras de televisão deverá ser captado por um receptor através de uma antena convencional, uma antena parabólica ou chegar através de um cabo nas residências dos telespectadores. No caso da TV Digital, este receptor pode estar embutido em uma televisão digital ou pode ser um dispositivo externo que será conectado a um aparelho de televisão tradicional. Neste caso, este dispositivo é denominado URD (Unidade Receptora-Decodificadora), STB (*Set Top Box*) ou IRD (*Integrated Receiver Decoder*).

A URD tem a função de converter os sinais digitais recepcionados em sinais analógicos, de forma que uma televisão tradicional possa atuar em um cenário totalmente digital. Caso o sistema digital forneça algum serviço de interatividade, a URD deverá ter uma forma de enviar os dados do usuário para a emissora ou para um outro destino qualquer. Esse canal de comunicação é denominado de canal de retorno ou canal de interatividade. Dependendo do modelo da URD, o dispositivo pode ser dotado de memória, disco rígido, processador, modem, teclado, além de outros dispositivos presentes em microcomputadores.

De acordo com [Becker e Montez 2004], o sinal digital transmitido pela emissora via radiodifusão ou via satélite será recebido pela antena apropriada e enviado para um sintonizador, que processa também os sinais recebidos via cabo. O sintonizador enviará o sinal recebido ao demodulador, módulo responsável pela extração do fluxo de transporte MPEG-2 e o encaminhará para o módulo demultiplexador. O demultiplexador efetuará a demultiplexação do sinal, gerando um sinal para áudio, outro para vídeo e um terceiro para dados. Por fim, o decodificador MPEG-2 decodificará os fluxos de dados, enviando-os no formato específico do aparelho de televisão. A Figura 20 ilustra uma URD.



Figura 20 – Unidade Receptora Decodificadora (URD) ou *Set Top Box* (STB)

3.3.3 – Alternativas para o Canal de Interatividade

O Canal de Interatividade tem a função de prover a infra-estrutura necessária à comunicação entre aplicações interativas executadas na URD com os servidores de aplicação localizados nas emissoras de televisão e em provedores de conteúdo, permitindo a cada telespectador um determinado nível de interação, com envio e recebimento de informações. O canal de Interatividade é composto por dois canais de comunicação, a saber:

- Canal de Interatividade – Também denominado canal de retorno ou canal de interação, define uma tecnologia de acesso que possibilite a comunicação dos telespectadores com as emissoras de televisão e provedores de conteúdo;
- Canal de Descida Complementar – Define uma tecnologia de acesso que possibilite a comunicação das emissoras de televisão e provedores de conteúdo para os telespectadores. Essa comunicação pode ocorrer em *broadcast*, quando direcionada a todos os telespectadores, *multicast* (ponto-multiponto), quando direcionada a um grupo específico de telespectadores ou em *unicast* (ponto-a-ponto), quando a informação for individualizada, ou seja, direcionada a um telespectador específico.

A Figura 21 apresenta as 3 formas de comunicação possíveis em um sistema de TV Digital Terrestre: a comunicação em radiodifusão das emissoras para os telespectadores, denominado Canal de Descida do Canal de Radiodifusão, o Canal de Descida Complementar e o Canal de Interatividade (Canal de Retorno). No entanto, normalmente o canal de Descida Complementar e o Canal de Interatividade utilizam a mesma infra-estrutura, ou seja, a compartilham um meio de transmissão bidirecional.

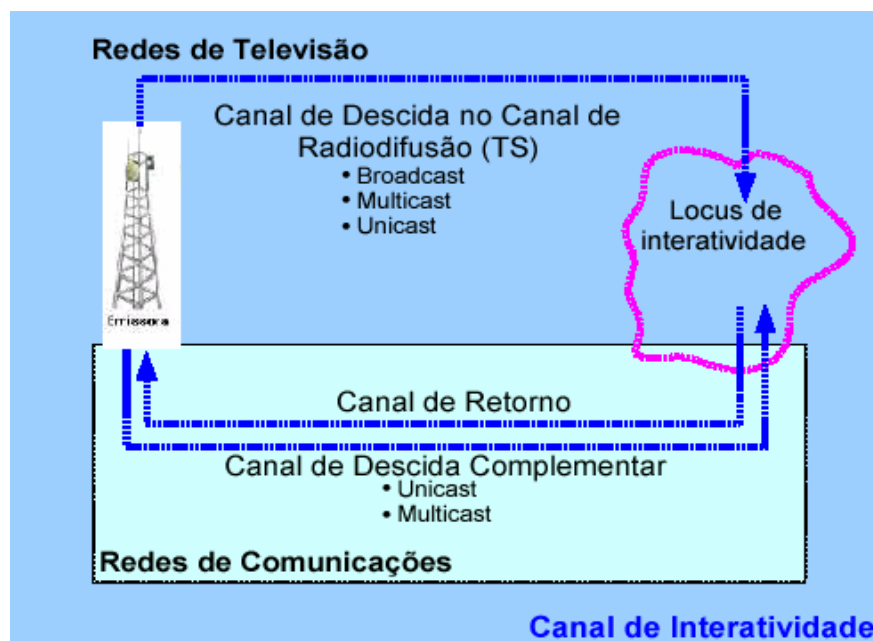


Figura 21 – Diagrama Simplificado do Canal de Interatividade [CPqD 2006]

A multiplicidade de opções de tecnologia de acesso para última milha permite a composição de inúmeras alternativas para os provedores de conteúdo, emissoras de televisão e telespectadores, conforme pode ser observado na Figura 22. Desta forma, obtêm-se capilaridade, área de cobertura, taxa de transmissão e quantidade de usuários muito superior.

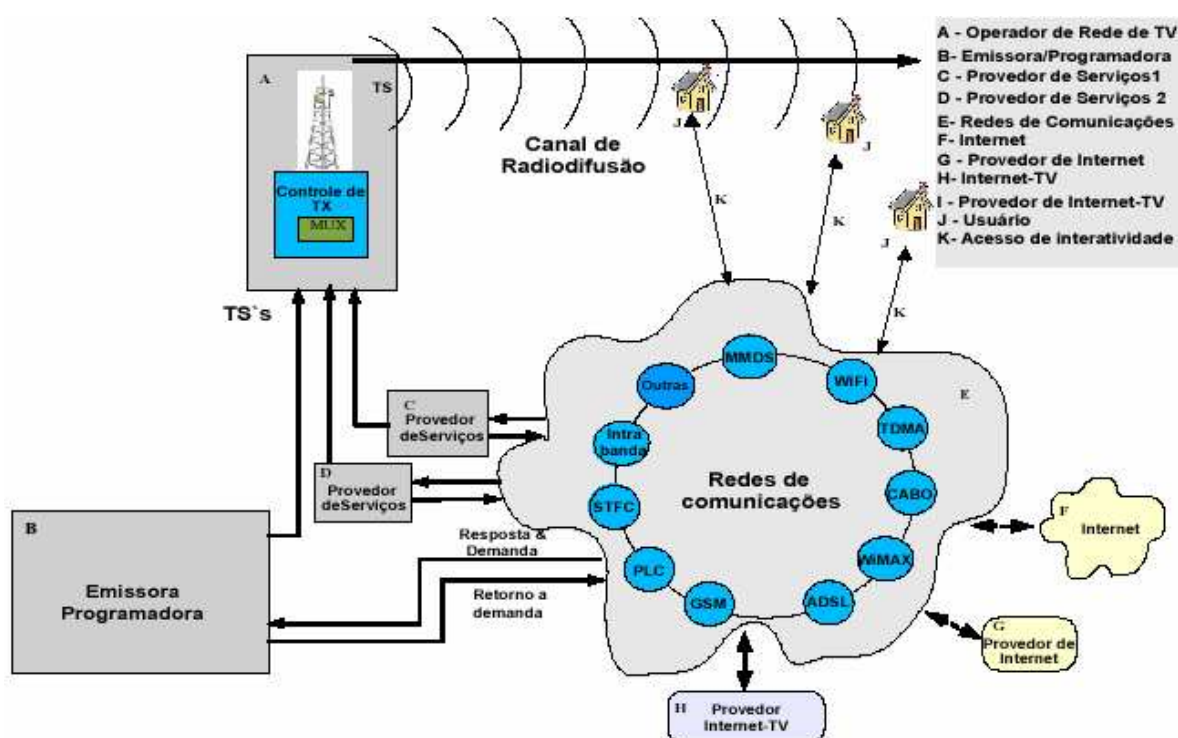


Figura 22 – Arquitetura do Subsistema Canal de Interatividade [CPqD 2006]

Dentre as principais opções, é possível relacionar as seguintes [CPqD 2006]:

- PLC (*Power Line Communications*) – A tecnologia PLC baseia-se na transmissão de sinais digitais através de redes de energia elétrica, possibilitando, desta forma, que qualquer ponto de energia possa vir a ser um ponto de rede. A taxa de transmissão pode chegar a 320 Mbps para um conjunto de usuários, sendo mais usuais taxas de 2,25 a 4,5 Mbps. Embora a tecnologia PLC apresente-se como uma excelente alternativa, os estudos para implantação em larga escala ainda encontram-se incipientes [Anatel 2003, PLC 2006];
- STFC (Sistema de Telefonia Fixa Comutada) – Não obstante o Sistema de Telefonia Fixa Comutada ser uma das alternativas possíveis, a limitação da banda de transmissão e o custo da tarifação são fatores que comprometem a utilização desta tecnologia;
- ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) – O ADSL vem se destacando entre as tecnologias atualmente disponíveis para redes de acesso em banda larga, podendo alcançar 8 Mbps (ITU-T G.992.3) de taxa de *download*. Algumas variações, como VDSL (ITU-T G.993.2) podem alcançar 100 Mbps para taxas de *upload* e *download*. No entanto, o custo mensal deste serviço no Brasil ainda é alto. Além disso, o ADSL está associado à existência de uma linha telefônica fixa tradicional (STCF) [DSL Forum 2006];
- WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) – O padrão IEEE 802.16, conhecido por *WirelessMAN*, é capaz de prover, em condições ideais, uma taxa de transmissão aproximada de 70 Mbps, com alcance de até 50 Km. Existe uma imensa expectativa de que a tecnologia WiMax [WiMax Forum 2006] seja uma das melhores alternativas para acesso em banda larga.

3.3.4 – Modelo de Camadas

Os principais sistemas de televisão digital foram desenvolvidos baseados no modelo de camadas apresentado na Figura 23. As principais funções das cinco camadas deste modelo são as seguintes:

- Camada de Aplicação – A camada de aplicação é responsável pela execução dos aplicativos multimídia transmitidos pelas operadoras de televisão;

- Camada de *Middleware* – Esta camada provê uma API (*Application Programming Interface*) que possibilita que as aplicações possam ser executadas independentemente do padrão de *hardware* existente;
- Camada de Codificação – Realiza a compressão e descompressão dos fluxos de áudio e de vídeo;
- Camada de Transporte – Efetua a multiplexação e a demultiplexação dos programas de TV;
- Camada de Transmissão – Esta camada é responsável pela sintonia, modulação/demodulação e codificação/decodificação do sinal.

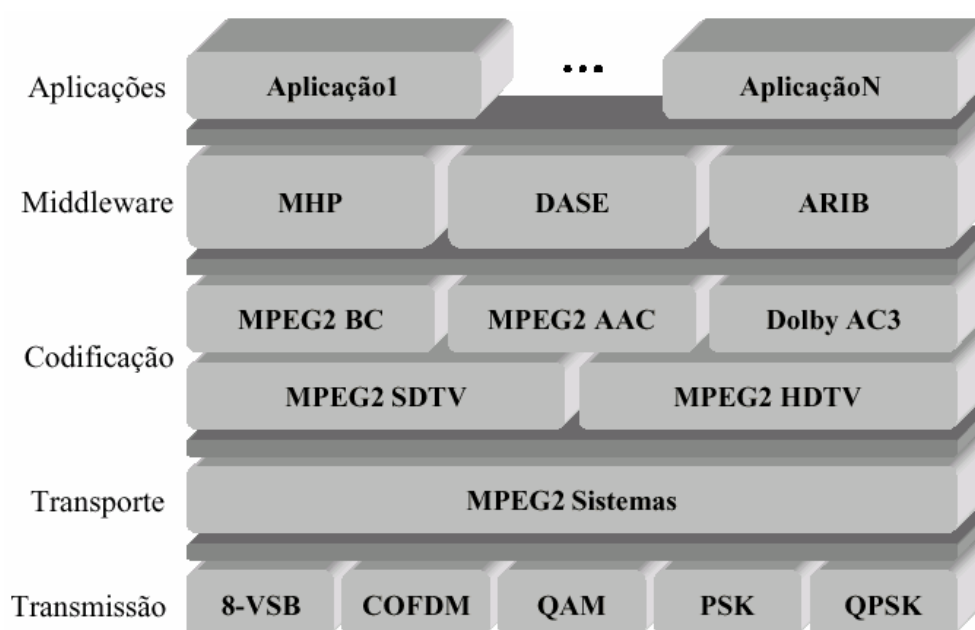


Figura 23 – Arquitetura em camadas da TV Digital [Fernandes et al. 2004]

3.4 – Aplicações para a TV Digital Interativa

[Oliveira e Albuquerque 2005a] afirmam que graças a TV Digital estão surgindo novos paradigmas relacionados ao uso da televisão. Efetuar a recarga de aparelhos celulares e fazer compras em shoppings ou supermercados virtuais, por exemplo, são atividades perfeitamente exequíveis em função do *t-commerce* (comércio via TV). A participação do cidadão na democracia pode ser incrementada com o *t-government* (serviços governamentais via TV), assim como efetuar transações bancárias através do *t-banking* (operações bancárias via TV).

Gravar um programa de televisão enquanto se assiste a um outro, adquirir filmes a qualquer hora (*movie-on-demand*), receber o sinal de uma emissora em aparelhos móveis (celulares, PDAs, etc) e a possibilidade de uma emissora transmitir, em um único canal, diversos programas são apenas alguns exemplos dos serviços que podem ser disponibilizados.

3.4.1 – Datacasting

Datacasting pode ser entendido como a transmissão de fluxos de dados que serão armazenados e processados na URD. Os dados recebidos podem estar associados a programas, de forma a permitir um nível de interatividade local, como o acesso ao guia de programação (EPG – *Electronic Programming Guide*) ou podem simplesmente estar associados a serviços informativos.

3.4.2 – Camada de Aplicação

Conforme observado, não existe um modelo único capaz de classificar a interatividade nem os níveis de interatividade. Da mesma forma, em relação às possíveis aplicações, existem várias citações. Apenas como exemplo, [Maclin 2001] relaciona uma lista com sete itens:

- TV Avançada (*Enhanced TV*) – A TV Avançada suporta a transmissão de vários elementos, tais como textos, gráficos e vídeos. Na forma mais simples, pode ser vista como apresentação destes elementos na grade de televisão. [Becker e Montez 2004] acrescentam que a principal diferença em relação à TV analógica encontra-se na integração dos elementos citados e no aumento da qualidade de vídeo e som. A resolução do monitor da televisão passa para a proporção 16:9 (*widescreen*) ao invés da resolução tradicional 4:3;
- Internet na TV – Possibilita aos telespectadores navegar livremente pela Internet, acessando suas mensagens eletrônicas (*e-mails*), recebendo e enviando mensagens instantâneas (*Instant Messaging*) etc;
- TV Individualizada – Permite que o telespectador modifique a forma de apresentação do programa, selecionando ângulos de câmeras, escolhendo o momento em que deseja assistir o *replay* de uma cena etc;
- Vídeo sob Demanda – A aplicação de VoD (*Video-on-Demand*) possibilita ao telespectador assistir ao programa desejado na hora que lhe for mais conveniente, sem

as restrições de horário da televisão analógica. Esta aplicação não deve ser confundida com as ofertas de *pay-per-view*, ofertas estas que são oferecidas em horários alternativos, pré-definidos e transmitidas independente do desejo do telespectador;

- *Personal Video Recorder (PVR)* – Esta aplicação permite que o telespectador selecione e grave programas em função do título, dos atores, do assunto ou de qualquer outro item relacionado à produção que tenha sido previamente cadastrado. O dispositivo que implementa a aplicação PVR dispõe de disco rígido, permitindo o armazenamento dos programas selecionados e, se for o caso, excluindo comerciais. O PVR é também conhecido por *Personal TV* ou *Digital Video Recorder (DVR)*. O PVR pode ser um equipamento dedicado ou estar acoplado à URD;
- *Walled Garden* – Pode ser encarado como um portal para aplicações interativas que normalmente disponibiliza acesso e informações acerca de jogos, entretenimento, comércio eletrônico televisivo (*t-commerce*), governo televisivo (*t-government*), *home-banking (t-banking)*, etc;
- Console de Jogos – Possibilita o uso da televisão para jogos, permitindo que os adversários estejam em rede ou que a própria televisão seja o adversário.

Como o projeto de implantação do SBTVD tem um forte viés nas inclusões digital e social, o Governo Federal vem demonstrando essa preocupação no desenvolvimento de aplicações que possam ofertar serviços do Governo Federal à população como um todo, mas principalmente à população mais carente, tendo dedicado uma RFP (Requisição Formal de Proposta) exclusiva ao estudo de Aplicações para TV Digital, a RFP-9, proveniente do consórcio SBTVD lançado pela FINEP.



Figura 24 – Bill & Ben e Bob the Builder

Aplicações educativas destinadas à formação de professores e alunos como as apresentadas pela TV Escola Interativa [Silva et al. 2004b] e similares às exibidas pelo canal Cbeebies da BBC, são exemplos clássicos de influência positiva da TV Digital Interativa no processo de aprendizagem e nas inclusões social e digital. A Figura 24 exemplifica alguns dos programas exibidos pelo canal Cbeebies da BBC, como Bill & Ben, também exibido no canal do 2 do Rio de Janeiro – TVE, e Bob the Builder, exibido em canais por assinatura.

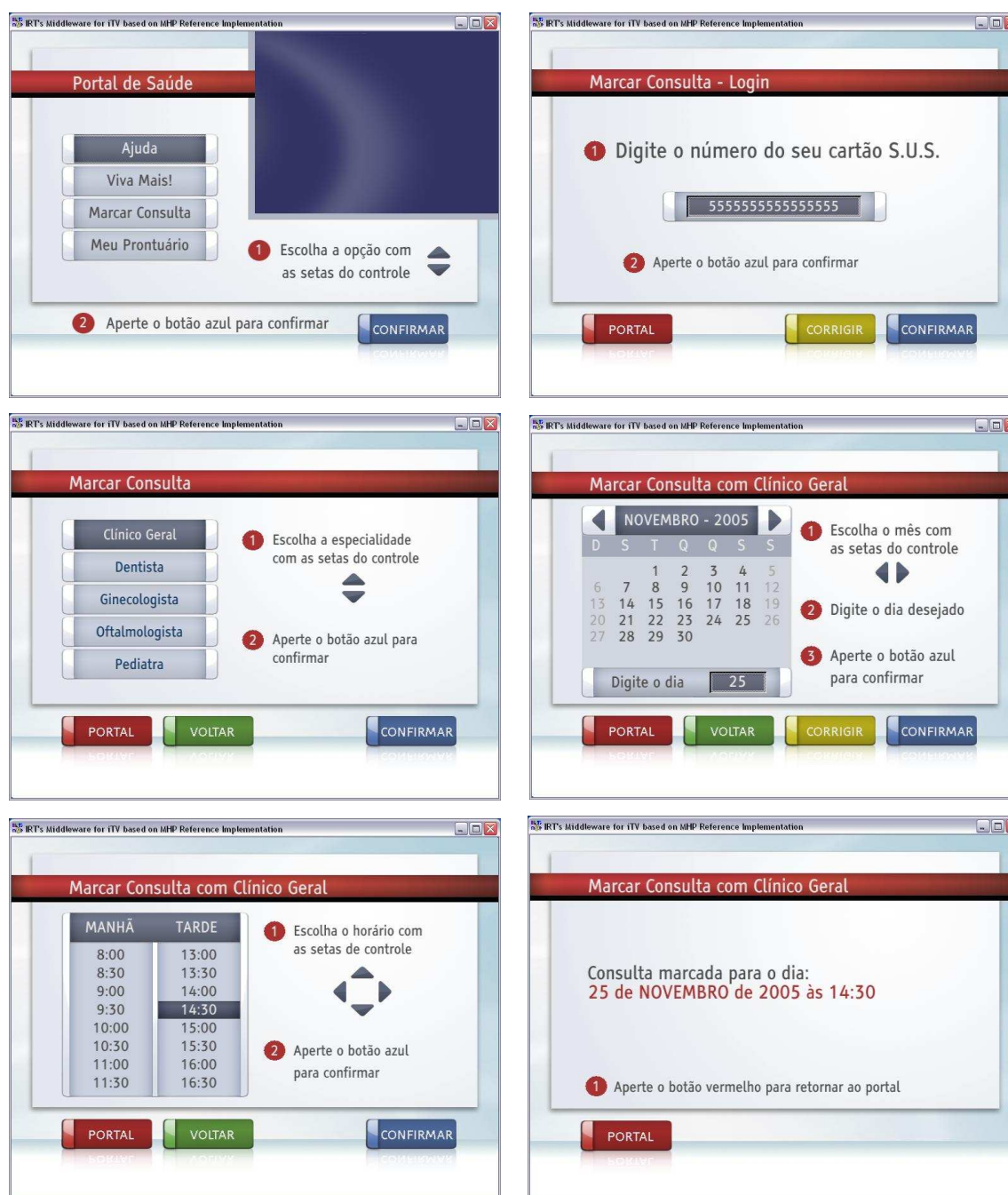


Figura 25 – Sistema de Marcação de Consultas para TV Digital Interativa

A marcação de uma consulta no SUS (Sistema Único de Saúde) requer, atualmente, que o paciente ou o seu representante se desloque até a unidade de saúde, consumindo tempo e recursos financeiros com transporte, muitas vezes inexistentes ou indisponíveis. A possibilidade da marcação de uma consulta ser realizada através do SBTVD, sem que o paciente, ou seu representante, tenha que se deslocar até a unidade de saúde seria um exemplo clássico de inclusão social utilizando o SBTVD. A Figura 25 apresenta uma versão do que poderia vir a ser um sistema de marcação de consultas através da TV Digital Interativa.

Capítulo 4 – Cidades Digitais

[Zancheti 2001] define cidade digital como “Uma cidade digital (CD) é um sistema de pessoas e instituições conectadas por uma infra-estrutura de comunicação digital (a Internet) que tem como referência comum uma cidade real. O propósito de uma CD varia muito, podendo incluir um ou mais dos seguintes objetivos, dentre inúmeros outros:

- Criar um espaço de manifestação política e cultural para pessoas e grupos;
- Criar um canal de comunicação entre pessoas e grupos;
- Criar canais de comunicação e negociação entre a administração municipal e os cidadãos;
- Favorecer uma maior identificação dos moradores e visitantes com a cidade referência;
- Criar um acervo de informações das mais variadas espécies e de fácil acesso sobre a cidade referência.”

As Cidades Digitais são erguidas com o intuito de atender às comunidades reais, oferecendo serviços de acordo com as necessidades da população e, eventualmente, promovendo as inclusões social e digital. De acordo com [Silva 2002], as Cidades Digitais podem ser categorizadas em Governamentais, não Governamentais, de Iniciativa do Terceiro Setor, entre outras classificações. Uma breve descrição das principais categorias encontra-se abaixo:

- Cidades Digitais Governamentais: Os governos municipais, estaduais ou federais atuam como provedor de serviço, utilizando a Tecnologia da Informação na administração pública para prestação de serviços *on-line*, como acesso gratuito à Internet, possibilitando as inclusões social e digital da população;
- Cidades Digitais não Governamentais: Neste modelo, a comunidade local somente ingressa na Cidade Digital com autorização do provedor de acesso, podendo o serviço ser cobrado. Encontros virtuais, salas de conversação, acesso a revistas,

enciclopédias, classificados etc são exemplos de serviços que podem ser ofertados, além, evidentemente, do acesso à Internet;

- Cidades Digitais de Iniciativa do Terceiro Setor: Diferentes grupos sociais, tais como ONGs (Organizações não Governamentais), associações sem fins lucrativos etc, provêm acesso a informações sobre projetos sociais, abordando questões como as inclusões social e digital.

Conforme pode ser observado, o conceito de Cidade Digital extrapola o universo de páginas da Internet e usuários, possibilitando além do acesso à Internet esperado, as inclusões social e digital, principalmente quando implantada pelo governo.

4.1 – Casos de Sucesso no Brasil

A implantação no Brasil de projetos de Cidades Digitais ainda é incipiente e depende de ações específicas. Alguns poucos projetos, como Piraí Digital, Sud Mennucci, Ouro Preto – Cidade Digital, Parintins e ReMesh encontram-se destacados nas subseções abaixo. As tecnologias de comunicação mais empregadas atualmente nas Cidades Digitais são WiMax e *Mesh*. A tecnologia WiMax será brevemente descrita em seguida, já as características das redes *Mesh* serão apresentadas em 4.2 – Redes *Mesh*.

O acrônimo WiMax é, na realidade, o padrão IEEE 802.16 ou IEEE WirelessMAN. A versão inicial deste padrão, publicada em 2002, requeria visada direta para comunicação, operava nas frequências de 10 à 66 GHz e dispunha de taxa de transmissão de 32 à 134 Mbps em canais de 28 MHz. Desde a publicação inicial, várias revisões foram efetuadas, eliminando a necessidade de visada direta para comunicação (IEEE 802.16a), limitando as frequências de transmissão (IEEE 802.16^a/REVd/e), reduzindo a taxa de transmissão e a largura dos canais (IEEE 802.16^a/REVd/e), acrescentado características de QoS – *Quality of Service* (IEEE 802.16b), mobilidade (IEEE 802.16e) etc. O objetivo principal do padrão IEEE 802.16 é disponibilizar acesso em banda larga sem fio para última milha [WiMax Forum 2006].

4.1.1 – Piraí Digital

O projeto Piraí Digital foi criado com o intuito de prover as inclusões social e digital da população do município de Piraí, localizado no estado do Rio de Janeiro. Tendo como base a

democratização do acesso à tecnologia de informação, da disseminação do conhecimento e da modernização da administração pública, o projeto gerou novas oportunidades para o desenvolvimento social e econômico. Os objetivos específicos dos projetos Pirai.gov, Pirai.org, Pirai.edu e Pirai.com podem ser encontrados em [Pirai 2006].

O SHSW (Sistema Híbrido com Suporte *Wireless*) implantado em Pirai atende a todo o território do município, iluminando os distritos e a área central. Além de permitir o acesso universal, o SHSW provê uma rede pública para transmissão de voz e dados.

O processo de inclusão digital das comunidades urbana e rural, através do desenvolvimento de atividades em conjunto com a comunidade local e a produção de novos conteúdos digitais, impulsionou a criação de projetos específicos, culminando com o desenvolvimento de projetos comunitários, pré-vestibular social e inúmeros cursos, tais como cursos de línguas, cursos profissionalizante, cursos de formação de empreendedores e de gestão de negócios, cursos de Linux, entre outros.

4.1.2 – Sud Mennucci

Um bom exemplo do funcionamento de uma Cidade Digital, reconhecido internacionalmente, é a cidade de Sud Mennucci, localizada no sudoeste do estado de São Paulo. Nesta cidade de aproximadamente 7.500 habitantes, a prefeitura instalou uma rede Wi-Fi interligando todos os órgãos públicos e provendo acesso gratuito e ilimitado à Internet para toda a comunidade. Foram instalados dois transmissores centrais operando na faixa de 2,4GHz (IEEE 802.11b/g) com alcance de 15 km, possibilitando o acesso a partir de qualquer ponto da cidade [Sud Mennucci 2006].



Figura 26 – Rede Wireless Municipal [Sud Mennucci 2006]

4.1.3 – Ouro Preto – Cidade Digital

A cidade de Ouro Preto (MG) implantou, recentemente, uma rede WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) interligando escolas públicas estaduais e municipais, algumas secretarias municipais, a biblioteca, o laboratório de rede da UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) etc, com o objetivo de desenvolver ações sociais e, principalmente, promover as inclusões social e digital [RNP 2005].

4.1.4 – Parintins

Através de um consórcio liderado pela Intel, em associação com Embratel, Cisco, Proxim, Fundação Bradesco, Universidade Federal do Amazonas e Universidade de São Paulo, foi instalada uma rede WiMax na cidade de Parintins (AM). Os pontos de conexão foram instalados em um centro de saúde, duas escolas públicas, um centro comunitário e na Universidade Federal da Amazônia, possibilitando acesso gratuito à Internet aos 114.000 habitantes da ilha. Equipamentos de telemedicina e 60 computadores foram doados para a implantação da rede. Além disso, professores das escolas públicas receberam treinamento especializado, possibilitando o uso da tecnologia no processo de aprendizado [Intel 2006, Cisco 2006]. A Figura 27 apresenta a instalação de uma antena WiMax em Parintins.



Figura 27 – Instalação de uma antena WiMax na escola pública Lila Maia - Parintins [Intel 2006]

4.2 – Redes *Mesh*

As redes *mesh* sem fio (WMNs – *Wireless Mesh Networks*) vêm se destacando como uma das melhores alternativas para implantação de redes de acesso em *campi* universitários e em centros de pesquisa, nas Cidades Digitais. Como exemplo é possível relacionar as experiências ReMesh [Projeto ReMesh 2006], Vmesh [Tsarmopoulos et al. 2005], RoofNet [Bicket et al. 2005], UCSB MeshNet [UCSB 2006], entre outras, e as experiências de algumas cidades brasileiras, tais como Mangaratiba (RJ), Tiradentes (MG) etc.

[Bicket et al. 2005] definem as duas abordagens mais comuns para a implementação de redes urbanas comunitárias compartilhadas. A primeira abordagem baseia-se em uma rede com múltiplos saltos, com prévio conhecimento da localização dos clientes e com uso de antenas direcionais, capazes de prover enlaces com mais qualidade que antenas omnidirecionais². Essa abordagem requer um grupo de trabalho com alto conhecimento técnico, mas tipicamente apresenta como resultado uma rede com alta capacidade de transmissão e conectividade. A segunda abordagem consiste na operação individual de pontos de acesso (APs – *Access Points*), que podem atuar de forma independente, para conexão direta de clientes. Os pontos de acesso não demandam muita atenção, entretanto não são capazes de prover a mesma cobertura que a primeira abordagem. As redes *mesh* procuram combinar o que existe de melhor das abordagens descritas.

Já [Akyildiz et al. 2005] ressaltam que os protocolos tradicionais da subcamada MAC e de roteamento utilizados em redes *mesh* sem fio não são escaláveis, causando, entre outros fatores, um aumento significativo de perdas de pacotes à medida que a quantidade de clientes *mesh* ou a quantidade de saltos aumenta. Em função destes problemas, protocolos de roteamento e de acesso ao meio para redes sem fio, especificamente para redes IEEE 802.11, redes *ad hoc* e redes de sensores, vêm sendo revistos. Por exemplo, os grupos de trabalho dos padrões IEEE 802.11 [IEEE 802.11 2006], IEEE 802.15 [IEEE 802.15 2006] e IEEE 802.16 [IEEE 802.16 2006] definiram sub-grupos de trabalho com foco na criação de novos padrões especificamente voltados para as redes *mesh* sem fio.

² Antenas capazes de transmitir e receber dados em todos os sentidos.

4.2.1 – Características das Redes Mesh

[Akyildiz et al. 2005] definem redes *mesh* como um conjunto de roteadores e clientes *mesh*, onde os roteadores mantêm-se praticamente estáticos e formam o *backbone* da rede, provendo acesso para clientes nativos *mesh* e de outras tecnologias. A integração da rede *mesh* como redes IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, celular ou Internet é possível através de *gateways* ou *bridges* instalados nos roteadores *mesh*. Diferentemente dos roteadores, os clientes *mesh* podem dispor de mobilidade e podem, ainda, constituir uma rede somente entre clientes *mesh* ou conectados a roteadores *mesh*, encaminhando dados de outros clientes. A Figura 28 exemplifica o uso de múltiplas tecnologias em conjunto com redes *mesh*.



Figura 28 – Rede *Mesh* com múltiplas tecnologias [Akyildiz et al. 2005]

Algumas das características mais desejáveis em redes *mesh* são relacionadas por [Bicket et al. 2005]:

- Os clientes *mesh* podem se conectar em qualquer ponto da rede e a qualquer momento. Não há necessidade de realizar um planejamento prévio de cobertura e desempenho;
- Uso de antenas omnidirecionais, ao invés de antenas direcionais. A instalação das antenas omnidirecionais ocorre sem a realização de um levantamento minucioso de conexão dos clientes *mesh*;

- Os clientes *mesh* devem ter capacidade de efetuar a tarefa de roteamento através de qualquer outro nó participante da rede *mesh*, seja ele um outro cliente *mesh* ou um roteador *mesh*;
- Uso de roteamento com múltiplos saltos (*multi-hop routing*) ao invés de roteamento com um único salto através de estações base (*Base Station - BS*) ou pontos de acesso (*APs - Access Points*). A capacidade de realizar roteamento com múltiplos saltos incrementa a cobertura da rede e o nível de desempenho, compensando, parcialmente, a falta de planejamento e a opção por antenas omnidirecionais;

[Akyildiz et al. 2005] definem redes *mesh* como redes dinâmicas, auto-organizáveis e auto-configuráveis, cujos nós estabelecem e mantêm conexão entre eles, criando, de fato, uma rede *ad hoc* (sem infra-estrutura). Os clientes *mesh* podem ser microcomputadores, *laptops*, PDAs, etc, desde que estejam equipados com uma interface de rede sem fio ou, caso estes dispositivos não disponham de uma interface de rede sem fio, podem se conectar a um roteador *mesh*, através de uma outra tecnologia como a *Ethernet*.

4.2.2 – Aplicações para Redes Mesh

De acordo com [Akyildiz et al. 2005], o investimento em pesquisa e desenvolvimento aplicado às redes *mesh* sem fio é motivado por inúmeras aplicações que demonstram claramente ser esse um mercado promissor. Essa perspectiva é ratificada pelo fato de que as redes sem fio atuais, tais como IEEE 802.11, redes de sensores, redes *ad hoc*, redes celulares, entre outras, não suportam satisfatoriamente algumas aplicações, como as Redes Domésticas de Alta Velocidade, Redes Metropolitanas, Redes para Automação Predial, entre outras.

Em [Akyildiz e Wang 2005], os autores classificam o acesso à Internet, o armazenamento e compartilhamento de informações distribuídas e troca de informações entre diferentes redes *wireless* como aplicações suportadas por WMNs.

4.2.2.1 – Rede Doméstica de Alta Velocidade

[Akyildiz et al. 2005] afirmam que, atualmente, o padrão IEEE 802.11 é o mais utilizado na implementação de redes domésticas de alta velocidade, entretanto, dependendo da estrutura do domicílio, muitos locais podem ficar sem cobertura. A instalação de múltiplos pontos de acesso além de ser custosa, cria a necessidade de cabeamento do ponto de acesso até o ponto

central (modem ou *switch*), tipicamente o local de conexão com a Internet, já que o padrão WiFi (*Wireless Fidelity*) não suporta redes com múltiplos saltos. Nessa topologia, a comunicação entre clientes conectados a diferentes pontos de acesso acaba encaminhada através do ponto central, o que caracteriza uma ineficiência desta topologia.

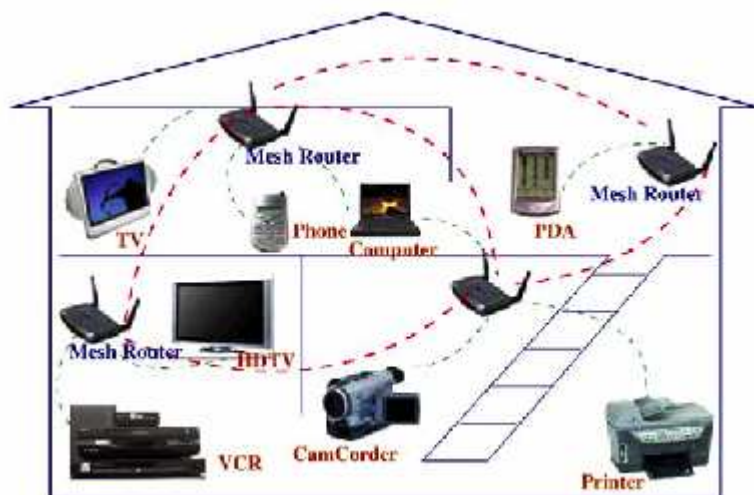


Figura 29 – Rede Doméstica de Alta Velocidade [Akyildiz et al. 2005]

Algumas das questões apresentadas podem ser resolvidas através de redes *mesh* sem fio, cuja ilustração é representada pela Figura 29. Os pontos de acessos podem ser substituídos por roteadores *mesh*, estabelecendo, dessa forma, a comunicação entre eles através de uma topologia *mesh*. As áreas sem cobertura podem ser eliminadas com o reposicionamento de roteadores *mesh* já existentes, com o aumento da potência do sinal ou, quando não houver solução, com a inclusão de novos roteadores *mesh*. A comunicação entre clientes *mesh* não requer, obrigatoriamente, o encaminhamento através do ponto central, minimizando, desta forma, a possibilidade de congestionamento. [Akyildiz et al. 2005] asseguram que, como nesta topologia os roteadores *mesh* são praticamente estáticos e permanecem conectados à rede de energia elétrica, as redes de sensores e as redes *ad hoc* não seriam capazes de alcançar um desempenho satisfatório devido à preocupação com mobilidade e consumo de energia.

4.2.2.2 – Rede Metropolitana

Segundo [Akyildiz et al. 2005], as redes *mesh* sem fio apresentam inúmeras vantagens ao serem utilizadas em MANs (*Metropolitan Area Networks*), como por exemplo: o fato do padrão IEEE 802.11g prover taxa nominal de 54 Mbps e da comunicação entre clientes *mesh* não necessitar passar, obrigatoriamente, por um *backbone* cabeado. O custo da infra-estrutura, quando comparado com redes óticas ou redes cabeadas, também pode ser citado como uma

das vantagens das redes *mesh* sem fio, principalmente em regiões subdesenvolvidas. A Figura 30 apresenta um exemplo de uma rede metropolitana baseada em rede *mesh* sem fio.

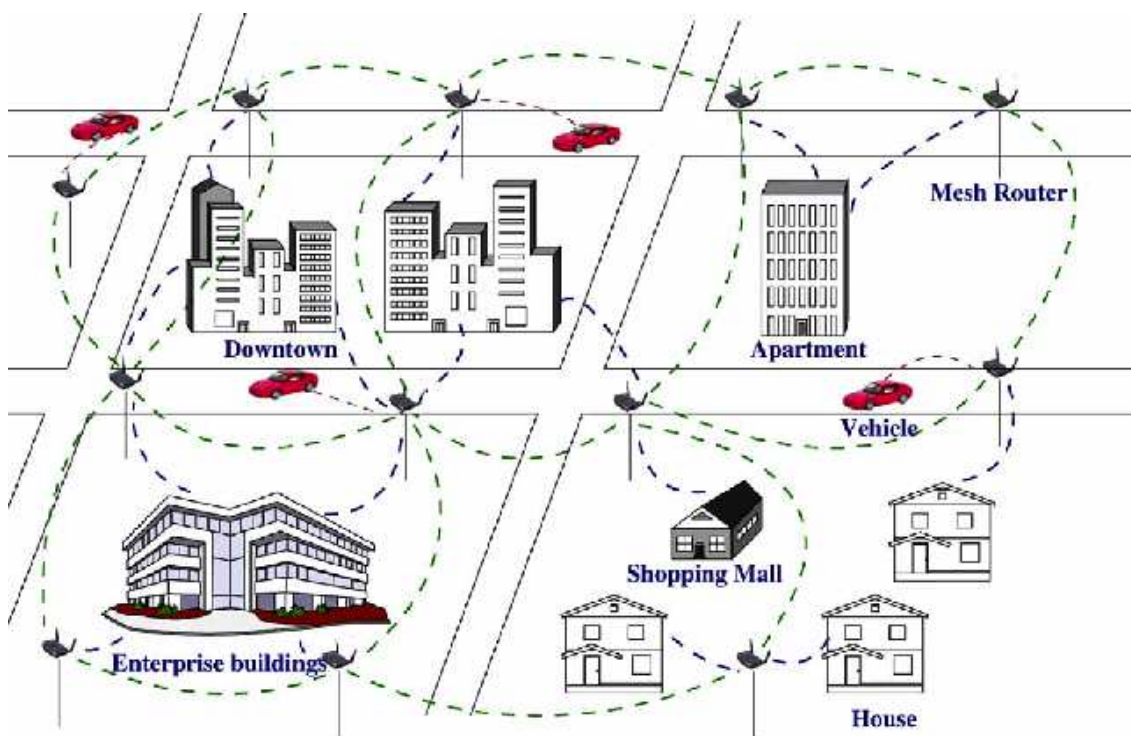


Figura 30 – Rede metropolitana baseada em rede *mesh* sem fio [Akyildiz et al. 2005]

[Abelém et al. 2005] apresentam um estudo interessante, comparando as vantagens e desvantagens da implantação de uma rede metropolitana baseada em redes *mesh* sem fio com uma rede metropolitana baseada em redes ópticas.

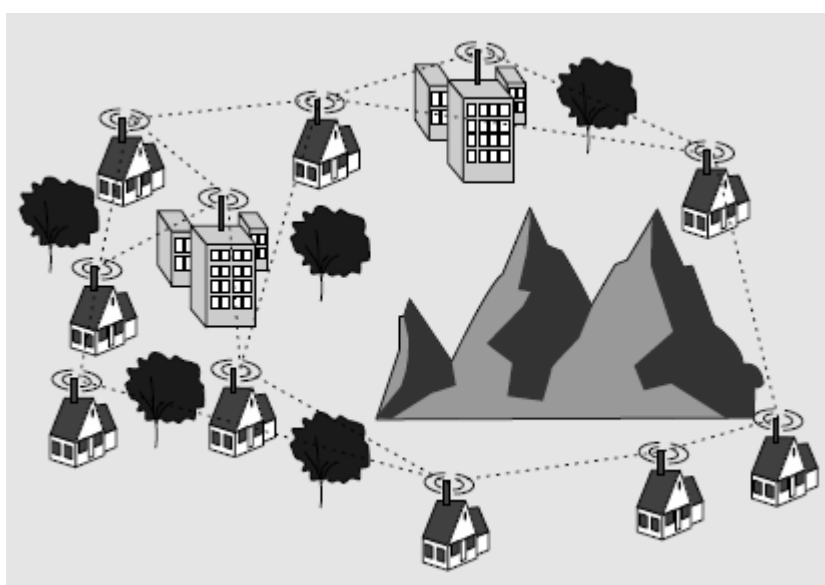


Figura 31 – Cobertura em Área com Baixa Densidade Populacional [Bruno et al. 2005]

[Bruno et al. 2005] ressaltam que a recente criação do grupo de trabalho IEEE 802.11s, concebido com objetivo de especificar as camadas *Network*, *MAC* e *PHY* para redes *mesh* e, conseqüentemente, incrementar a área de cobertura de redes WLAN, possibilitará a utilização deste novo padrão em redes metropolitanas e, inclusive, em áreas rurais ou com baixa densidade populacional. A Figura 31 exemplifica como pode ser obtida uma cobertura plena em uma área com baixa densidade populacional.

4.2.2.3 – Automação Predial

Inúmeros elementos de um edifício necessitam de controle e de monitoramento contínuo, tais como elevadores, sistemas de energia, ar condicionado, *splitters* etc. Tipicamente, sensores de controle instalados precisam estar conectados à uma rede cabeada para transmitir as informações obtidas, aumentando o custo de instalação dos sensores. [Akyildiz et al. 2005] relatam que embora a solução WiFi tenha sido adotada, o custo da conexão à rede Ethernet apresenta-se, ainda, como um fator negativo. Novamente as redes *mesh* sem fio despontam como a melhor solução, pois os roteadores *mesh* não requerem conexão com a rede cabeada, conforme pode ser observado na Figura 32.

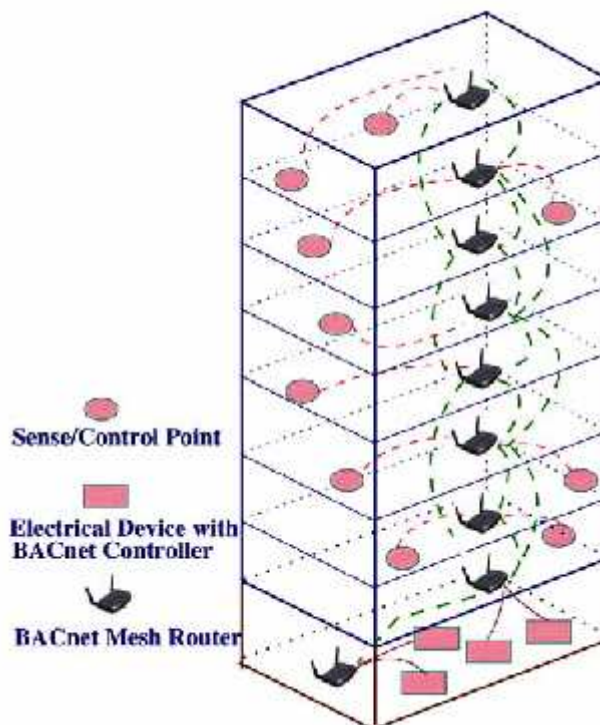


Figura 32 – Automação Predial com rede *mesh* sem fio [Akyildiz et al. 2005]

4.3 – Casos de Sucesso de Redes *Mesh*

Entre os vários casos de sucesso de redes *Mesh*, foram relacionados como referência três casos que encontram-se descritos nas subseções abaixo.

4.3.1 – *V Mesh*

Redes *mesh* são redes em malha auto-configuráveis que interconectam um conjunto de nós fixos em modo *ad hoc*, ou seja, sem infra-estrutura, com capacidade de roteamento. [Tsarmpopoulos et al. 2005] descrevem um modelo de rede *mesh* com objetivo de implantar uma rede de baixo custo que permita o acesso de professores, alunos e funcionários à Internet e aos servidores da Universidade de Thessaly, localizada na cidade de Volos, Grécia. Foram utilizados roteadores Linksys WRT54G e WRT54GS, operando nos padrões IEEE 802.11b/g e em modo *ad hoc*. O protocolo de roteamento escolhido foi o protocolo pró-ativo OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*).

A arquitetura do projeto *V Mesh* provê suporte a clientes móveis e fixos. Os roteadores foram instalados no alto de prédios de forma a proporcionar uma melhor conexão, possibilitando a integração dos clientes à rede. A Figura 33 apresenta a arquitetura projetada.

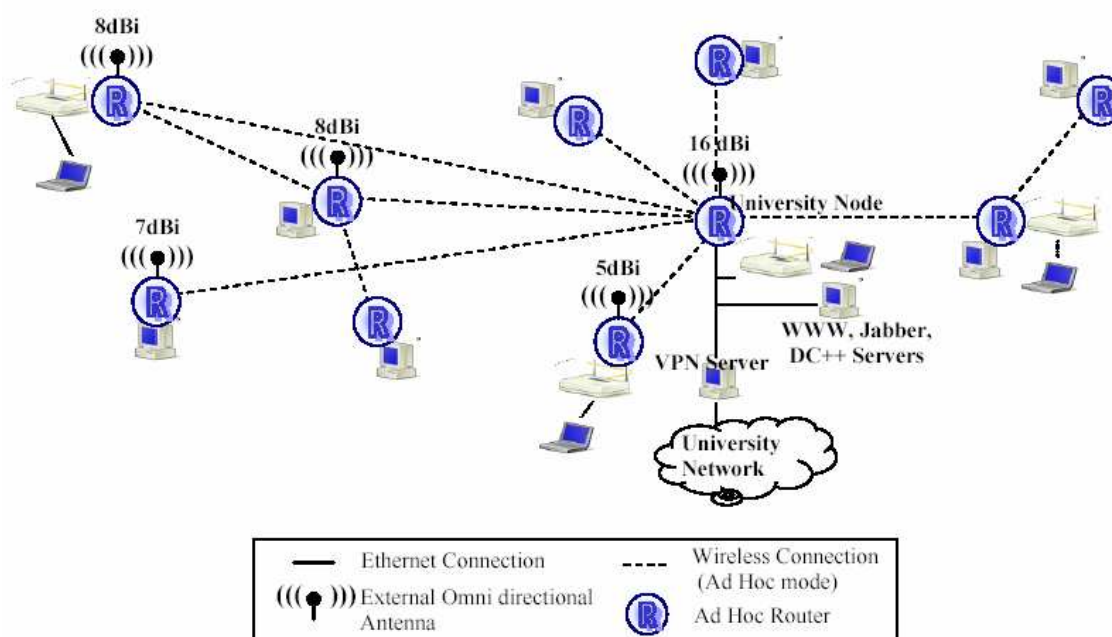


Figura 33 – Arquitetura *V Mesh* [Tsarmpopoulos et al. 2005]

4.3.2 – Taipei – Cidade Digital

Taipei, capital de Taiwan, é considerada a maior cidade digital. Com aproximadamente 4.000 pontos de acesso, a rede WiFi (*Wireless Fidelity*) instalada oferece cobertura a cerca de 90% da população local, estimada em 2,65 milhões de habitantes. Atualmente existem duas companhias provendo acesso WiFi à população: a Chunghwa Telecom Co. e a Q-ware Systems, cuja assinatura mensal é de US\$ 12.20. Segundo o prefeito da cidade, o objetivo principal da rede WiFi, baseada no padrão IEEE 802.11b, é reduzir a necessidade de deslocamento físico da população, oferecendo aos cidadãos acesso aos serviços governamentais e à Internet [Infoworld 2006].

4.3.3 – Mountain View

Em Agosto deste ano, o Google implantou na cidade de *Mountain View*, nos EUA, uma rede *mesh* baseada nos padrões IEEE 802.11b/g, provendo acesso gratuito à população local. Basta dispor de um *laptop* ou qualquer outro dispositivo sem fio para se conectar à rede GoogleWiFi. A Figura 34 apresenta um mapa da área de cobertura da rede GoogleWiFi com o posicionamento dos roteadores WiFi.

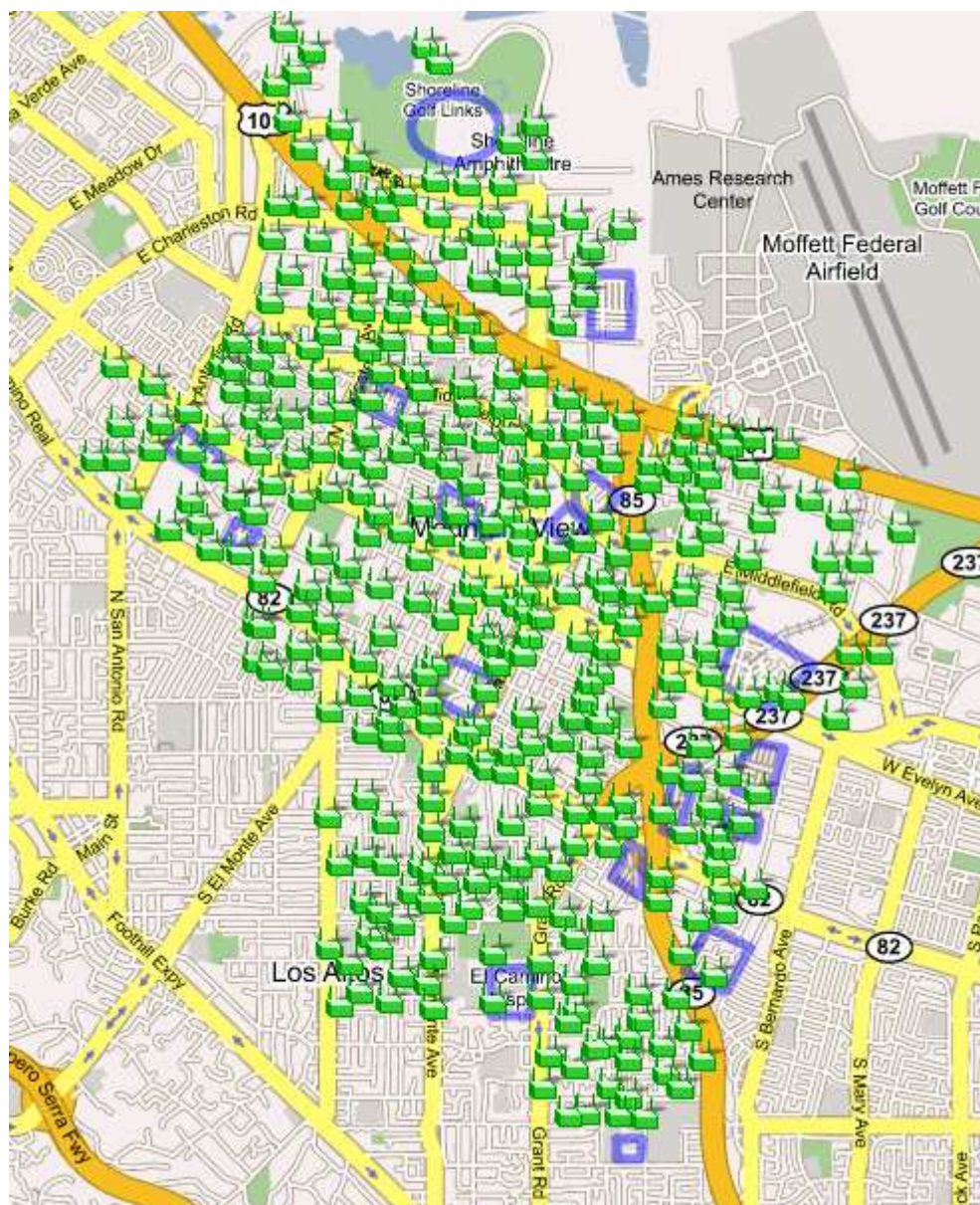


Figura 34 – Mapa de Cobertura de Google WiFi

4.3.4 – Projeto ReMesh

Encontra-se em desenvolvimento o projeto ReMesh, apoiado pelo GT Rede *Mesh* da RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa), que visa a implantação de rede de acesso sem fio para *campi* universitários baseado no padrão IEEE 802.11 em modo *ad hoc*, com o intuito de prover acesso aos universitários, funcionários e professores que residam em áreas próximas às respectivas universidades. Além do acesso gratuito à Internet, o projeto ainda se propõe a estudar o comportamento de protocolos de roteamento para redes *ad hoc*, com o intuito de otimizar o uso da rede [RNP 2006].

Como projeto piloto, o projeto ReMesh está instalando uma rede *mesh* ao redor dos diversos *campi* da Universidade Federal Fluminense, localizada na cidade de Niterói, no Rio de Janeiro. O protocolo OLSR está sendo avaliado em roteadores Linksys WRT54G e WRT54AG e o protocolo INSIGNIA está sendo implantado para garantia de QoS [Albuquerque et al. 2006].

Capítulo 5 – Redes *Ad hoc* Sem Fio

As redes *ad hoc* sem fio despontam como alternativa viável para implantação de Cidades Digitais e para o canal de interatividade da TV Digital Interativa, além de outras aplicações. Como já foi dito, o uso de redes *ad hoc* tanto para Cidades Digitais, quanto para o canal de interatividade da TV Digital Interativa, facilitaria a ação do Governo de promover a inclusão social e a inclusão digital, principalmente em relação ao custo. As seções a seguir apresentam as principais características, aplicações e protocolos de roteamento para redes *ad hoc* sem fio.

5.1 – Introdução

Uma rede *ad hoc* sem fio pode ser definida como uma rede onde uma parte ou todos os nós podem ou não ter mobilidade, onde a comunicação entre os nós ocorre de forma direta (não há necessidade de encaminhar todas as mensagens para um ponto central) e inexistem requerimentos para qualquer tipo de infra-estrutura. A comunicação entre os nós pode ser realizada através do envio de mensagens em *broadcast* ou através de transmissões ponto a ponto (*peer to peer*). Além disso, as redes *ad hoc* apresentam largura de banda limitada. Em função da possibilidade de mobilidade, comumente há preocupação com o consumo de energia e com o dinamismo da topologia da rede. Outro fator preocupante nos remete à questão do alcance das antenas de rádio-transmissão: como as antenas podem ter alcances diferenciados, os enlaces de comunicação podem ser classificados como simétricos (bidirecionais) ou assimétricos (unidirecionais).

Em função das características peculiares apresentadas, torna-se imprescindível a utilização de protocolos de roteamento desenvolvidos especificamente para atuar em redes *ad hoc* sem fio. A descoberta e a manutenção de rotas, assim como a taxa de transmissão de dados, são quesitos de extrema importância que distinguem a eficiência e o desempenho dos protocolos de roteamento *ad hoc* sem fio. Do mesmo modo, como a largura de banda é limitada, cabe aos protocolos de roteamento a função de evitar ao máximo o desperdício deste recurso precioso.

A preocupação com as características descritas motivou a criação do grupo de trabalho MANET (*Mobile Ad hoc Network*) do IETF (*Internet Engineering Task Force*), que tem como objetivo principal a padronização das funcionalidades dos protocolos de roteamento.

5.1.1 – Características das Redes Ad hoc Sem Fio

De acordo com [RFC-2501 1999] e [Cordeiro e Agrawal 2002], as redes *ad hoc* sem fio apresentam características próprias, tais como:

- Topologia Dinâmica – Os nós de uma rede *ad hoc* podem deslocar-se de forma dinâmica e imprevisível, continuamente ou em movimentos esparsos, alterando constantemente a topologia da rede e estabelecendo enlaces de comunicação simétricos e assimétricos. A mudança da topologia decorrente da mobilidade de algum nó deve ser identificada, em algum momento, pelos nós da rede;
- Largura de Banda Limitada – Quando comparada com as redes cabeadas, as redes sem fio apresentam, de fato, uma largura de banda limitada. Além disso, a variedade da capacidade dos enlaces de comunicação, os efeitos provenientes do compartilhamento do acesso ao meio de transmissão e as interferências afetam, de forma significativa, a taxa máxima de transmissão dos rádios-transmissores;
- Capacidade Limitada de Energia – Alguns nós de uma rede MANET podem ter sido dispostos em locais de difícil acesso ou inóspitos e, dessa forma, a única fonte de energia pode advir de baterias. Como a substituição das baterias muitas vezes é impossível ou inviável, o consumo de energia torna-se um dos principais quesitos a ser contabilizado pelos protocolos;
- Falta de Segurança – O fato de muitos nós de redes sem fio estarem localizados em áreas externas ou do sinal da rede alcançar áreas externas torna as redes sem fio mais vulneráveis do que as redes cabeadas;
- Rede Descentralizada – O fato de não haver um ponto central nas redes *ad hoc* implica a possibilidade de múltiplos caminhos entre um remetente e um destinatário, aumentando a robustez da rede em caso de falhas dos nós.

O fato das redes *ad hoc* permitirem a comunicação entre nós, através de múltiplos saltos, pode ser considerado uma de suas características mais importantes, principalmente quando consideramos o quesito área de cobertura. O fato de um nó estar fora do alcance de outro não impossibilita a comunicação entre eles, visto que a existência de nós intermediários viabiliza essa comunicação. Nesse tipo de comunicação, os nós intermediários atuam como roteadores, recebendo e encaminhando dados (*store and forward*).

Quando comparadas com as redes de celulares, notamos uma imensa vantagem das redes *ad hoc*. A comunicação entre 2 nós nas redes de celulares depende das ERBs (Estação Rádio Base), pois o modelo utilizado baseia-se em um único salto, e depende ainda do *backbone* da operadora ou das operadoras em questão. Logo, se houver uma única falha, a comunicação não poderá ser estabelecida.

5.1.2 – Aplicações para as Redes Ad hoc Sem Fio

[Cordeiro e Agrawal 2002] destacam que as redes *ad hoc* foram desenvolvidas, inicialmente, para fins militares. Como a instalação e a consequente manutenção de uma infra-estrutura de rede em um campo de batalha é algo inimaginável, as pesquisas foram direcionadas para uma rede capaz de se auto-organizar e de lidar com as consequências advindas da mobilidade e do dinamismo da topologia.

Entre as inúmeras aplicações para as redes *ad hoc*, além do uso militar, é possível relacionar as seguintes:

- Trabalho colaborativo – A comunicação sem fio em modo *ad hoc* e com múltiplos saltos possibilita a troca de informações através de aplicações comerciais e industriais. Funcionários de um estaleiro se comunicando, vendedores de carros no pátio de uma grande concessionária acessando informações sobre os veículos etc, são exemplos de trabalho colaborativo;
- Gerência de Crise – Redes *ad hoc* sem fio podem ser a única ou a melhor alternativa no caso de desastres naturais provocados por terremotos, tsunamis, furacões, outros agentes da natureza ou pela ação inconsequente do próprio ser humano;
- Redes *Mesh* – Redes *mesh* baseadas em protocolos *ad hoc* constituem uma alternativa para implantação de Cidades Digitais.

5.2 – Protocolos de Roteamento para Redes Ad hoc Sem Fio

Inúmeros autores, tais como [Rubinstein et al. 2006], [Cordeiro e Agrawal 2002], [Mauve et al. 2001], [Abolhasan et al. 2004] e [Royer e Toh 1999], classificam os protocolos de roteamento para redes *ad hoc* em protocolos reativos, protocolos pró-ativos e protocolos

híbridos. As definições para tais protocolos podem ser encontradas nas subseções 5.2.1 – Protocolos Pró-Ativos, 5.2.2 – Protocolos de Roteamento Reativos e 5.2.3 – Protocolos Híbridos. A Figura 35 apresenta a classificação dos principais protocolos para redes *ad hoc*.



Figura 35 – Protocolos de Roteamento para Redes *Ad hoc* [Abolhasan et al. 2004] e [Cordeiro e Agrawal 2002]

O problema principal das técnicas de roteamento está relacionado com a abordagem utilizada para permitir que todos os nós de uma rede se comunicar com o menor custo possível. Entre as técnicas tradicionais, podemos detalhar, sucintamente, a estado de enlace (*link-state*) e a vetor de distância (*distance-vector*).

Na abordagem estado de enlace (*link-state*), os nós de uma rede mantêm uma fotografia da topologia da rede e associam um custo para comunicação com cada um dos vizinhos. Para manter essa fotografia atualizada, é necessário que cada um dos nós envie, periodicamente, informações a respeito dos custos de comunicação obtidos para cada um dos nós conhecidos. À medida que os nós recebem as atualizações, elas são refletidas nas tabelas de roteamento de forma a manter sempre a rota de menor custo [Tanenbaum 2003, Kurose e Ross 2006].

Já na abordagem vetor de distância (*distance-vector*), os nós da rede mantêm uma tabela (vetor) com o conjunto de métricas que são utilizadas para calcular o menor custo para se alcançar um destino. Para manter este custo atualizado, os nós monitoram métricas de cada enlace e enviam, periodicamente, mensagens de atualização para cada um dos seus vizinhos. Essas mensagens contêm o resultado do cálculo da sua estimativa do custo de comunicação para cada nó conhecido [Tanenbaum 2003, Kurose e Ross 2006].

5.2.1 – Protocolos Pró-Ativos

[Cordeiro e Agrawal 2002] e [Royer e Toh 1999] afirmam que nos protocolos de roteamento pró-ativos (*table-driven*), os nós da rede mantêm informações de roteamento para todos os nós da rede, de forma que quando for necessário enviar dados para um determinado nó, a rota para este nó será conhecida. Essa abordagem implica um atraso inicial mínimo para o início da transmissão dos dados. O uso de protocolos pró-ativos, no entanto, não é recomendado para todas as aplicações, visto que uma parte significativa da banda de rede passa a ser consumida exclusivamente para o processo de manutenção das tabelas de roteamento dos nós da rede.

Os protocolos DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector*) [Perkins e Bhagwat 1994] e WRP (*Wireless Routing Protocol*) [Murthy e Garcia-Luna-Aceves 1996] são descritos pela maioria dos autores como protocolos pró-ativos. [Mauve et al. 2001] acrescentam à lista dos protocolos pró-ativos os protocolos OLSR (*Optimized Link State Routing*), DREAM (*Distance Routing Effect Algorithm for Mobility*), e TBRPF (*Topology Broadcast Reverse Path Forwarding*). Além destes já relacionados, [Abolhasan et al. 2004] relacionam os protocolos GSR (*Global State Routing*), FSR (*Fisheye State Routing*), STAR (*Source-Tree Adaptive Routing*), CGSR (*Cluster-head Gateway Switch Routing*) e MMWN (*Multimedia Support in Mobile Wireless Networks*). Dentre estes protocolos, os protocolos DSDV e OLSR serão apresentados abaixo.

[Abolhasan et al. 2004] concluem que os protocolos pró-ativos não são escaláveis, pois o processo de atualização das tabelas de roteamento dos nós consome uma quantidade significativa da banda da rede. Dentre os protocolos relacionados, o protocolo OSLR apresenta o melhor desempenho em função da redução da propagação de mensagens em *broadcast*, conforme poderá ser observado na subseção 5.2.1.2 – OLSR – *Optimized Link State Routing Protocol*.

5.2.1.1 – DSDV – *High Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector Protocol*

O protocolo DSDV [Perkins e Bhagwat 1994] é um protocolo pró-ativo baseado no algoritmo de roteamento Bellman-Ford, ou seja, utiliza a abordagem vetor de distância. A grande vantagem do protocolo DSDV sobre os demais protocolos baseados nesta abordagem é a sua capacidade de evitar a ocorrência de *loops*.

De acordo com [Rubinstein et al. 2006] e [Royer e Toh 1999], cada nó mantém uma tabela de roteamento com o endereço de destino (*next-hop*) para todos os demais nós da rede, além do custo para alcançar o nó de destino que é medido pelo número de saltos (*hops*) e do número de seqüência da rota recebida, entre outras informações. O número de seqüência possibilita a distinção entre rotas novas e rotas antigas, evitando, desta forma, a ocorrência de *loops* durante o processo de roteamento. Números de seqüência pares indicam rotas válidas, enquanto que números de seqüência ímpares indicam rotas inválidas.

O protocolo DSDV requer que todos os nós anunciem as suas tabelas de roteamento para os nós vizinhos e pressupõe que estes nós vizinhos encontram-se aptos a repassar pacotes adiante. Isso implica a necessidade dos enlaces de comunicação serem bidirecionais, de tal forma que anúncios recebidos através de enlaces unidirecionais devem ser descartados.

[Cordeiro e Agrawal 2002] afirmam que, com o intuito de reduzir a quantidade de informações enviadas através de mensagens de atualização de rotas, foram definidos 2 (dois) tipos de mensagens denominados de *full dump* e *incremental*. Mensagens do tipo *full dump* transportam todas as informações da tabela de roteamento, necessitam normalmente de várias NPDU's (*Network Protocol Data Unit*) e são transmitidas principalmente em momentos de movimento contínuo dos nós. Já as mensagens do tipo *incremental* transportam apenas alterações ocorridas desde o envio da última mensagem *full dump*, necessitando apenas de uma NPDU. Ao receber uma mensagem de atualização de rotas os nós seguem a seguinte rotina:

- Rotas com número de seqüência mais recente são armazenadas na tabela de roteamento;
- Rotas com número de seqüência inferior às armazenadas são descartadas;
- Rotas com número de seqüência igual às armazenadas somente serão armazenadas se a métrica for inferior;

Segundo [Broch et al. 1998] e [Johansson et al. 1999], quando um nó X identifica que sua rota para o nó Y encontra-se interrompida, o nó X anuncia uma nova rota para Y com um número de seqüência superior ao anterior e com o valor infinito (valor ímpar, superior ao anterior) para o custo. Este processo de atualização permite que o nó W, que está ao alcance

do nó X, atualize a sua tabela de roteamento, incorporando o valor infinito para o custo até que o nó X envie uma nova mensagem, com número de seqüência par superior.

5.2.1.2 – OLSR – *Optimized Link State Routing Protocol*

De acordo com [RFC-3626 2003], o protocolo OLSR é um protocolo pró-ativo, desenvolvido para redes móveis *ad hoc* e baseado na abordagem estado de enlace. Os nós mantêm informações acerca da topologia da rede através da troca periódica de mensagens. Cada nó seleciona um conjunto de vizinhos, denominados MPRs (*Multipoint Relays*), que serão os responsáveis pela difusão de mensagens de roteamento, reduzindo, significativamente, a quantidade de transmissões de controle.

[Hong et al. 2002] descrevem, em detalhes, o processo de seleção de MPRs. O nó A da Figura 36 envia, periodicamente, mensagens HELLO em *broadcast* para todos os nós que encontram-se a 1 salto (*hop*) de distância (identificados pelo círculo pontilhado) com o intuito de efetuar a troca de informações de vizinhança (lista de vizinhos conhecidos) e de construir seu conjunto MPR. A partir da troca de informações de vizinhança, o nó A é capaz de construir uma lista com a relação de todos os nós que encontram-se a 2 saltos (*hops*) de distância (identificados pelo círculo tracejado) e o conjunto MPR ideal (nós C, B, K e N conectados por setas tracejadas), com a menor quantidade de nós possível.

[Abolhasan et al. 2004] acrescentam que os nós que não pertencem ao conjunto MPR de A recebem e processam as informações transmitidas por A, mas não podem retransmiti-las. A difusão destas mensagens é de responsabilidade exclusiva dos nós que compõem o conjunto MPR. O conjunto MPR é recalculado, de acordo com [Jacquet et al. 2001], nas seguintes circunstâncias:

- Quando ocorrer alguma modificação na vizinhança, seja pela falha em um enlace bidirecional com alguns dos nós ou pela inclusão de algum nó com enlace bidirecional;
- Quando ocorrer alguma modificação no conjunto de nós que encontra-se a 2 saltos de distância, desde que o mesmo disponha de um enlace bidirecional.

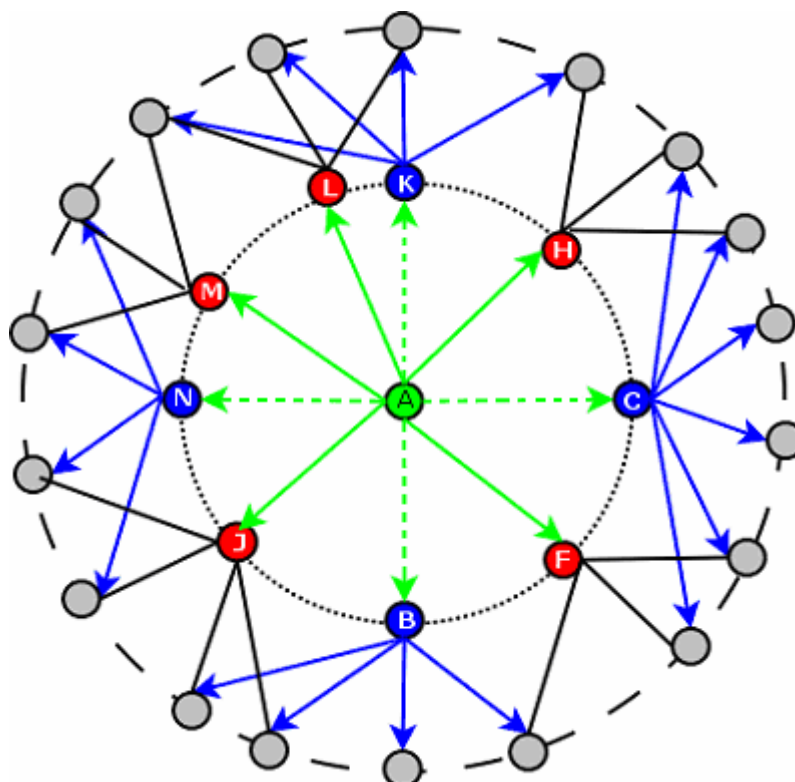


Figura 36 – Construção do conjunto MPR [Abolhasan et al. 2004]

Segundo [Rubinstein et al. 2006] e [Hong et al. 2002], o protocolo OSLR é particularmente interessante para redes densas, pois a redução do tráfego de controle é significativa quando comparado com protocolos tradicionais de estado de enlace.

5.2.2 – Protocolos de Roteamento Reativos

[Cordeiro e Agrawal 2002] e [Royer e Toh 1999] relatam que nos protocolos de roteamento reativos ou por demanda, os nós da rede somente iniciam o processo de descobrimento de rotas no momento em que existe alguma informação a ser transmitida, ou seja, quando há uma demanda. Esta abordagem implica um atraso inicial maior para a transmissão dos dados, no entanto, o tráfego de controle também é bem menor, tornando os protocolos reativos mais apropriados para redes com alta densidade de nós.

Os protocolos DSR [Johnson e Maltz 1996], AODV [Perkins e Royer 1999] e TORA [Park e Corson 1997] são descritos pela maioria dos autores como protocolos reativos. [Royer e Toh 1999] acrescentam à lista dos protocolos reativos os protocolos LMR (*Light-weight Mobile Routing*), ABR (*Associativity-Based Routing*) e SSR (*Signal Stability Routing*). Além destes já relacionados, [Abolhasan et al. 2004] relacionam os protocolos ROAM (*Routing On-*

demand Acyclic Multi-path), RDMAR (*Relative Distance Microdiscovery Ad hoc Routing*), LAR (*Location-aided routing*), ARA (*Ant-colony-based Routing Algorithm*), FORP (*Flow Oriented Routing Protocol*) e CBRP (*Cluster-Based Routing Protocol*). Dentre estes protocolos, os protocolos DSR (*Dynamic Source Routing*) e AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*) são apresentados na subseções 5.2.2.1 – DSR – *Dynamic Source Routing Protocol* e 5.2.2.2 – AODV – *Ad hoc On-demand Distance Vector Protocol*.

[Abolhasan et al. 2004] concluem que os protocolos reativos atuam, praticamente, da mesma forma durante o processo de descoberta e manutenção de rota e relatam que o pior caso ocorre quando um nó de origem deseja obter uma rota para um nó de destino com o qual ainda não houve comunicação.

5.2.2.1 – DSR – *Dynamic Source Routing Protocol*

Segundo [Johnson e Maltz 1996], o protocolo DSR utiliza a abordagem reativa e foi proposto especificamente para atender a requisitos de roteamento para redes *ad hoc*. Para que qualquer nó da rede possa enviar pacotes, este deve determinar a seqüência completa de nós (*source route*) através dos quais os pacotes serão encaminhados até alcançar o nó de destino. Para cada nó do caminho percorrido, o pacote identificará o próximo salto (*next hop*), possibilitando o encaminhamento por todo o percurso.

[Abolhasan et al. 2004] ressaltam que como o protocolo DSR não envia, periodicamente, mensagens de controle, as rotas são definidas dinamicamente, ou seja, no momento em que cada nó necessita e baseadas em informações armazenadas recentemente ou através um processo de descoberta de rotas. Este procedimento proporciona uma economia de energia significativa para os nós móveis, além de reduzir o tráfego de dados de controle. Já os protocolos de roteamento baseados em estado de enlace (*link state*) e vetor de distância (*distance vector*) enviam, periodicamente, mensagens de controle, aumentando o consumo de bateria de nós móveis e o tráfego na rede. Muitas das mensagens de controle são enviadas independente da ocorrência de alteração na topologia da rede.

Conforme [Royer e Toh 1999], o protocolo DSR consiste, basicamente, de dois processos: o processo de descoberta de rota (*route discovery*) e o processo de manutenção de rota (*route maintenance*). Para enviar um pacote para um destino, o nó de origem consulta, inicialmente, a sua tabela de rotas, denominada *root cache*. Se houver uma rota válida para o

destino, esta rota será utilizada para efetuar o encaminhamento do pacote. Caso contrário, será necessário iniciar um procedimento de descoberta de rota, através do envio, em *broadcast*, de um pacote *route request*, contendo o endereço do nó de destino, o endereço do nó de origem e um identificador único. Os nós da rede, ao receberem o pacote *route request*, verificam se dispõem de rota para o nó de destino. Em caso negativo, adicionam o seu próprio endereço e propagam, em *broadcast*, o pacote *route request*. Um *route reply* é gerado quando o pacote *route request* alcança o nó de destino ou um nó intermediário que contenha uma rota válida para o nó de destino. A Figura 37 apresenta o processo de propagação dos pacotes *route request*.

Como os nós de uma rede *ad hoc* são móveis, podem ser desligados ou sofrerem interferência, não existe garantia que uma rota seja mantida por um período de tempo qualquer. Logo, torna-se imperativo o procedimento de monitoramento de rotas, denominado *route maintenance*. Quando o *route maintenance* identifica um problema em uma rota, o procedimento de descoberta de rota (*route discovery*) deve ser iniciado. Além disso, o protocolo DSR pode utilizar as camadas de acesso ao meio ou camadas superiores (de transporte ou de aplicação) para obter informações a respeito de falhas. Neste caso, o nó que identificou a falha envia um pacote *route error* para o nó de origem, invalidando a rota na *root cache* [Johansson et al. 1999].

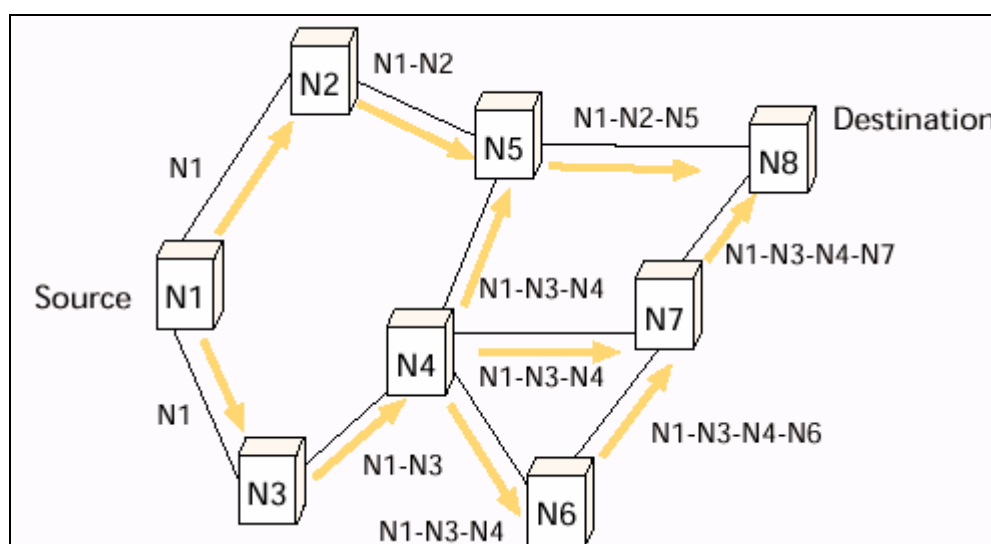


Figura 37 – *Route Request* do protocolo DSR [Royer e Toh 1999]

Já a Figura 38 apresenta o processo de propagação do pacote *route reply*.

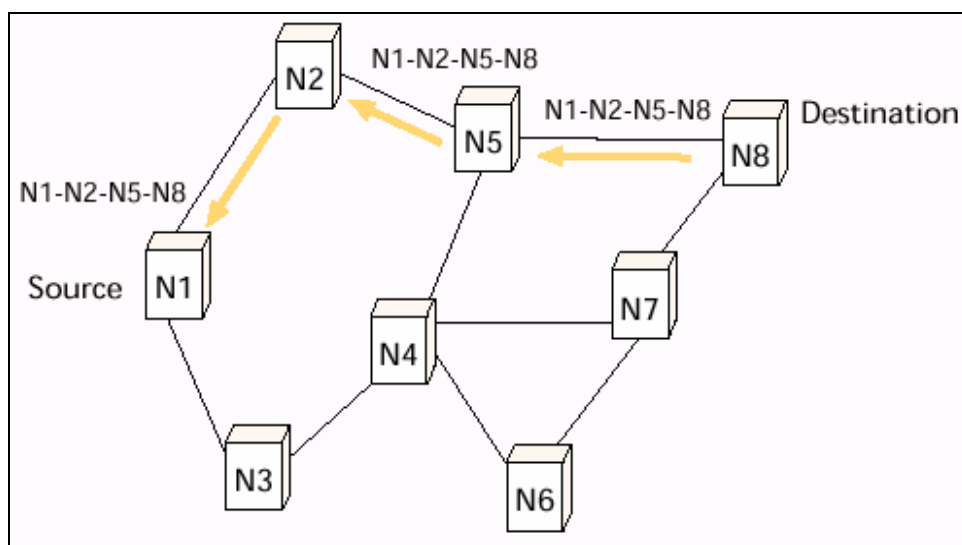


Figura 38 – *Route Reply* do protocolo DSR [Royer e Toh 1999]

Informações complementares sobre o funcionamento do protocolo DSR também podem ser obtidas em [Johnson e Maltz 1996], [Broch et al. 1998], [Hong et al. 2002], [Cordeiro e Agrawal 2002], [Rubinstein et al. 2006] etc.

5.2.2.2 – AODV – *Ad hoc On-demand Distance Vector Protocol*

Segundo [RFC-3561 2003] e [Perkins e Royer 1999], o protocolo AODV foi projetado para atuar em redes móveis sem infra-estrutura e sem necessidade de intervenção de um ponto de acesso centralizado. O protocolo AODV requer que os enlaces de comunicação sejam bidirecionais e descarta informações oriundas de enlaces unidirecionais, dispõe de mecanismos que possibilitam uma rápida adaptação ao dinamismo de redes móveis sem fio, baixos requisitos de processamento e memória, baixa utilização da banda de rede e a utilização de números de seqüência com o intuito de evitar a ocorrência de *loops*, tal como o protocolo DSDV.

[Cordeiro e Agrawal 2002] definem o protocolo AODV como uma combinação dos protocolos DSR [Johnson e Maltz 1996] e DSDV [Perkins e Bhagwat 1994], previamente apresentados. Do protocolo DSR, o protocolo AODV utiliza praticamente o mesmo mecanismo reativo para descoberta e para manutenção de rotas, além do número de seqüência, roteamento salto-a-salto (*hop-by-hop*) e o envio periódico de mensagens de controle do protocolo DSDV. No entanto, por ser reativo, o protocolo AODV não envia tantas mensagens em *broadcast* quanto o DSDV e, ao contrário do protocolo DSDV, nós operando o protocolo AODV não necessitam descobrir nem manter uma rota para um determinado nó até

que seja necessária a comunicação ou que o nó esteja operando como um nó intermediário na comunicação entre dois outros nós. Para manter informações de roteamento atualizadas, o AODV baseia-se no protocolo DSDV.

Conforme [Rubinstein et al. 2006], [Royer e Toh 1999] e [Broch et al. 1998], o processo de *path discovery* inicia-se no instante em que um nó necessita se comunicar com outro nó e não existe informação na sua tabela de roteamento. O nó então envia um pacote RREQ (*Route Request*) em *broadcast*, contendo os campos endereço de origem, seqüência de origem, identificação do *broadcast*, endereço de destino, seqüência de destino e contador de *hops*. Os campos endereço de origem e identificação do *broadcast* identificam, univocamente, o RREQ. Os nós respondem enviando um pacote RREP (*Route Reply*) para o solicitante ou propagam, em *broadcast*, o pacote RREQ recebido. Caso um nó receba um pacote RREQ duplicado, o mesmo será descartado. Os processo de RREQ e RREP encontram-se exemplificados na Figura 39.

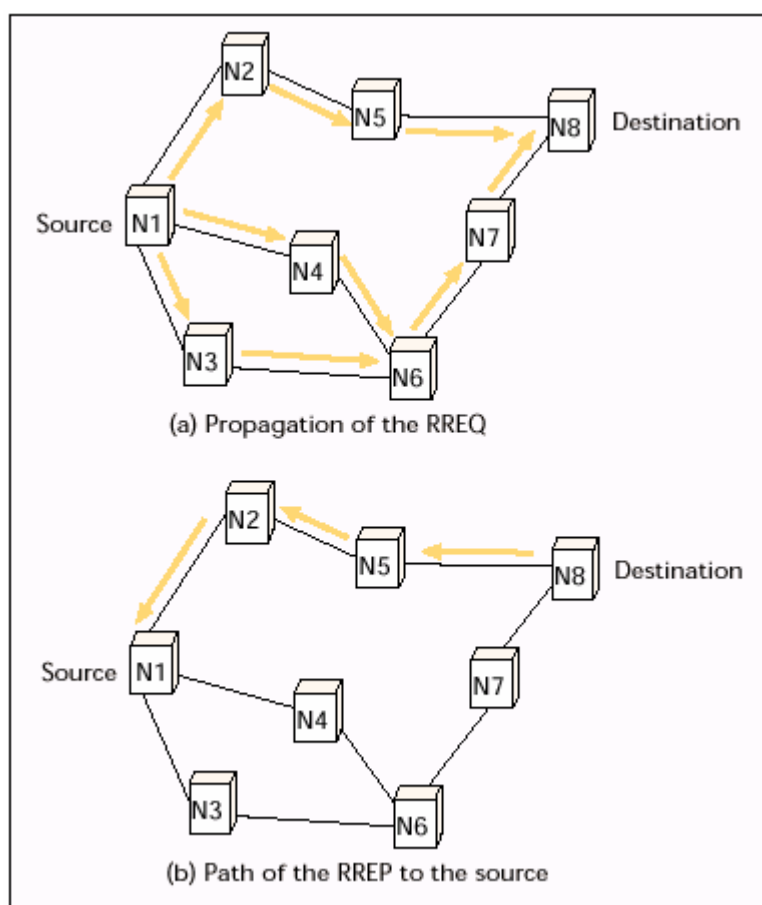


Figura 39 – *Route Request* e *Route Reply* do protocolo AODV [Royer e Toh 1999]

Caso um nó intermediário não disponha de uma rota para o nó de destino, ele deve manter informações que permitam a construção do *reverse path* e, posteriormente, do *forward path* [Perkins e Royer 1999].

O processo de manutenção de rotas é iniciado quando um nó de origem se move. Neste caso, o nó de origem reinicia o processo de descoberta de rota, com o intuito de identificar uma nova rota para o nó de destino. Caso um nó intermediário participante de uma comunicação se mova, o nó vizinho identifica a falha e encaminha um pacote RREP (com valor infinito) para todos os seus vizinhos, informando a ocorrência de uma falha e, conseqüentemente, uma interrupção da rota previamente estabelecida. Todos os demais nós propagam a ocorrência da falha até que uma mensagem RREP chegue ao nó de origem. Esta mensagem RREP de erro é denominada RERR. A partir deste ponto, o nó de origem pode iniciar um novo processo de descoberta de rota, se a mesma ainda for necessária [Cordeiro e Agrawal 2002].

Pacotes de *hello* são utilizados, periodicamente, para confirmar a simetria nos enlaces de comunicação ou para detectar a queda de um enlace. Um nó, ao identificar a queda de um enlace, propagará um pacote RREP com o número de seqüência atualizado e com o contador de *hops* com valor 255 (infinito) [Perkins e Royer 1999].

5.2.3 – Protocolos Híbridos

De acordo com [Abolhasan et al. 2004], os protocolos híbridos reúnem em um único protocolo as abordagens de protocolos reativos e pró-ativos. A adoção das duas abordagens, aproveitando o que cada uma apresenta de melhor, permite que os protocolos híbridos sejam escaláveis. A abordagem pró-ativa é utilizada para manter uma tabela de roteamento sempre atualizada somente para os nós que estejam próximos entre si, formando uma espécie de *backbone*. Para os nós que encontram-se distantes, as rotas são estabelecidas somente quando ocorre alguma demanda, através da abordagem reativa. A maioria dos protocolos híbridos propostos é baseada em zonas, o que implica um particionamento da rede.

[Cordeiro e Agrawal 2002] descrevem os protocolos ZRP (*Zone Routing Protocol*), FSR (*Fisheye State Routing*) e LANMAR (*Landmark Ad hoc Routing*) como híbridos, embora [Abolhasan et al. 2004] classifiquem o protocolo FSR como pró-ativo. [Abolhasan et al. 2004] apresentam ainda os protocolos ZHLS (*Zone-based Hierarchical Link State*), SLURP

(*Scalable Location Update Routing protocol*), DST (*Distributed Spanning Trees Based Routing Protocol*) e DDR (*Distributed Dynamic Routing*) como híbridos. O protocolo ZRP será descrito na subseção 5.2.3.1 – ZRP – *Zone Routing Protocol*.

5.2.3.1 – ZRP – *Zone Routing Protocol*

Segundo [Haas e Pearlman 2001], a abordagem de protocolos puramente reativos e pró-ativos induz a necessidade de protocolos iniciarem o processo de descoberta de rotas sob demanda, mas de forma limitada. O protocolo ZRP atua limitando a abordagem pró-ativa: para um determinado nó A, a abordagem pró-ativa será utilizada somente para determinar e manter as rotas para os nós que estejam na sua vizinhança. A busca por uma rota para um nó que não pertence à vizinhança implicará o uso da abordagem reativa.

[Abolhasan et al. 2004] esclarecem que a métrica utilizada para limitar o uso da abordagem pró-ativa é a quantidade de saltos, criando uma zona de roteamento (*routing zone*). Ou seja, as rotas para os nós que estejam dentro da zona de roteamento estarão sempre disponíveis. [Haas 1997] denomina essa métrica de *zone radius*. A Figura 40 apresenta uma zona de roteamento de 2 saltos, representada pelo nó S. Cabe ressaltar que zonas de roteamento de nós vizinhos irão se sobrepor.

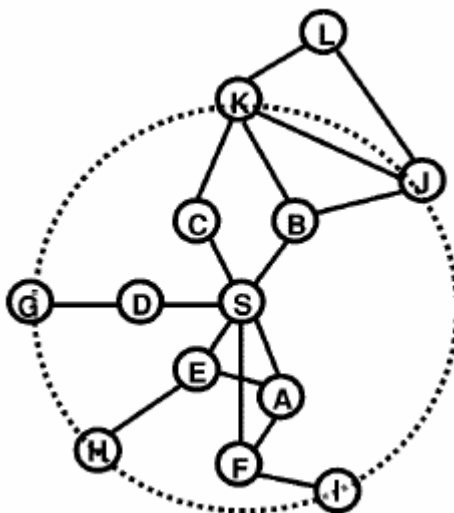


Figura 40 – Zona de Roteamento de 2 saltos [Haas e Pearlman 2001]

[Cordeiro e Agrawal 2002] afirmam que o roteamento intra-zona (pró-ativo), ou seja, dentro da zona de roteamento, é de responsabilidade do protocolo IARP (*IntraZone Routing Protocol*), já o roteamento inter-zona (reativo), ou seja, entre nós que encontram-se em zonas

de roteamento diferentes, é de responsabilidade do protocolo IERP (*IntErzone Routing Protocol*).

A Figura 41 ilustra a zona de roteamento de todos os nós e, em especial, do nó S. O *zone radius* utilizado é igual a 1.

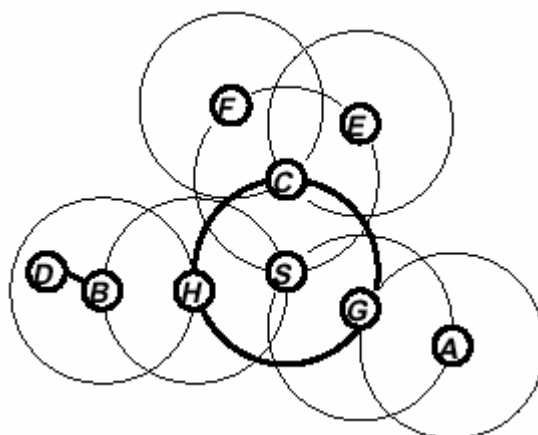


Figura 41 – Zona de Roteamento no Protocolo ZRP [Haas 1997]

Para que o nó S possa enviar um pacote para o nó D, será necessário estabelecer uma rota de S para D. Inicialmente, S identifica que D não pertence à sua zona de roteamento (no exemplo da Figura 41, nós com quantidade de saltos igual 1) e, então, envia um pedido de descoberta de rota para todos os seus vizinhos, representados pelos nós C, G e H. Os nós vizinhos de S, após verificarem que não dispõem de rota para D, enviam um pedido de descoberta de rota para os seus vizinhos. O nó H, ao enviar o pedido para B, obtém uma rota para D, possibilitando a criação da rota S-H-B-D [Haas 1997].

[Abolhasan et al. 2004] ressaltam a importância da determinação da quantidade de saltos (*hops*) e, conseqüentemente, da zona de roteamento (*routing zone*) para o protocolo ZRP. Caso a zona de roteamento seja composta por um grande número de saltos, o protocolo ZRP agirá exatamente como um protocolo pró-ativo. No entanto, caso a zona de roteamento seja composta por um pequeno número de saltos, o protocolo ZRP comportar-se-á como um protocolo reativo. Quando comparado com protocolos puramente pró-ativos, fica evidente que o protocolo ZRP consome muito menos banda de rede, assim como quando comparado com protocolos puramente reativos, fica evidente que o atraso inicial é bem inferior.

Mais detalhes do protocolo ZRP podem ser obtidos em [Haas 1997] e [Haas e Pearlman 2001].

Capítulo 6 – Redes de Sensores Sem Fio

De acordo com [Intanagonwiwat et al. 2000], [Akyildiz et al. 2002a], [Loureiro et al. 2003], [Ruiz et al. 2004] e [Thepvilojanapong et al. 2005], entre outros, avanços recentes na tecnologia de sensores podem ser observados no desenho de novos sistemas operacionais, na transmissão de dados em RF (Rádio-Frequência) com baixo consumo de energia e no uso da tecnologia de micro sistemas elétrico-mecânicos (MEMS – *Micro-Eleetro-Mechanical Systems*), que é capaz de prover sensores compactos, confiáveis e de baixo custo.

Os avanços descritos influenciaram positivamente os protocolos de roteamento para redes de sensores, possibilitando o desenvolvimento de novos protocolos e o aprimoramento dos protocolos existentes. Com base nas afirmativas anteriores, é possível supor que os protocolos de roteamento para RSSFs (Redes de Sensores Sem Fio) podem ser avaliados como uma alternativa viável para a implantação de Cidades Digitais, para o canal de interatividade e para o canal de descida complementar da TV Digital Interativa, além de outras aplicações. As seções a seguir descrevem as principais características, aplicações e protocolos de roteamento (disseminação de dados) para redes de sensores sem fio.

6.1 – Introdução

[Estrin et al. 1999] e [Akyildiz et al. 2002a] definem sensores como pequenos dispositivos, com baixo consumo de energia, capazes de auto-organização, cooperação, processamento, comunicação e monitoramento de objetos, animais, condições meteorológicas etc. Colônias de sensores podem ser lançadas ou estrategicamente posicionadas em locais inóspitos ao ser humano, provendo informações cruciais para a tomada de decisão ou para pesquisas científicas. A Figura 42 apresenta alguns exemplos de sensores.

A tecnologia para o desenvolvimento de sensores para RSSFs encontra-se disponível no meio acadêmico e comercial. Entre os projetos em desenvolvimento, podemos citar o Smart Dust, Macro Motes e Mica Motes da Universidade de Berkeley, MicroAmps do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), WINS da UCLA (*University of California, Los Angeles*), SensorWeb do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) e do *California Institute of Technology*, SCADDS (*Scalable Coordination Architectures for Deeply Distributed Systems*) etc [Ruiz et al. 2004].

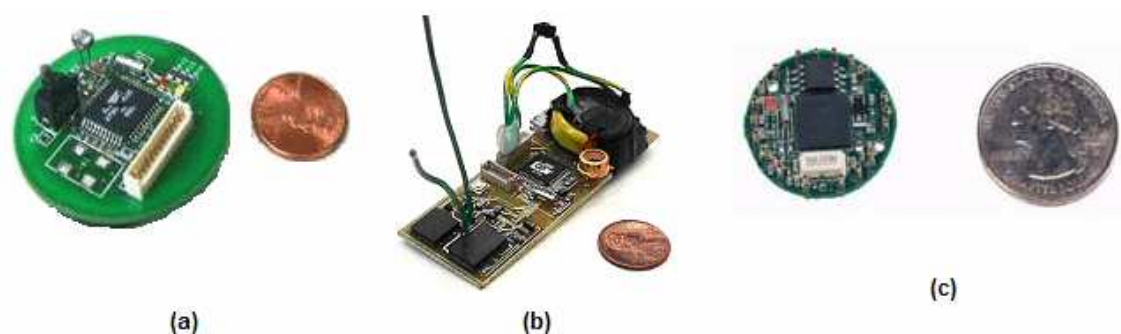


Figura 42 – Exemplos de Sensores (a) e (b) COTS Dust e (c) JPL com TinyOS [Loureiro et al. 2003] e [Zess 2006]

Uma rede de sensores sem fio é composta de um grande número de sensores (nós sensores) posicionados dentro do fenômeno a ser observado ou próximo a ele. Como as redes de sensores sem fio são capazes de se auto-organizar, torna-se dispensável um planejamento minucioso de posicionamento dos sensores. [Loureiro et al. 2003] definem as RSSFs como uma variação de uma MANET. Em uma rede tradicional, a comunicação entre os nós da rede passa, necessariamente, por uma estação base, criando uma infra-estrutura de comunicação. Já em uma rede *ad hoc*, conforme apresentado no Capítulo 5 – Redes *Ad hoc* Sem Fio, os nós da rede trocam dados entre si. Embora as RSSFs e as MANETs mantenham a mesma forma de organização, as MANETs tem como função prover o suporte necessário à comunicação dos nós da rede, que podem estar executando tarefas diferenciadas. Já nas RSSFs, os nós da rede (sensores) tendem a executar uma tarefa colaborativa, provendo dados que são processados (consumidos) por nós especiais, tipicamente denominados de sensores sorvedouro (*sink node*). A Figura 43 exemplifica os tipos de rede sem fio.

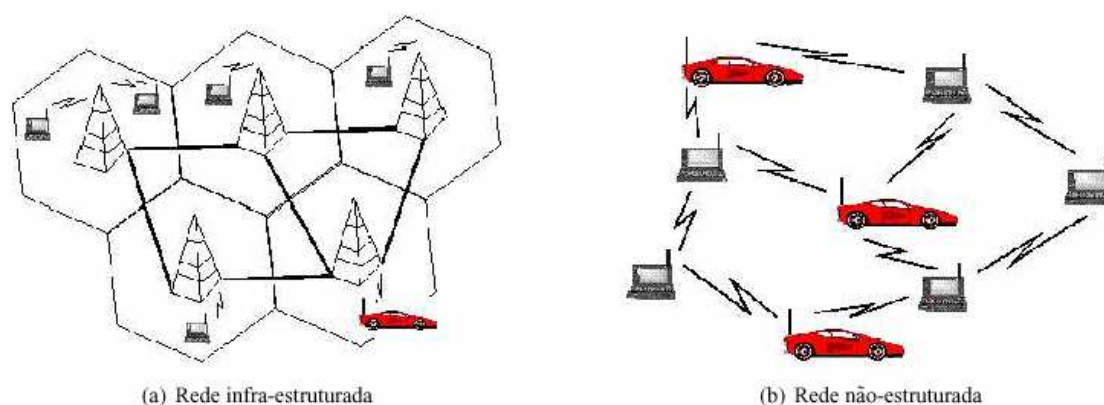


Figura 43 – Tipos de Rede Sem Fio [Loureiro et al. 2003]

Segundo [Tilak et al. 2002a], as redes de sensores sem fio possuem os seguintes atores:

- **Sensor Fonte:** é um dispositivo capaz de efetuar o sensoriamento de um determinado fenômeno e de enviar, através de uma rede sem fio, as informações obtidas através das medições efetuadas. [Loureiro et al. 2002] afirmam que os sensores fonte podem ser equipados com vários tipos de sensores, tais como acústico, sísmico, infra-vermelho, calor, temperatura, pressão etc. Um sensor fonte consiste, tipicamente, de uma unidade de sensoriamento (sensor), memória, bateria, processador embarcado e um transmissor-receptor;
- **Observador:** caracteriza-se pelo usuário final que deseja obter informações disseminadas pela rede de sensores sobre o fenômeno observado. Cabe ao observador determinar interesses (consultas) à rede de sensores e receber respostas às solicitações. Múltiplos observadores podem coexistir em uma rede de sensores;
- **Fenômeno:** caracteriza-se pela entidade cujo observador mantém interesse e que está sendo monitorada pela rede de sensores. As informações coletadas podem ser analisadas e filtradas pela rede de sensores, assim como é possível a observação concorrente de múltiplos fenômenos em uma única rede de sensores.

[Ruiz et al. 2004] relacionam e descrevem os protocolos de acordo com a respectiva camada de atuação. Cabe ressaltar que esta dissertação abordará somente os protocolos da camada de rede. Detalhes acerca do funcionamento dos demais protocolos podem ser encontrados em [Ruiz et al. 2004], [Cordeiro e Agrawal 2002] e [Akyildiz et al. 2002b]. A Figura 44 apresenta um resumo desta classificação.

Camada	Protocolos
Transporte	PFSQ, ESRT, RMST
Rede	DD, SPIN, SAR, MULTI, STORM, PROC, TinyBeaconing, LEACH, LEACH-C, TEEN, PEGASIS, ICA, GEOMOTE, GEAR, GPSR
Enlace	S-MAC, ARC, T-MAC, B-MAC, DE-MAC, TRAMA
Física	Transmissão em Rádio Frequência (RF), ótica e infra-vermelho

Figura 44 – Protocolos para RSSFs [Ruiz et al. 2004]

6.1.1 – Características das Redes de Sensores Sem Fio

Por se tratar de uma variação de redes *ad hoc*, algumas características são compartilhadas entre as RSSFs e as MANETs [RFC-2501 1999][Cordeiro e Agrawal 2002], tais como:

- Topologia Dinâmica – Os sensores de uma RSSFs podem se deslocar de forma dinâmica e imprevisível, continuamente ou em movimentos esparsos, alterando constantemente a topologia da rede e estabelecendo enlaces de comunicação simétricos e assimétricos. A mudança da topologia decorrente da mobilidade de algum sensor deve ser identificada, em algum momento, pelos demais sensores da rede;
- Largura de Banda Limitada – Quando comparada com as redes cabeadas, as redes sem fio apresentam, de fato, uma largura de banda limitada. Além disso, a variedade da capacidade dos enlaces de comunicação, os efeitos provenientes do compartilhamento de acesso ao meio de transmissão e as interferências afetam, de forma significativa, a taxa máxima de transmissão dos rádios-transmissores;
- Capacidade Limitada de Energia – Alguns sensores de uma RSSF podem ter sido dispostos em locais de difícil acesso ou inóspitos e, desta forma, a única fonte de energia pode advir de baterias. Como a substituição destas baterias muitas vezes é impossível ou inviável, o consumo de energia torna-se um dos principais quesitos a ser contabilizado pelos protocolos;
- Segurança – O fato de muitos sensores de redes sem fio estarem localizados em áreas externas ou do sinal da rede alcançar áreas externas torna as redes sem fio mais vulneráveis que as redes cabeadas;
- Rede Descentralizada – O fato de não haver um ponto central nas redes *ad hoc* implica a possibilidade de múltiplos caminhos entre um remetente e um destinatário, aumentando a robustez da rede em caso de falhas dos sensores.

O fato das RSSFs permitirem a comunicação entre sensores através de múltiplos saltos pode ser considerada uma das características mais importantes, principalmente quando consideramos o quesito área de cobertura. O fato de um par de sensores (sensor fonte e sensor sorvedouro) não estar um ao alcance do outro não implica, obrigatoriamente, que os mesmos não poderão se comunicar, pois a existência de sensores intermediários poderá viabilizar a

comunicação. Neste tipo de comunicação, os sensores intermediários atuam como roteadores, recebendo e encaminhando dados (*store and forward*).

Uma relação abrangente de características de redes de sensores, tais como composição, organização, mobilidade, densidade, tipo de coleta de dados etc, pode ser encontrada em [Ruiz et al. 2004]. Algumas das principais características, inerentes às RSSFs, são apresentadas nas sub-seções seguintes.

6.1.1.1 – Roteamento Centrado em Dados

[Estrin et al. 1999] descrevem um novo paradigma onde, diferentemente das redes tradicionais, nas redes de sensores, os sensores não necessitam ter uma identidade, isto é, um endereço. Conseqüentemente, as aplicações desenvolvidas para redes de sensores não são capazes de efetuar questionamentos clássicos como: “Qual a temperatura no sensor 14?”. As aplicações desenvolvidas para redes de sensores mantêm o foco nos dados, os quais são identificados por atributos e podem ser localizados comparando-se os valores coletados pelos sensores com os valores dos atributos requisitados pelas aplicações.

De acordo com a abordagem apresentada, as aplicações desenvolvidas para redes de sensores devem efetuar questionamentos como: “Onde encontram-se os sensores cuja temperatura recentemente ultrapassou os 30 graus?” ou “Em qual área a umidade está abaixo de 15%?”, desassociando os dados do sensor fonte que efetivamente os produziu. Essa abordagem aumenta a robustez das aplicações, pois como os sensores podem armazenar informações de outros sensores, mesmo que ocorra uma falha em qualquer sensor fonte, um sensor próximo pode recuperar a informação solicitada.

6.1.1.2 – Agregação de Dados

Conforme [Loureiro et al. 2003], como as RSSFs são centradas em dados, a atividade de disseminação de dados deve ser analisada no nível da aplicação, de forma que seja possível definir se os dados serão simplesmente retransmitidos, agregados com outros dados e transmitidos ou apenas eliminados. A Figura 45 apresenta as diferenças entre o processo de roteamento tradicional e a roteamento (disseminação) com agregação de dados.

Observando a Figura 45, identificamos os sensores fonte A, B e C enviando dados para o sensor sorvedouro S. No roteamento tradicional, o processo de difusão dos dados

implicaria a transmissão de 9 mensagens, já no processo de roteamento (disseminação) com agregação de dados, seriam transmitidas apenas 6 mensagens. Na Figura 45b, o primeiro sensor em destaque agrega as mensagens a e b em ab. Em seguida, o segundo sensor em destaque, agrega a mensagem ab com a mensagem c, gerando uma única mensagem abc. Além de reduzir o tráfego na rede, o processo de agregação de dados provê economia de energia para a RSSF.

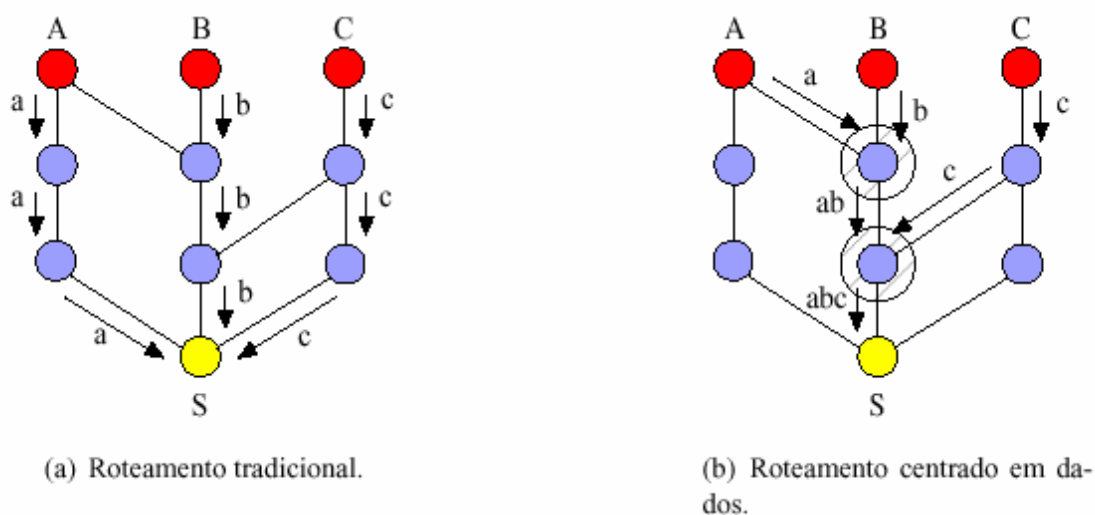


Figura 45 – Roteamento Tradicional e Roteamento Centrado em Dados [Loureiro et al. 2003]

6.1.1.3 – Aplicações Específicas

As redes tradicionais são projetadas para prover recursos para uma grande variedade de aplicações. Já as redes de sensores são projetadas para um fim específico, possibilitando que sensores possam realizar funções específicas de agregação de dados e armazenamento das aplicações.

6.1.2 – Aplicações para as Redes de Sensores Sem Fio

[Estrin et al. 1999], [Akyildiz et al. 2002a], [Loureiro et al. 2003], [Ruiz et al. 2004] entre tantos outros autores destacam que as redes de sensores podem ser constituídas de vários tipos de sensores com objetivo de monitorar inúmeros fenômenos, tais como:

- Aplicações Militares – A facilidade com que as redes de sensores podem ser constituídas, adicionada às características de auto-organização, coordenação e tolerância a falhas tornam as redes de sensores apropriadas para uso militar. Sensores podem ser lançados através de aeronaves em campos de batalha, possibilitando a

identificação e/ou o monitoramento de ações de tropas amigas ou inimigas. Como tipicamente as redes de sensores são densamente povoadas, a destruição de alguns sensores por ações inimigas, por perda de energia etc, possivelmente não implicará perda de conectividade;

- Aplicações Ambientais – O monitoramento do processo migratório de pássaros, insetos ou de pequenos animais pode ser realizado através de redes de sensores. Além disso, milhões de sensores dispostos em uma floresta possibilitam a identificação de inundações e a identificação exata da origem de incêndios (naturais ou criminosos) e de queimadas antes que o fogo possa ficar descontrolado, eventos estes que podem causar inúmeros prejuízos à população e à natureza. O uso de pesticidas acima do limite permitido ou a presença de insetos nocivos à cultura de uma determinada lavoura são eventos passíveis de serem monitoradas através das RSSFs. A Figura 46 apresenta algumas aplicações ambientais das RSSF.



Figura 46 – Sensores para Monitoramento [JPL 2006]

- Aplicações Médicas – Órgãos vitais dos seres vivos podem ser monitorados através de introdução de sensores nos organismos, identificando a presença de alguma substância específica ou o surgimento de algum problema biológico, conforme pode ser observado na Figura 47;
- Aplicações Diversas – Na produção industrial, as RSSFs podem ser utilizadas para controlar métricas importantes, tais como fluxo, pressão, temperatura, umidade, nível, possibilitando a identificação de vazamento, aquecimento etc. Essas métricas são essencialmente úteis para fornecedores e distribuidores de água, gás, energia elétrica etc.

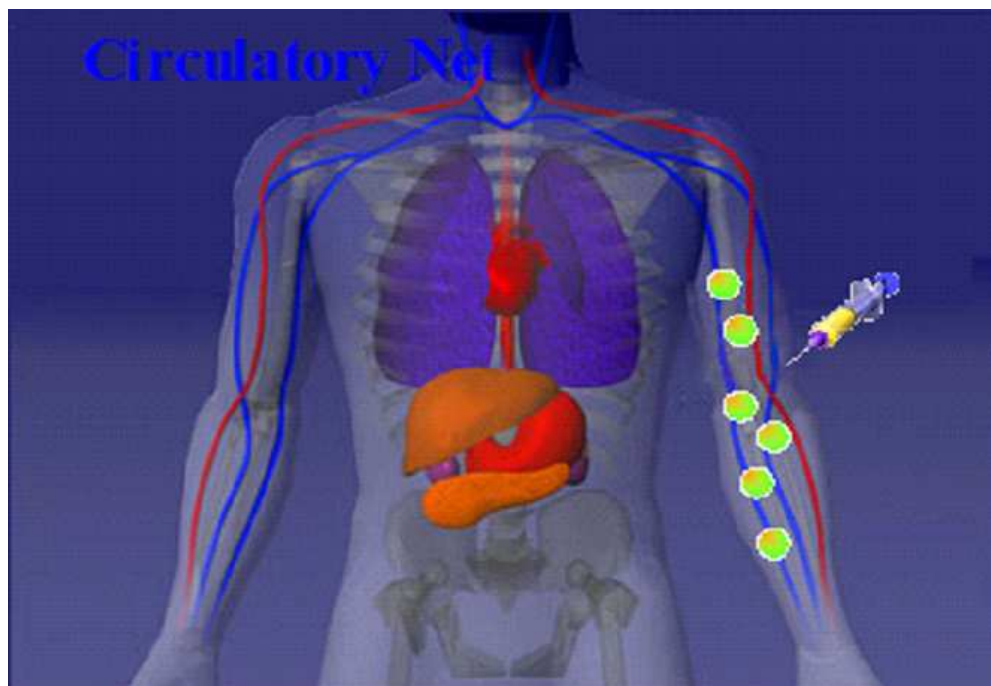


Figura 47 – Sensores para monitoramento de condições físicas [Loureiro et al. 2003]

6.2 – Protocolos de Roteamento para Redes de Sensores Sem Fio

[Ruiz et al. 2004] e [Cordeiro e Agrawal 2002] classificam os protocolos de roteamento em protocolos hierárquicos e protocolos planos (*flat*). Nos protocolos de roteamento hierárquicos, os sensores se organizam em aglomerados (*clusters*), onde cada aglomerado tem um líder (*cluster-head*), eleito pelos demais sensores. [Ruiz et al. 2004] adiciona à classificação, os protocolos de roteamento geográfico.

6.2.1 – Endereçamento em RSSFs

Uma das principais funções do uso de endereçamento em redes tradicionais é devido ao provimento de informações topológicas com o intuito de obter rotas que possibilitem a um determinado remetente encaminhar dados para qualquer destinatário. Neste ambiente, como os endereços atuam como nomes para os destinatários, consentindo comandos como “Gostaria de estabelecer uma conexão com o destino A”, torna-se imprescindível uma forma de endereçamento global único, possibilitando a identificação de forma unívoca de cada participante da rede [Ruiz et al. 2004].

Esta forma de endereçamento não é recomendada para as redes de sensores, pois seria necessário enviar os endereços dos sensores de origem e destino agregados às mensagens,

aumentando o tamanho das mensagens e diminuindo, conseqüentemente, o tempo de vida da rede em função de um maior consumo de energia. É preciso ter em mente que o projeto de uma RSSF, seja no desenvolvimento do *hardware* ou *software*, baseia-se na busca por alternativas que minimizem o consumo de energia, mantendo os sensores o maior tempo possível em operação.

Segundo [Ruiz et al. 2004], as seguintes formas de endereçamento são utilizadas nas RSSFs:

- Endereçamento Espacial – As maioria das aplicações desenvolvidas para RSSFs não se preocupam em identificar, de forma unívoca, um sensor responsável pelo provimento de alguma informação. Tipicamente as consultas ocorrem baseadas em uma determinada região, o que é suficiente. Consultas mais específicas podem requerer a localização física do sensor provedor da informação (sensor fonte), sendo necessário, nesse caso, o envio do endereçamento espacial, ou seja, as coordenadas geográficas do sensor. Através do endereçamento espacial torna-se possível a identificação da localização geográfica de um sensor específico ou de um grupo de sensores. A acuidade desta informação pode dificultar a escalabilidade das RSSFs, tornando o endereço espacial muito maior que os dados transmitidos;
- Endereçamento Baseado em Atributos – Nesse caso a comunicação baseia-se em atributos relevantes exclusivamente à aplicação, que são utilizados para identificar os dados através de chaves únicas, distribuídas por uma unidade central. No protocolo *Directed Diffusion* [Intanagonwiwat et al. 2000] são utilizados algoritmos de difusão no processo de comunicação e disseminação dos dados e, ainda, regras para casamento de padrões que viabilizam o endereçamento baseado em atributos;
- Endereçamento de Transações – [Elson e Estrin 2001] propõem e avaliam um mecanismo de endereçamento denominado RETRI (*Random, Ephemeral Transaction Identifier*) que permite aos sensores selecionarem identificadores probabilisticamente únicos para cada nova transação. Ou seja, os identificadores deixam de ser estáticos e passam a ser dinâmicos. Identificadores aleatórios, probabilisticamente únicos, são gerados no momento em que um sensor desejar iniciar a transmissão de um pacote. Caso haja colisão de identificador com um outro sensor, os dados da transação serão perdidos. No RETRI, cada pacote, assim como seus fragmentos, recebe um

identificador aleatório. Considera-se transação a transmissão de um pacote por completo.

6.2.2 – Protocolos de Roteamento Plano

Conforme [Ruiz et al. 2004], nos protocolos de roteamento plano, todos os sensores são considerados iguais, ou seja, a atividade de roteamento é tratada de forma idêntica por todos os sensores da rede.

[Delicato 2005] complementa informando que, quando um sensor fonte dispõe de uma informação que deve ser transmitida, ele deve encontrar uma rota até o sensor sorvedouro. Caso o sensor fonte seja vizinho do sensor sorvedouro, a conexão será direta, caso contrário, a rota será constituída de múltiplos saltos (através de um ou mais sensores intermediários).

Os sensores que encontram-se próximos ao sensor sorvedouro tendem a participar com maior frequência do processo de transmissão de dados, desta forma, existe uma grande possibilidade destes sensores esgotarem as respectivas baterias antes dos demais sensores da rede, limitando o tempo de vida da rede como um todo [Delicato 2005].

De acordo com [Ruiz et al. 2004] e [Cordeiro e Agrawal 2002], os protocolos *Directed Diffusion* [Intanagonwiwat et al. 2000], SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*) [Heinzelman et al. 1999], SAR (*Sequential Assignment Routing*) [Sohrabi et al. 2000], Multi [Figueiredo et al. 2004], STORM (*Self-organizing TOpology discoverY and Maintenance/Adaptive Diffusion*) [Nakamura et al. 2004], *TinyOS Beaconing* [TinyOS 2006], PROC (*Proactive ROuting with Coordination*) [Macedo et al. 2004], entre outros, são relacionados como protocolos de roteamento plano.

O protocolo *Directed Diffusion* será apresentado em detalhes, já que o mesmo é utilizado nas simulações. Detalhes dos demais protocolos podem ser encontrados em seus artigos originais e em [Ruiz et al. 2004], [Cordeiro e Agrawal 2002], [Delicato 2005], [Tilak et al. 2002a], entre outros.

6.2.2.1 – Directed Diffusion

O protocolo *Directed Diffusion* ou Difusão Direcionada apresenta uma mudança de paradigma na forma de comunicação, ou seja, o roteamento passa a ser centrado nos dados

(6.1.1.1 – Roteamento Centrado em Dados) e implementa-se um mecanismo para agregação de dados (6.1.1.2 – Agregação de Dados) [Estrin et al. 1999].

De acordo com [Silva et al. 2004a], para que um programa ou usuário possa obter alguma informação é necessário o envio de uma mensagem especial denominada interesse³ com um determinado conjunto de atributos. Os sensores responsáveis por esta tarefa são denominados sensores sorvedouro ou *data sink*. Em contrapartida, os demais sensores que publicam os dados que dispõem são denominados de sensores fonte ou *data source*. A forma como a comunicação entre sensores sorvedouro e os sensores fonte é estabelecida e mantida é de responsabilidade dos algoritmos de difusão ou algoritmos de disseminação.

Os elementos que compõem o protocolo *Directed Diffusion*, tais como o esquema de endereçamento por nomes, a propagação de interesses, o estabelecimento de gradientes, a propagação dos dados, o mecanismo de manutenção de rotas e os algoritmos de difusão são descritos nas subseções seguintes. Com o intuito de auxiliar no entendimento dos elementos do protocolo *Directed Diffusion*, será utilizado como exemplo uma rede de sensores com capacidade de localização geográfica e cujas unidades de sensoriamento são capazes de identificar a presença de animais quadrúpedes e qualificá-los.

Mais informações a respeito do protocolo *Directed Diffusion* podem ser encontradas em [Estrin et al. 1999], [Intanagonwiwat et al. 2000], [Heidemann et al. 2001], [Intanagonwiwat 2002], [Intanagonwiwat et al. 2003], [Silva et al. 2004a], entre outros autores.

6.2.2.1.1 – Esquema de Endereçamento

Segundo [Intanagonwiwat et al. 2000], o roteamento centrado em dados requer uma lista de pares de atributos e valores de forma que seja possível descrever a tarefa a ser executada. O interesse no monitoramento de um animal quadrúpede em uma determinada região poderia ser requisitado através da seguinte descrição:

- Tipo = animal quadrúpede;
- Intervalo = 20 ms (intervalo de envio de eventos);

³ Interesses são mensagens geradas originalmente por sensores sorvedouro contendo uma lista de pares atributo e valor, que possibilitam aos sensores fonte identificar o fenômeno que deve ser observado.

- Duração = 10 s (intervalo de captura);
- Localização = [50, 150, 200, 450] (coordenadas da região a ser monitorada).

Caso algum sensor fonte na região especificada identifique, através da sua unidade de sensoriamento, a presença de um animal quadrúpede, os dados de localização poderiam ser enviados na forma:

- Tipo = animal quadrúpede;
- Instância = Elefante (tipo de animal quadrúpede);
- Localização = [120, 300] (coordenadas da localização);
- Intensidade = 0.6 (amplitude do sinal);
- Confiança = 0.85 (índice de confiança da medição);
- Registro de horário = 01:20:40 (tempo de geração do evento).

[Silva et al. 2004a] afirmam que os interesses propagados pelos sensores sorvedouro são definidos por um conjunto de atributos, identificados por chave, tipo, operador e valor, onde a chave é o atributo que identifica o dado de interesse; o tipo qualifica o dado, podendo ser uma cadeia de caracteres (*string*), inteiro, ponto-flutuante ou dados binários; o operador pode ser EQ (igual), NE (diferente), LT (menor que), EQ_ANY (qualquer valor) etc; e, por fim, valor de interesse. A subseção 6.2.2.1.2 – *Interesses e Gradientes* apresenta alguns exemplos de interesses.

6.2.2.1.2 – Interesses e Gradientes

Os sensores denominados sorvedouros são responsáveis pela propagação de interesses definidos por usuários através de tarefas instantâneas ou programadas. Estas tarefas permanecem armazenadas em uma tabela nos sensores e somente serão removidas após o término do período de duração especificado no interesse. Após a propagação do interesse, será necessário o estabelecimento dos gradientes, de forma que os sensores possam encaminhar os dados dos eventos observados [Intanagonwiwat et al. 2000].

Segundo [Heidemann et al. 2001], o gradiente identifica o sensor para o qual os dados devem ser encaminhados, caso haja o casamento com o interesse. [Intanagonwiwat 2002] acrescenta que o gradiente contém a taxa de transmissão solicitada, o tempo de duração e o estado da solicitação, ou seja, se a mesma está ativa ou inativa.

De acordo com [Heidemann et al. 2001], os interesses são propagados através dos sensores vizinhos até alcançar a região de destino. O diferencial do protocolo *Directed Diffusion* em relação aos demais protocolos é que todos os sensores da rede sabem que tarefa deve ser executada, possibilitando, desta forma, o processamento dos dados (interpretação), ao invés de simplesmente efetuar o armazenamento e encaminhamento tradicional.

Para cada tarefa o sensor sorvedouro envia, periodicamente, mensagens de interesse em *broadcast* para os sensores vizinhos. No caso da aplicação exemplificada no item 6.2.2.1.1 – *Esquema de Endereçamento*, a mensagem de interesse inicial teria os atributos Tipo e Localização com valores originais, mas o atributo Intervalo seria modificado para um valor superior ao informado. Esta mensagem inicial é enviada com objetivo de determinar se existe algum sensor fonte que detenha a informação de interesse do sensor sorvedouro. Durante o período em que o sensor sorvedouro mantiver o interesse, será necessário reenviar a mensagem de interesse com o registro de tempo alterado, conforme o exemplo abaixo [Intanagonwiwat et al. 2000].

- Tipo = animal quadrúpede;
- Intervalo = 1 s (intervalo de envio de eventos);
- Localização = [50, 150, 200, 450] (coordenadas da região a ser monitorada);
- Registro de Tempo = 01: 20:40 (hh:mm:ss);
- Expira em: 01:30:40 (hh:mm:ss).

Os sensores armazenam os interesses recebidos em uma área de memória denominada *interest cache*. Ao receber um interesse, o sensor verifica se o interesse já encontra-se armazenado na *interest cache*. Caso seja um novo interesse, um gradiente com destino ao sensor que enviou o interesse é armazenado em conjunto com os dados propagados. Embora o protocolo *Directed Diffusion* não empregue mecanismos de endereçamento globais tradicionais, para que o gradiente possa ser estabelecido é necessário utilizar um identificador local único. O endereço MAC do protocolo IEEE 802.11, o endereço de *clusters* Bluetooth, RETRI etc são exemplos de possíveis identificadores. Após receber um interesse o sensor dispõe de três alternativas, a saber [Intanagonwiwat 2002]:

- A alternativa mais simples é reenviar a mensagem de interesse recebida em *broadcast* para todos os sensores vizinhos. Esta ação equivale à técnica de inundação e é

tipicamente utilizada quando o sensor desconhece a existência de um outro sensor que possa dispor da informação requerida na mensagem de interesse. A Figura 48 exemplifica esta alternativa;

- Caso o sensor disponha de mecanismos de localização geográfica (GPS), um protocolo de roteamento geográfico pode ser utilizado, limitando a propagação da mensagem de interesse à área especificada;
- Em uma rede onde não haja mobilidade, o sensor poderá utilizar informações recebidas anteriormente e armazenadas na *interest cache*. Caso o interesse recebido apresente as mesmas características que algum dos interesses armazenados, o sensor reenviará a mensagem de interesse recebida somente para o gradiente armazenado.

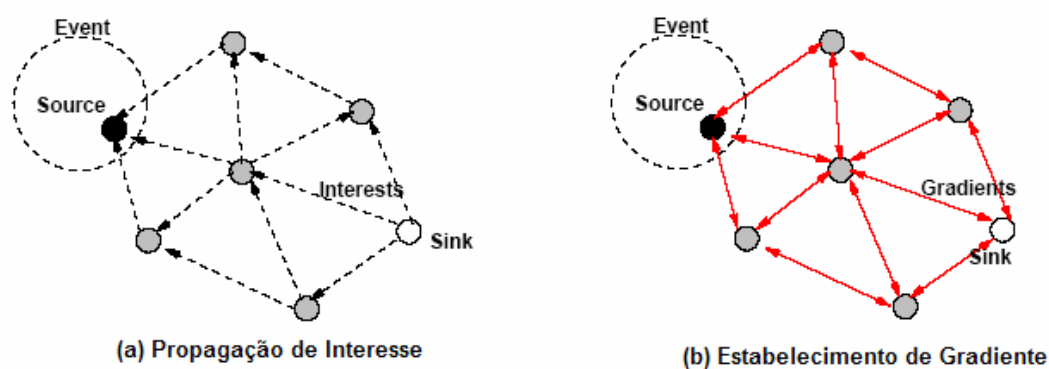


Figura 48 – Propagação de Interesse e Estabelecimento de Gradiente por inundação [Intanagonwiwat 2002]

6.2.2.1.3 – Propagação de Dados

[Intanagonwiwat et al. 2003] ressaltam que a unidade de sensoriamento dos sensores permanece desligada, em função da necessidade de economia de energia, enquanto inexistirem interesses a serem monitorados. Conseqüentemente, um sensor que esteja posicionado dentro das coordenadas do interesse recebido ligará, imediatamente, a unidade de sensoriamento, a menos que a unidade de sensoriamento já esteja ativa devido ao recebimento de um interesse anterior.

O sensor que detectar a ocorrência do evento programado inicia uma pesquisa na *interest cache*, a procura de um interesse que case com o evento monitorado. No exemplo seguinte, o casamento dar-se-ia pela presença de um animal quadrúpede dentro das

coordenadas especificadas pelo interesse. Se o casamento for positivo, o sensor fonte inicia a transmissão dos dados coletados com a taxa máxima (envio a cada 1 segundo, no nosso exemplo) para todos os gradientes estabelecidos com a descrição do evento, tal como:

- Tipo = animal quadrúpede;
- Instância = Elefante (tipo de animal quadrúpede);
- Localização = [120, 300] (coordenadas da localização);
- Intensidade = 0.6 (amplitude do sinal);
- Confiança = 0.85 (índice de confiança da medição);
- Registro de horário = 01:20:55 (tempo de geração do evento).

Os sensores vizinhos, ao receberem uma mensagem de dados, irão verificar se existe algum interesse que corresponda aos dados recebidos. Se não existir, a mensagem é descartada. Caso exista, o sensor verificará se os dados recebidos encontram-se na *interest cache* e, se o resultado for positivo, significa que esta mesma mensagem foi recebida recentemente, sendo, neste caso, desnecessário efetuar o reenvio. Esta verificação evita a ocorrência de *loops*. Caso os dados não existam na *interest cache*, os mesmos são adicionados e reenviados para todos os sensores vizinhos que cujos gradientes existam para este interesse [Intanagonwiwat et al. 2000].

A verificação na *interest cache* também tem a função de manter a taxa de eventos solicitada para cada gradiente estabelecido. Caso a taxa do gradiente seja superior à taxa do evento, os dados serão enviados normalmente, no entanto, se a taxa do gradiente for inferior à taxa do evento, os dados não serão enviados [Intanagonwiwat et al. 2003].

6.2.2.1.4 – Reforço para Estabelecimento de Caminho e Poda

O sensor sorvedouro envia repetidamente interesses exploratórios com o intuito de obter informações acerca do evento desejado. Esses interesses exploratórios são enviados com uma baixa taxa. Os sensores fonte, ao identificarem a ocorrência de um evento solicitado, enviam mensagens de dados com a taxa especificada no interesse através dos inúmeros gradientes estabelecidos. O sensor sorvedouro, ao receber as mensagens de dados, denominadas de eventos exploratórios, seleciona as fontes através do envio de mensagens de reforço de percurso (*reinforcement*) [Intanagonwiwat et al. 2000].

As mensagens de reforço positivo para estabelecimento de um caminho (*positive reinforcement*) são usadas para selecionar os sensores fonte que possuem alguma diferenciação dos demais sensores fonte. Essa diferenciação pode ser identificada pelo recebimento de um evento diferente dos demais ou menor atraso. A Figura 49 exemplifica o envio de uma mensagem de reforço positivo e de dados através do caminho estabelecido. As mensagens de reforço positivo são, na verdade, idênticas às mensagens de interesse, porém com o intervalo original solicitado pela aplicação.

- Tipo = animal quadrúpede;
- Intervalo = 20 ms (intervalo de envio de eventos);
- Localização = [50, 150, 200, 450] (coordenadas da região a ser monitorada);
- Registro de Tempo = 01: 21:00 (hh:mm:ss);
- Expira em: 01:30:40 (hh:mm:ss).

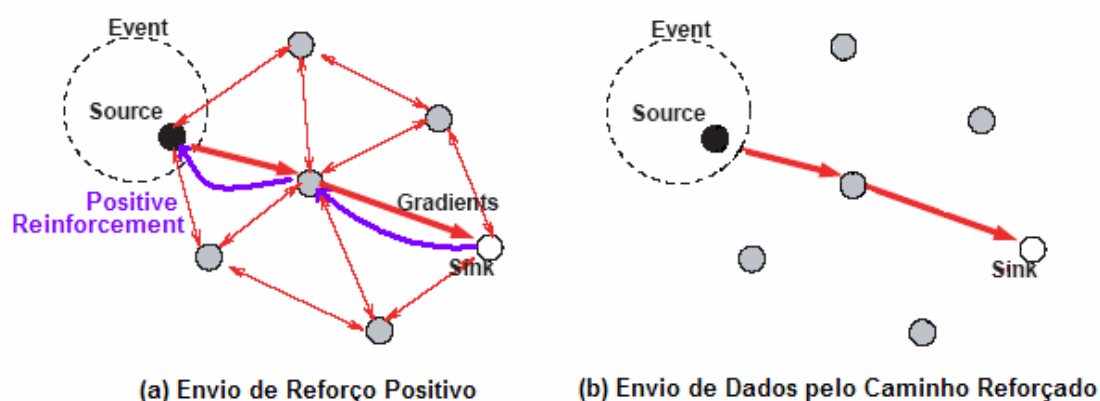


Figura 49 – Envio de reforço positivo e Dados pelo Caminho Reforçado [Intanagonwiwat 2002].

Já as mensagens de reforço negativo para poda de caminho (*negative reinforcement*) são tipicamente utilizadas com objetivo de economia de energia e, ainda, com o intuito de evitar o envio por múltiplos caminhos. Embora não seja o ideal, o sensor sorvedouro pode, simplesmente, esperar o gradiente expirar e não enviar novos interesses através deste gradiente. Uma outra abordagem é enviar uma mensagem de reforço negativo explícito, que se constitui, na prática, por uma mensagem de interesse com uma baixa taxa, isto é, como um intervalo alto.

Detalhes à cerca dos demais tipos de mensagens de reforço podem ser encontradas em [Intanagonwiwat 2002].

6.2.2.1.5 – Algoritmos de Difusão

De acordo com [Heidemann et al. 2003], as versões iniciais do protocolo *Directed Diffusion* identificavam suas características chave como roteamento centrado em dados, capacidade de agregação de dados etc. O protocolo *Directed Diffusion* adotou, ainda, uma API (*Application Program Interface*) denominada *Publish/Subscribe* capaz de abstrair produtores (sensores fonte) e consumidores (sensores sorvedouro) de dados de detalhes dos algoritmos de difusão (disseminação). Os sensores fonte ou produtores coletam dados e os publicam através da API *Publish*, já os sensores sorvedouro ou consumidores fazem uso da API *Subscribe* para propagar seus interesses. A versão inicial do protocolo *Directed Diffusion* utilizava um algoritmo de difusão denominado *Two Phase Pull* (2PP). No entanto, o algoritmo de difusão 2PP mostrou-se ineficiente para algumas aplicações específicas, principalmente para aquelas de maior tráfego entre vários sensores sorvedouro e vários sensores fonte. Para esse caso, o algoritmo de difusão *Push* apresenta um comportamento mais indicado.

6.2.2.1.5.1 – 2PP (*Two Phase Pull*)

[Silva et al. 2004a] e [Heidemann et al. 2003] afirmam que o algoritmo de difusão 2PP é indicado para aplicações que requerem um pequeno número de sensores sorvedouro. A aplicação do usuário solicita dados através de uma lista de pares atributo-valor, capaz de descrever a tarefa que deve ser executada para obtenção de dados em uma determinada região. O sensor que propaga este interesse é denominado sensor sorvedouro ou *data sink*. O interesse propaga-se através dos demais sensores com destino à região especificada, sendo que os sensores intermediários armazenam o interesse recebido, estabelecendo gradientes para os sensores vizinhos. Esta mensagem, denominada *exploratory interest*, propaga-se até alcançar um sensor fonte ou um conjunto de sensores fonte presentes na região especificada. A mensagem inicial dos sensores fonte é denominada *exploratory data* e é enviada para todos os sensores vizinhos que estabelecerem um gradiente para o interesse. A inundação inicial de mensagens *exploratory interest* e *exploratory data* constitui a primeira fase do algoritmo 2PP.

As mensagens de reforço de caminho, assim como as mensagens de dados, constituem a segunda fase do algoritmo de difusão 2PP e são enviadas somente através dos gradientes estabelecidos. A Figura 50 abaixo apresenta um resumo das mensagens do algoritmo de difusão 2PP.

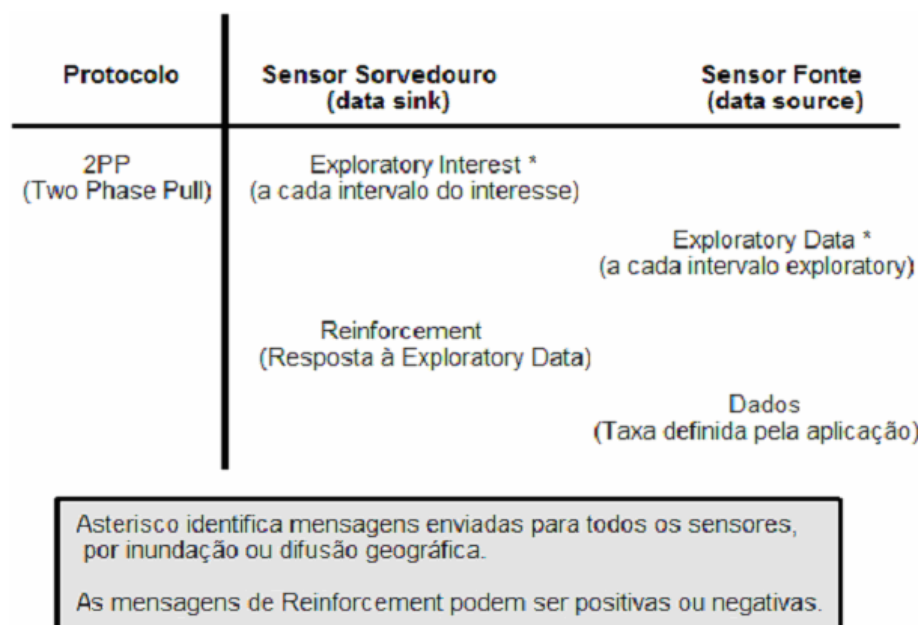


Figura 50 – Mensagens do Algoritmo de Difusão 2PP [Silva et al. 2004a]

6.2.2.1.5.2 – Push

O algoritmo de difusão *Push* foi desenvolvido com o intuito de atender aos requisitos de aplicações que necessitam de comunicação mais intensa entre sensores. O *Push* é indicado para aplicações com muitos sensores fonte e muitos sensores sorvedouro, desde que os sensores fonte produzam dados de forma ocasional [Heidemann et al. 2003]. Segundo [Silva et al. 2004a], o algoritmo de difusão 2PP não é indicado para este tipo de aplicação, em função dos sensores manterem interesses e gradientes para os demais sensores, mesmo quando não há dados para serem propagados.

O algoritmo *One Phase Push* ou simplesmente *Push* utiliza as mesmas APIs que o algoritmo *Two Phase Pull*, entretanto de modo invertido. Os sensores sorvedouro tornam-se passivos (não propagam seus interesses) e os sensores fonte tornam-se ativos, enviando mensagens *exploratory data* através da rede sem que existam gradientes criados. Da mesma forma que no algoritmo *Two Phase Pull*, quando alguma mensagem *exploratory data* é recebida por um sensor sorvedouro, uma mensagem de *reinforcement* é enviada através da rede com destino ao sensor fonte. No caso de um *positive reinforcement*, os gradientes são criados e as mensagens de dados são enviadas dos sensores fonte até o sensor sorvedouro pelo caminho estabelecido (gradiente) [Silva et al. 2004a].

A Figura 51 apresenta um resumo das mensagens do algoritmo de difusão *Push*.

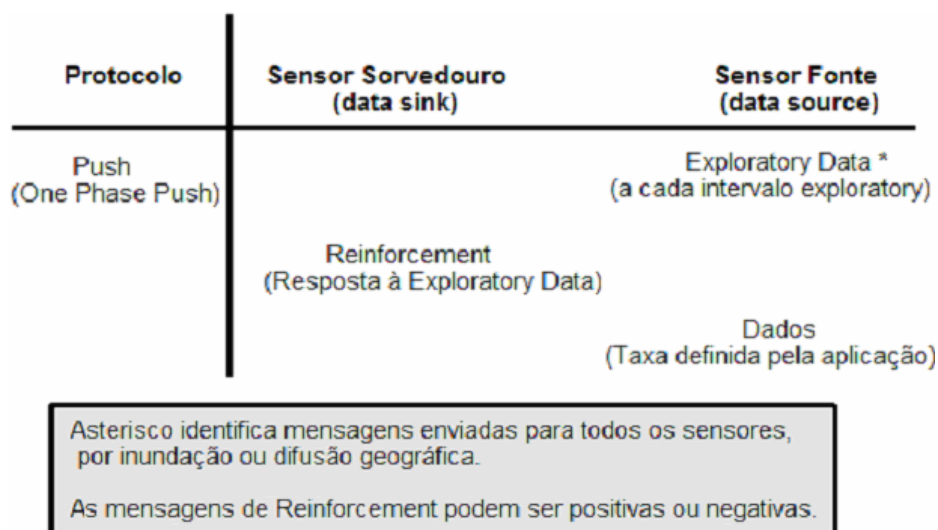


Figura 51 – Mensagens do Algoritmo de Difusão Push [Silva et al. 2004a]

O algoritmo *Push* não é indicado para aplicações onde muitos sensores propagam dados continuamente, pois todo o tráfego será enviado pela rede de sensores, mesmo se não houver um sensor sorvedouro interessado [Heidemann et al. 2003].

Uma das vantagens do algoritmo de difusão *Push* sobre o algoritmo 2PP é que somente uma das mensagens de inundação é enviada para todos os sensores (*exploratory data*), enquanto que no 2PP duas mensagens de inundação são enviadas para todos os sensores (*exploratory interest* e *exploratory data*). Em redes densamente povoadas, minimizar o envio de mensagens através de inundação pode trazer um imenso benefício.

Mais detalhes sobre o algoritmo de difusão *Push* podem ser encontrados em [Heidemann et al. 2003].

6.2.2.1.5.3 – IPP (One Phase Pull)

Baseado na eficiência do algoritmo *pull* para algumas aplicações específicas, o algoritmo 2PP foi revisto e teve uma das fases de inundações eliminada [Silva et al. 2004a]. Da mesma forma que no algoritmo 2PP, os sensores sorvedouro propagam mensagens de interesse pela rede estabelecendo os gradientes. Quando um interesse chega até um sensor fonte, diferentemente do algoritmo 2PP, o sensor fonte não marca a mensagem inicial como exploratória, enviando os dados diretamente através do gradiente preferencial. O gradiente preferencial é determinado pelo sensor vizinho que foi o primeiro a enviar o interesse, implicando o caminho de menor latência. Desta forma, o algoritmo 1PP não requer

mensagens de reforço, sendo o caminho de menor latência implicitamente reforçado [Silva et al. 2004a].

A Figura 52 apresenta um resumo das mensagens do algoritmo de difusão *One Phase Pull*.

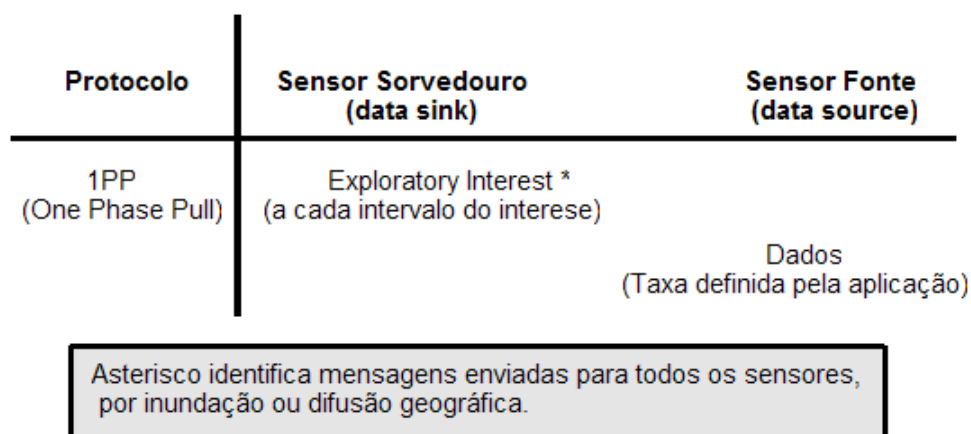


Figura 52 – Mensagens do Algoritmo de Difusão 1PP [Silva et al. 2004a]

No entanto, o algoritmo de difusão 1PP apresenta algumas desvantagens. A primeira desvantagem é assumir a comunicação simétrica entre os sensores, já que os dados enviados pelos sensores fonte para os sensores sorvedouro (fontes-sorvedouro) seguirão o caminho determinado pela menor latência entre o sensor sorvedouro e o sensor fonte, estabelecido através da difusão de mensagens *exploratory interest*. Quando comparado com o 2PP, este problema é minimizado, pois o caminho dos dados é determinado pelas mensagens *exploratory data*, enviadas pelos sensores fonte. A segunda desvantagem é que o 1PP requer que as mensagens *exploratory interest* transportem um identificador de fluxo, aumentando o tamanho da mensagem de interesse. O identificador de fluxo permite que os sensores identifiquem se uma mensagem de dados deve ser enviada para mais de um gradiente. O algoritmo de difusão 1PP otimiza esse processo enviando apenas uma mensagem de dados enquanto for possível usar um caminho comum para múltiplos sensores sorvedouro. No entanto, como em algum momento o caminho pode ser bifurcado para dois (ou mais) sensores sorvedouro, o sensor responsável por encaminhar a mensagem de dados deve dispor do identificador de fluxo para poder enviar a mensagem de dados para cada um dos sensores sorvedouro [Silva et al. 2004a].

6.2.3 – Protocolos de Roteamento Hierárquico

[Ruiz et al. 2004] afirmam que no roteamento hierárquico são definidas duas classes distintas de sensores: sensores fontes e sensores líderes de grupo, denominados *cluster-head*. Os sensores fonte têm a função de coletar e enviar os dados observados para o sensor líder de seu grupo. Cabe a este sensor a decisão de executar uma fusão ou agregação dos dados recebidos antes de reenviá-los.

[Delicato 2005] ressalta que os protocolos de roteamento hierárquicos são adequados para redes em grande escala. O agrupamento de sensores possibilita que os protocolos de rede operem em um modo hierárquico, aumentando a escalabilidade da rede e reduzindo a possibilidade de falhas.

Os protocolos LEACH [Heinzelman et al. 2000], TEEN [Manjeshwar e Agrawal 2001] e HAR [Thepvilojanapong et al. 2005], entre outros são referenciados como protocolos de roteamento hierárquicos.

6.2.3.1 – HAR – *Hierarchy-Based Anycast Routing Protocol*

O HAR é um protocolo multiponto-ponto, ou seja, considerando-se N o conjunto de sensores e BS o conjunto de estações base, no par de comunicação (s, d) , teremos $s \in \{N\}$ e $d \in \{BS\}$. Cada sensor tenta enviar os dados capturados para a estação base mais próxima. O protocolo HAR pode ser conceituado como um protocolo *anycast*.

O protocolo de comunicação HAR fundamenta-se na construção de uma estrutura de dados baseada em árvores hierárquicas, onde o nó raiz (*root*) é a estação base e os sensores compõem os nós internos ou as folhas (*leaves*), de forma que possam se comunicar com a estação base ou atuar como roteadores.

Novos nós são incluídos na árvore hierárquica através de envio, em *broadcast*, de pacotes PREQ (*parent request*). Os nós da árvore, ao receberem um pacote PREQ, enviam, em *unicast*, um pacote CREQ (*child request*). O novo nó cria a tabela PC (*parental candidate*), seleciona um nó pai e envia um pacote CREP.

Vários motivos podem causar falhas nos nós da árvore hierárquica, tais como, término da carga da bateria, um ambiente inóspito ou a ação de um inimigo. Em qualquer situação, a detecção de falhas e a reconstrução da árvore ocorrerão somente quando algum nó tentar

enviar seus dados (*on-demand*). A detecção de falhas cabe ao protocolo da sub-camada MAC. Caso o nó não receba uma confirmação (*acknowledgement*), ele conclui que o seu nó pai falhou por algum motivo. O nó órfão seleciona, então, a partir da tabela PC, um candidato a nó pai, envia um pacote CREQ (*child request*) e fica aguardando por um pacote CACP (*child acceptance*).

Mais informações sobre o protocolo HAR podem ser obtidas em [Thepvilojanapong et al. 2005].

6.2.4 – Protocolos de Roteamento Geográfico

Os protocolos de roteamento geográfico utilizam informações geográficas obtidas através de um sistema de GPS (*Global Positioning System*) ou através de um sistema local, válido somente para os sensores da rede. Como exemplo de protocolo de roteamento geográfico, [Ruiz et al. 2004] relacionam os protocolos GeoMote [Broadwell et al. 2004], *Geographic Routing without Location Information* [Rao et al. 2003], GPSR [Karp e Kung 2000] e o protocolo GEAR [Yu et al. 2001], que será brevemente apresentado.

6.2.4.1 – GEAR – *Geographical and Energy Aware Routing*

O GEAR é um protocolo de roteamento geográfico que busca minimizar o consumo de energia dos sensores endereçando regiões através de retângulos. Um algoritmo guloso é utilizado para o reenvio dos dados, onde o sensor que efetuará o envio será aquele que apresentar o menor custo de envio até a região desejada. O custo do envio é calculado através da distância e da quantidade de energia residual dos nós que encontram-se no caminho [Ruiz et al. 2004].

A função custo, inicialmente, é aproximada. No entanto, à medida que pacotes são enviados para uma determinada região, a função custo é recalculada, possibilitando a otimização do caminho para envio dos dados. Na região destinatária, os pacotes são difundidos através de uma partição recursiva da região em quatro seções. O pacote é enviado para um sensor de cada uma das seções, e o algoritmo é aplicado recursivamente, até que as subseções sejam vazias. Em regiões onde a densidade dos nós é pequena, a envio dos dados ocorre por difusão. Informações detalhadas sobre o protocolo GEAR podem ser obtidas em [Yu et al. 2001].

Capítulo 7 – Simulações

O objetivo desta dissertação é comparar o desempenho dos protocolos de roteamento projetados para redes *ad hoc* com o desempenho de protocolos de roteamento projetados para redes de sensores, em cenários que modelam o padrão de tráfego de Cidades Digitais e do canal de interatividade do SBTVD – Sistema Brasileiro de TV Digital, mantendo-se o viés nas inclusões social e digital.

Entre os inúmeros protocolos de roteamento para redes *ad hoc*, os protocolos AODV – *Ad hoc On-demand Distance Vector* [Perkins e Royer 1999], DSDV – *Destination-Sequenced Distance Vector* [Perkins e Bhagwat 1994] e DSR – *Dynamic Source Routing* [Johnson e Maltz 1996] foram considerados para esta dissertação por estarem entre os mais referenciados, conforme pode ser observado nas seções 8.1 – Trabalhos Relacionados e 7.1 – Escopo. Os algoritmos de difusão 1PP – *One Phase Pull* [Silva et al. 2004a], 2PP – *Two Phase Pull* [Silva et al. 2004a] e *Push* [Heidemann et al. 2003] do protocolo de disseminação de dados *Directed Diffusion* [Estrin et al. 1999, Intanagonwiwat et al. 2000] para redes de sensores foram considerados pelo mesmo motivo, conforme também pode ser observado na seção 7.1 – Escopo.

O estudo comparativo foi baseado na análise das métricas de atraso, vazão, perdas e conectividade, possibilitando a identificação do protocolo ou do conjunto de protocolos mais indicado para cada um dos cenários. A seção 7.1 – Escopo apresenta o escopo das simulações, a seção 7.2 – Cenários descreve os cenários utilizados, a seção 7.3 – Metodologia detalha a metodologia utilizada para obter os resultados e, por fim, a seção 7.4 – Resultados analisa os resultados obtidos a partir das simulações realizadas.

7.1 – Escopo

Os protocolos para redes *ad hoc* AODV, DSDV e DSR foram selecionados em função da quantidade de referências encontrada em artigos, livros e demais trabalhos acadêmicos. Inúmeros trabalhos apresentam comparações entre protocolos para redes *ad hoc*, referenciando, ao menos um, entre os três protocolos utilizados nesta dissertação, como pode ser visto em [Broch et al. 1998], [Johansson et al. 1999], [Das et al. 2000], [Perkins et al. 2001], [Lu et al. 2003a], [Lu et al. 2003b], [He et al. 2003], entre outros.

Dentre os protocolos para redes de sensores, o protocolo *Directed Diffusion* foi escolhido também por ser um dos protocolos para redes de sensores mais citados, quiçá o mais referenciado. Referências para o protocolo *Directed Diffusion* e seus algoritmos de difusão 1PP (DD-1PP), 2PP (DD-2PP) e *Push* (DD-*Push*) são encontradas em [Heidemann et al. 2001], [Cordeiro e Agrawal 2002], [Heidemann et al. 2003], [Intanagonwiwat et al. 2003], [Ruiz et al. 2004], [Silva et al. 2004a], [Delicato 2005], entre tantas outras publicações.

O padrão IEEE 802.11 [IEEE 802.11 2006], com taxa de 11 Mbps, foi escolhido como protocolo para a subcamada MAC, tanto para as simulações com protocolos para redes *ad hoc*, quanto nas simulações com os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push* do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores. O alcance da antena foi limitado em 250 metros. Embora existam protocolos para a subcamada MAC desenvolvidos especificamente para redes de sensores, tais como S-MAC [Ye et al. 2002], B-MAC [Polastre et al. 2004], TRAMA [Rajendran et al. 2003] etc, com o intuito de manter inalteradas as características das simulações, variando somente os protocolos de roteamento, o padrão IEEE 802.11 foi utilizado em todas as simulações. Esta dissertação não aborda nem avalia o comportamento do padrão IEEE 802.11. Avaliações e comentários acerca do comportamento do padrão IEEE 802.11 podem ser encontradas em [Rubinstein et al. 2006], [Cordeiro e Agrawal 2002], [Ferro e Potorti 2005] etc.

7.2 – Cenários

Como as inclusões digital e social norteiam esta dissertação, foram selecionadas três comunidades carentes do município do Rio de Janeiro com áreas geográficas de proporções diferenciadas para a constituição dos cenários analisados. Detalhes sobre as comunidades do Complexo da Maré, Morro do Adeus e do Piancó e sobre o Morro Santa Marta encontram-se descritos nas subseções seguintes.

O dispositivo de conexão com a rede pública, denominado ponto de acesso ou BS (*Base Station*) nas redes *ad hoc* e sensor sorvedouro ou *data sink* nas redes de sensores foi posicionado, no ponto central do cenário. Este dispositivo é referenciado nesta dissertação exclusivamente como ponto de acesso, independente do protocolo de roteamento analisado. Os pontos de presença nas comunidades do Complexo da Maré, Morro do Adeus e Piancó e Morro Santa Marta estão localizados em escolas, postos de saúde, telecentros, associações comunitárias etc e são denominados de nós ou *nodes* nas redes *ad hoc* e sensores fonte ou

data source nas redes de sensores. Os dispositivos associados aos pontos de presença são referenciados nesta dissertação exclusivamente como nós, independente do protocolo de roteamento utilizado. Cabe ressaltar que esta dissertação analisa os algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores e não o uso de sensores para prover conectividade ao canal de interatividade e ao canal de descida complementar do SBTVD e do projeto Cidades Digitais.

7.2.1 – Complexo da Maré

Em 1500, à época da chegada dos portugueses ao Brasil, o local atualmente ocupado pelo Complexo da Maré era um recanto da Baía de Guanabara, repleto de praias e areia límpidas, ilhas e manguezais. A partir da década de 1940, começaram a surgir palafitas nos locais atualmente denominados por Baixa do Sapateiro, Parque Maré e Morro do Timbau. Das palafitas aos conjuntos habitacionais, outras localidades próximas foram ocupadas até a formação do Complexo da Maré, conforme apresentado na Tabela 7.

O Complexo da Maré é constituído, atualmente, de 16 comunidades, a saber: Morro do Timbau, Baixa do Sapateiro, Conjunto Marcílio Dias, Parque Maré, Parque Roquete Pinto, Parque Rubens Vaz, Parque União, Nova Holanda, Praia de Ramos, Conjunto Esperança, Vila do João, Vila do Pinheiro, Conjunto dos Pinheiros, Conjunto Bento Ribeiro Dantas, Conjunto Nova Maré e Salsa e Merengue. Em 1994, o Complexo da Maré foi elevado à condição de bairro, sendo constituído o bairro da Maré. Dados do Censo Demográfico de 2000 apontam para o bairro da Maré uma população de 113.807 habitantes, distribuída em 33.211 domicílios [BME 2006]. O IDH-M do Complexo da Maré foi calculado em 0,719 e a expectativa de vida em 66,03 anos [IPP 2005].

Tabela 7 – Distribuição de Habitantes e Domicílios por Comunidades do Complexo da Maré [BME 2006]

COMUNIDADE	ANO DE CRIAÇÃO	HABITANTES	DOMICÍLIOS
MORRO DO TIMBAU	1940	5.885	1.760
BAIXA DO SAPATEIRO	1947	10.363	2.746
CONJUNTO MARCÍLIO DIAS	1948	2.288	618
PARQUE MARÉ	1953	N/D	N/D
PARQUE ROQUETE PINTO	1955	12.560	3.737
PARQUE RUBENS VAZ	1961	6.380	2.031
PARQUE UNIÃO	1961	13.444	4.430

NOVA HOLANDA	1962	13.152	3.688
PRAIA DE RAMOS	1962	3.754	1.180
CONJUNTO ESPERANÇA (MORRO DA ESPERANÇA)	1982	731	186
VILA DO JOÃO	1982	N/D	N/D
VILA DO PINHEIRO	1989	N/D	N/D
CONJUNTO DOS PINHEIROS	1989	N/D	N/D
CONJUNTO BENTO RIBEIRO DANTAS	1992	N/D	N/D
CONJUNTO NOVA MARÉ	1996	12.905	3.732
SALSA E MERENGUE (NOVO PINHEIRO)	2000	N/D	N/D
BAIRRO DA MARÉ	1994	113.807	33.211

O Complexo da Maré foi mapeado para a realização das simulações em uma área de 1898 x 770 metros. Tais valores foram obtidos através de medições realizadas com o programa Rio Atlas [RioAtlas 2006]. As comunidades presentes na Figura 53 representam a área da simulação.

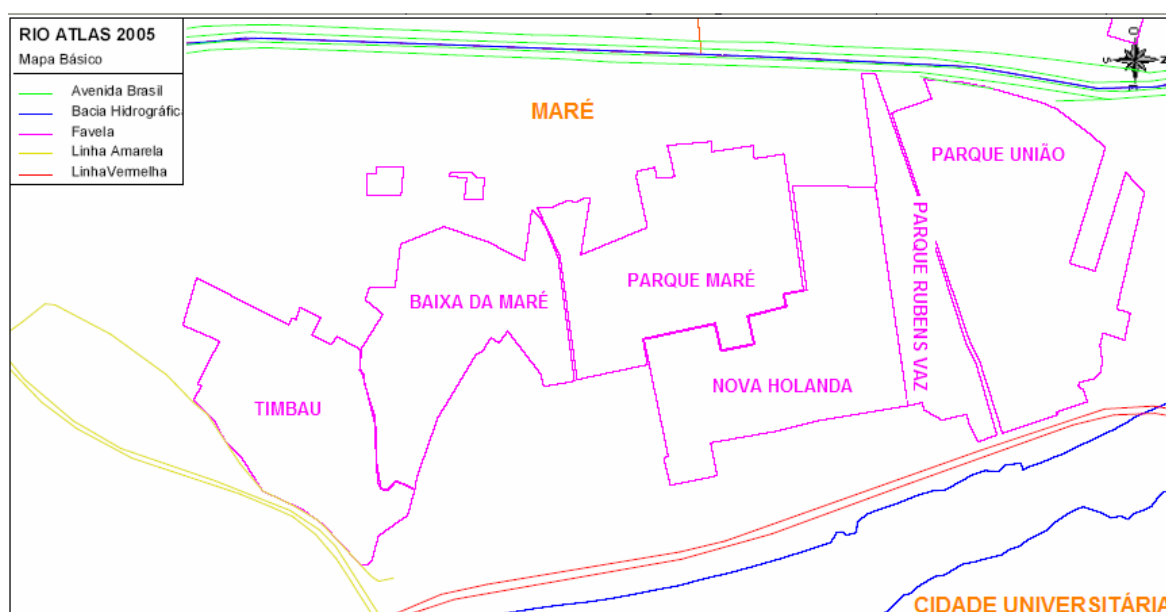


Figura 53 – Comunidades do Complexo da Maré [RioAtlas 2006]

A Figura 54 apresenta a distribuição de nós por conectividade. O eixo X representa a quantidade de saltos (*hops*) necessária para que os nós se comuniquem com o ponto de acesso. O índice **10+** indica a existência de 10 ou mais nós intermediários entre o destinatário e o remetente dos dados. Já o índice **-1**, representa os nós que permaneceram sem conectividade com todos os demais nós da simulação.

Os valores exibidos nos gráficos de conectividade, representados através da Figura 54, da Figura 56 e da Figura 58, foram calculados a partir das coordenadas de posicionamento dos nós nos respectivos cenários e do alcance de transmissão das antenas (250 metros). Foi necessário desenvolver um programa para analisar o posicionamento de cada um dos nós e, com isso, calcular a quantidade de saltos que os mesmos encontravam-se distante do ponto de acesso.

Podemos observar que nos cenários com 1, 2 e 5 nós, o percentual de nós que encontram-se totalmente sem conectividade ultrapassa os 80% e nos cenários com 10 e 20 nós, este percentual é superior a 60%. Somente nas simulações com 50 nós é que o percentual de nós sem conectividade ficou inferior a 20%.

Para que possa haver um nível de conectividade aceitável no Complexo da Maré é necessária a existência de 50 ou mais nós ativos. Uma outra opção seria a instalação de mais de um ponto de acesso, permitindo uma cobertura mais abrangente.

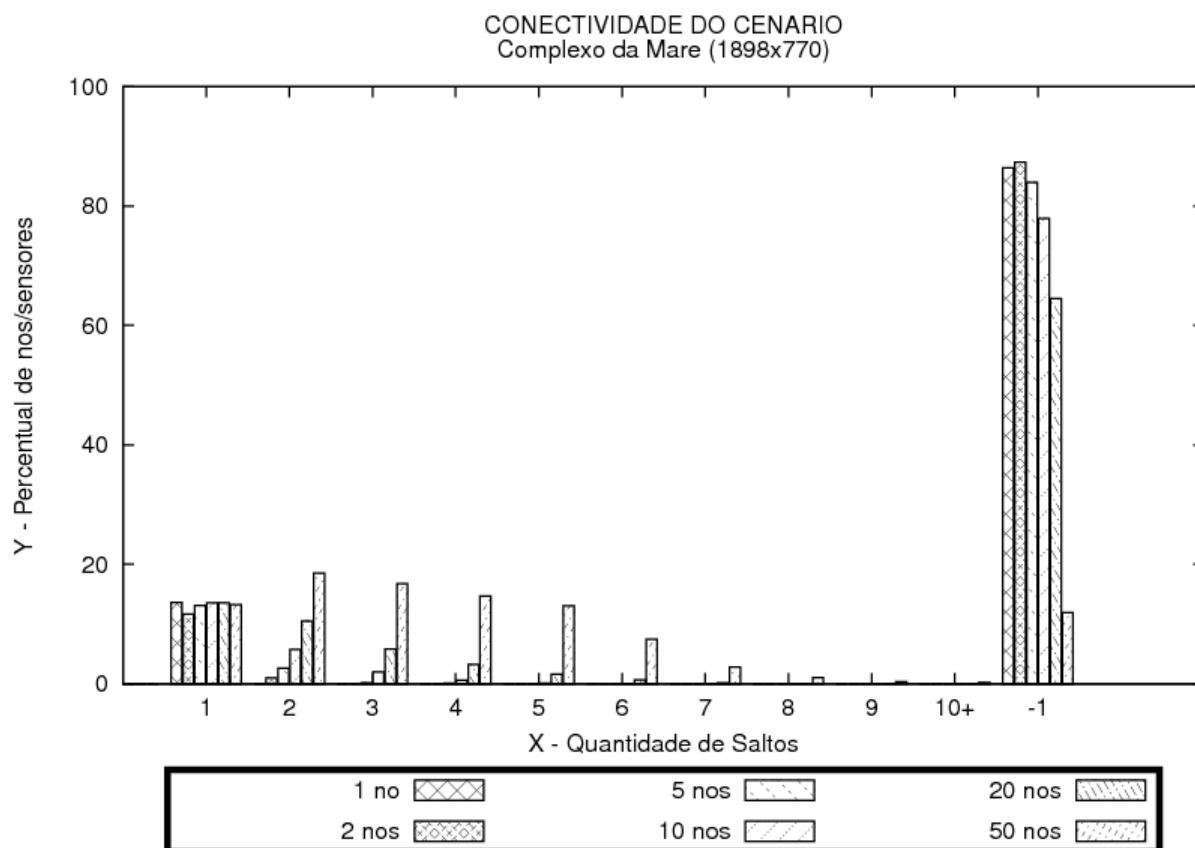


Figura 54 – Conectividade do Complexo da Maré

7.2.2 – Morro do Adeus e do Piancó

Os primeiros habitantes da região foram os índios Tamoios. Mais tarde, com a chegada dos colonizadores portugueses, a região passou a ser habitada por jesuítas e militares. Em 1951, após a Segunda Guerra Mundial, um polonês, apelidado de “alemão”, adquiriu parte das terras da Serra da Misericórdia e efetuou a divisão em lotes, dando início a ocupação do conhecido Complexo do Alemão [Saúde-Rio 2005].

O Complexo do Alemão possui uma população estimada de 36.459 pessoas distribuídas em 18.219 domicílios, e abriga as comunidades do Alemão, Grotá, Nova Brasília, Alvorada, Matinha, Mineiros, Itararé, Esperança, Palmeiras, Morro do Adeus, Baiana e Reservatório de Ramos. O Complexo é marcado pela pobreza, violência e exclusão social, apresentando baixo Índice de Desenvolvimento Humano, além de um alto índice de desemprego e baixa escolaridade. O IDH-M do Complexo do Alemão foi calculado em 0,709 e a expectativa de vida em 64,38 anos [IPP 2005].

Dentre as comunidades existentes no Complexo do Alemão, as comunidades do Morro do Adeus e do Piancó foram selecionadas como cenário para simulação. Dados do Censo Demográfico de 2000 apontam uma população de 2.995 habitantes, distribuída em 817 domicílios, conforme pode ser observado através da Tabela 8 [BME 2006].

Tabela 8 – Distribuição de Habitantes e Domicílios do Morros do Adeus e Piancó [BME 2006]

COMUNIDADE	ANO DE CRIAÇÃO	HABITANTES	DOMICÍLIOS
MORRO DO ADEUS	1951	1.252	354
MORRO DO PIANCÓ	1951	1.743	463

Os Morros do Adeus e do Piancó foram mapeados para a realização das simulações em uma área de 731 x 355 metros. Tais valores foram obtidos através de medições realizadas com programa Rio Atlas [RioAtlas 2006]. As comunidades presentes na Figura 55 representam a área da simulação.

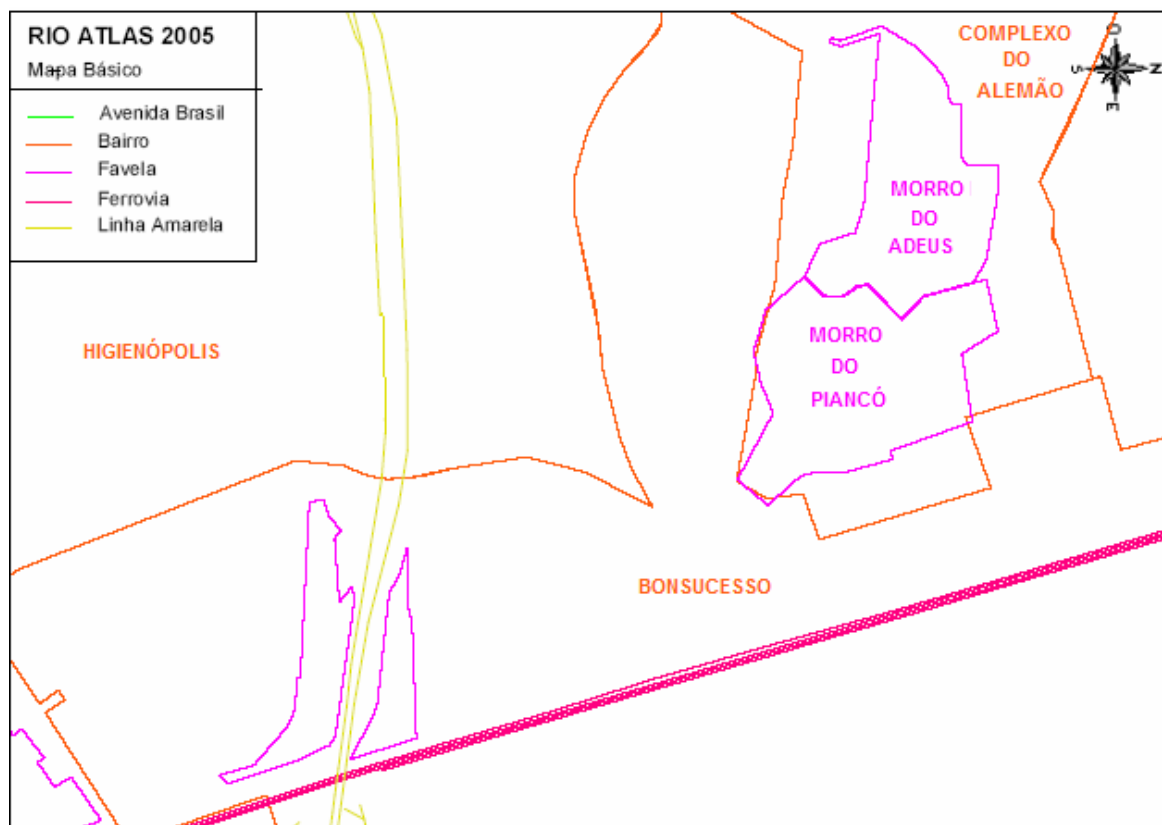


Figura 55 – Morro do Adeus e do Piancó [RioAtlas 2006]

A Figura 56 apresenta a distribuição de nós por conectividade. O eixo X representa a quantidade de saltos (*hops*) necessária para que os nós se comuniquem com o ponto de acesso ou o nó sorvedouro. O índice **10+** indica a existência de 10 ou mais nós intermediários entre o destinatário e o remetente dos dados. Já o índice **-1**, indica o percentual de nós que permaneceram sem conectividade com todos os demais nós da simulação.

Nos cenários com 1, 2 e 5 nós, o percentual de nós com ausência total de conectividade é considerado representativo. Nos cenários com 20 e 50 nós, não houve registro de nós sem conectividade.

Para que possa haver um nível de conectividade aceitável no Morro do Adeus e do Piancó é necessária a existência de 10 ou mais nós ativos.

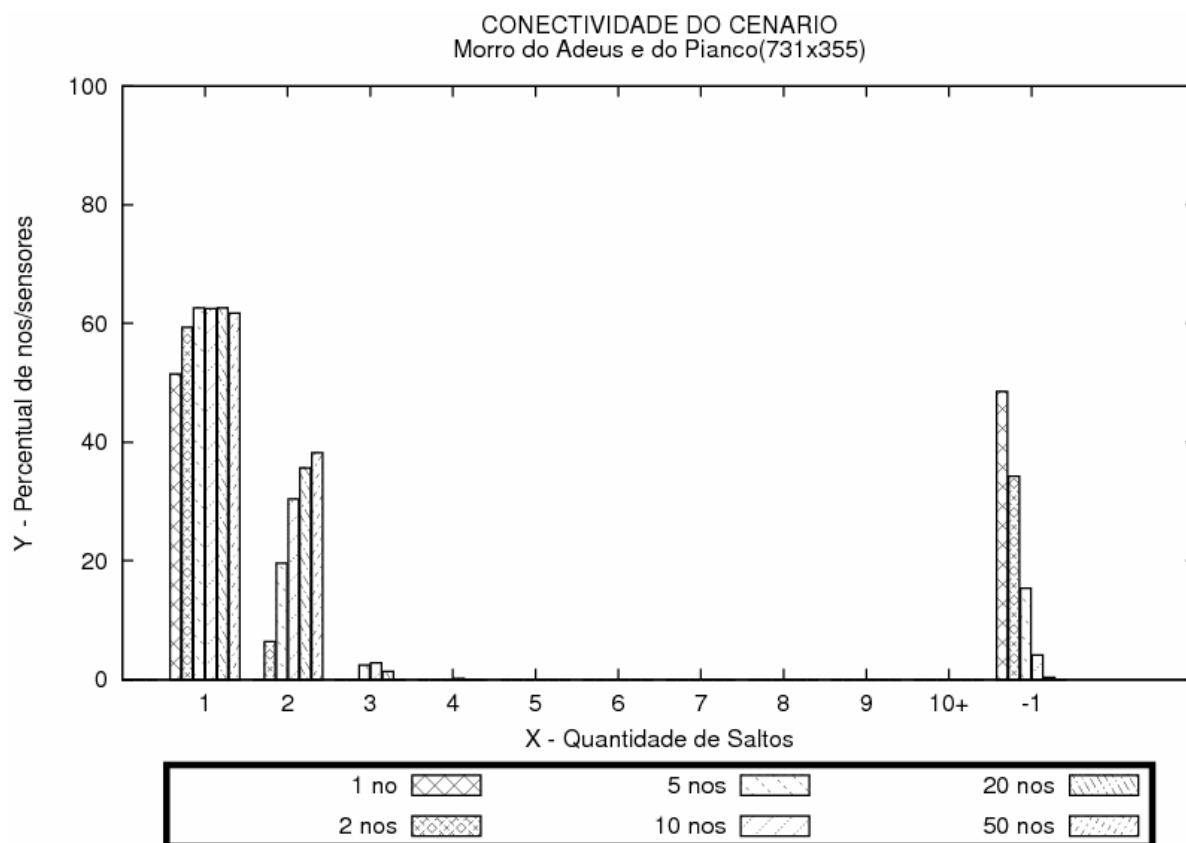


Figura 56 – Conectividade do Morro do Adeus e do Pianco

7.2.3 – Morro Santa Marta

A ocupação do Morro Dona Marta iniciou-se por volta de 1940 por famílias oriundas no norte Fluminense e do Sul de Minas Gerais. A partir de 1960, foi também ocupada por nordestinos, principalmente paraibanos. Mapas do século passado identificam a localidade como Morro Dona Marta, possivelmente como referência à antiga proprietária de nome Marta. O nome da comunidade do Morro Santa Marta está associado à construção de uma igreja católica no Morro Dona Marta em 1945, à época da Segunda Guerra Mundial. Dados do Censo Demográfico de 2000 apontam uma população de 4.482 habitantes, distribuída em 1.372 domicílios, conforme pode ser observado através da Tabela 9 [BME 2006].

Tabela 9 – Distribuição de Habitantes e Domicílios do Morro Santa Marta [BME 2006]

COMUNIDADE	ANO DE CRIAÇÃO	HABITANTES	DOMICÍLIOS
MORRO SANTA MARTA	1940	4.482	1.173

O Morro Dona Marta foi mapeado para a realização das simulações em uma área de 190 x 352 metros. Estes valores foram obtidos através do programa Rio Atlas [RioAtlas 2006]. A comunidade presente na Figura 57 representa a área da simulação.

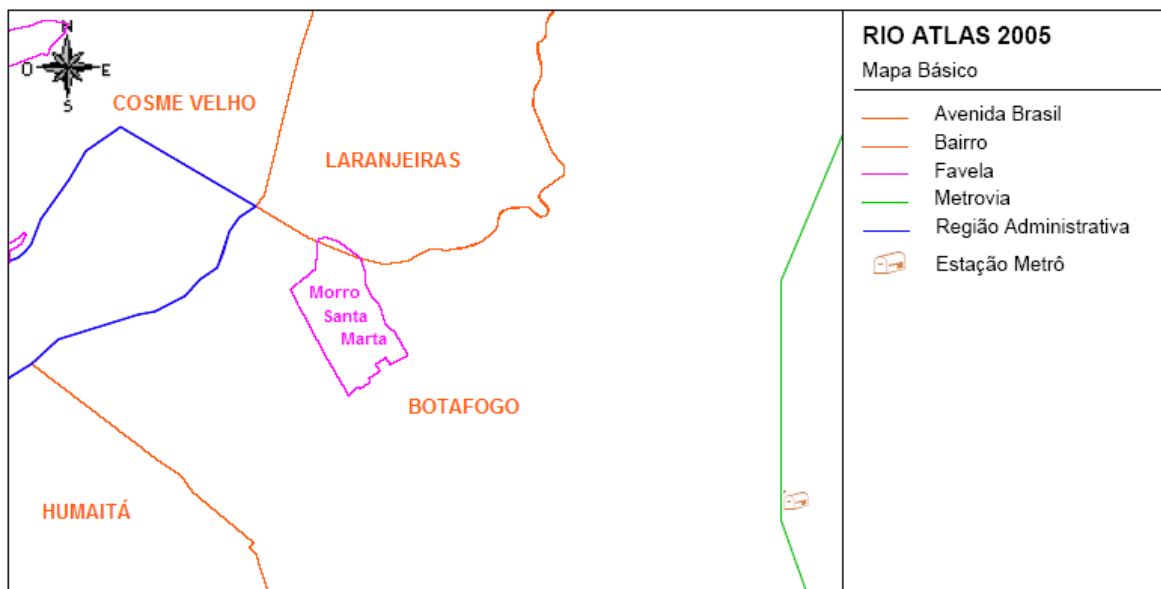


Figura 57 – Comunidade Santa Marta [RioAtlas 2006]

A Figura 58 apresenta a distribuição de nós por conectividade. O eixo X representa a quantidade de saltos (*hops*) necessária para que os nós se comuniquem com o ponto de acesso ou o nó sorvedouro. O índice **10+** indica a existência de 10 ou mais nós intermediários entre o destinatário e o remetente dos dados. Já o índice **-1**, indica o percentual de nós que permaneceram sem conectividade com todos os demais nós da simulação.

Neste cenário, diferentemente dos demais e independente da quantidade de nós, não houve problema de conectividade. Todos os nós foram posicionados dentro do alcance do ponto de acesso.

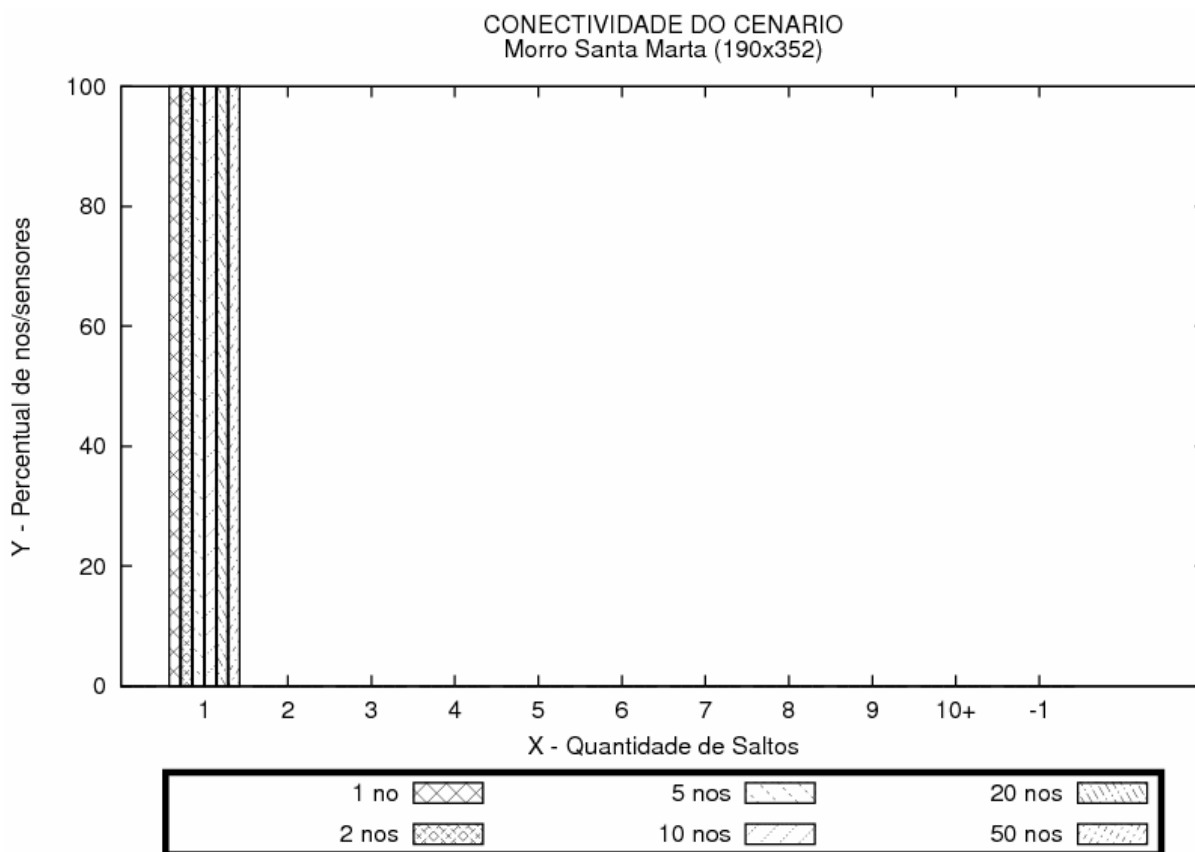


Figura 58 – Conectividade do Morro Santa Marta

7.3 – Metodologia

Em cada um dos três cenários, constituídos pelas comunidades do Complexo da Maré, Morro de Adeus e do Piancó e Morro Santa Marta, foi posicionado, no ponto central, o dispositivo de conexão com a rede pública, denominado ponto de acesso ou BS (*Base Station*) nas redes *ad hoc* e sensor sorvedouro ou *data sink* nas redes de sensores. As simulações foram realizadas com 1, 2, 5, 10, 20 e 50 nós, além do ponto de acesso. Todos os nós permanecem fixos (imóveis) e ligados durante todo o tempo das simulações. Embora a economia de energia seja uma métrica importante, esta questão não será avaliada nesta dissertação, pois existe a pressuposição que todos os nós encontram-se conectados à rede de energia elétrica.

Como as simulações visam atender aos requisitos dos projetos Cidades Digitais e SBTVD, todo o tráfego de interesse foi mapeado e os padrões de tráfego foram denominados de:

- Ponto-Multiponto: No caso do canal de descida complementar do Sistema de Televisão Digital Interativa, temos a emissora ou o provedor de conteúdo enviando

dados para os assinantes. No caso do *download* de dados da Cidade Digital, todos os dados serão encaminhados do ponto de acesso para as estações requisitantes;

- Multiponto-Ponto: No caso do canal de interatividade do Sistema de Televisão Interativa e do *upload* de dados através de pontos de acesso da Cidade Digital, temos todo o tráfego destinado a um único ponto.

O simulador de redes ns-2 [NS-2 2006], versão 2.29.2 foi utilizado para efetuar a simulação dos protocolos para redes *ad hoc* e dos protocolos para redes de sensores nos cenários descritos.

Com o intuito de analisar o comportamento dos protocolos AODV, DSDV, DSR, DD-1PP, DD-2PP e DD-*Push*, foram realizadas 100 simulações, com cada um dos protocolos nos cenários Ponto-Multiponto e Multiponto-Ponto, com 1, 2, 5, 10, 20 e 50 nós na rede, simulando um Telecentro ou um computador com placa de rede WiFi no caso do projeto Cidades Digitais e um dispositivo URD ou *set top box* no caso do SBTVD. Ou seja, cada um dos protocolos passou por 3.600 simulações.

No caso do cenário Ponto-Multiponto foram criados n fluxos em *unicast* do ponto de acesso para cada um dos nós. Já no caso do cenário Multiponto-Ponto foram criados n fluxos em *unicast* de cada um dos nós para o ponto de acesso. Cabe ressaltar que a quantidade de fluxos em *unicast* está relacionada à quantidade de nós de cada simulação (1, 2, 5, 10, 20 ou 50), ou seja, um fluxo *unicast* por nó. Cada fluxo *unicast* descrito envia, a uma taxa constante (CBR – *Constant Bit Rate*) de 150 Kbps, pacotes com tamanho de 200 bytes. A taxa de 150 Kbps foi empregada com intuito de provocar, propositalmente, congestionamento nas simulações com maior quantidade de nós. Já o tamanho do pacote de 200 bytes foi utilizado por se aproximar do tamanho do pacote do MPEG-2 (188 bytes).

O código do ns-2 que implementa os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push* do protocolo *Directed Diffusion* não dispõe de um agente capaz de prover tráfego CBR, diferentemente dos protocolos AODV, DSDV e DSR para redes *ad hoc*. Desta forma, foi necessário desenvolver um código especificamente para simular o envio de pacotes de dados em intervalos constantes (tráfego CBR) e associá-lo aos algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push*.

Cada simulação foi executada pelo tempo de 17 minutos ou 1020 segundos. Com o intuito de desprezar os possíveis ajustes iniciais de cada protocolo, os primeiros 7 minutos ou 420 segundos foram descartados do processo de avaliação. Foi desenvolvido um programa específico para gerar, de forma aleatória, topologias para as simulações. A distância mínima entre os nós foi definida como 5 metros e a repetição de uma topologia é improvável, já que o programa armazena, em uma área de dados, o histórico de posicionamento de cada um dos nós por protocolo, por quantidade de nós (1, 2, 5, 10, 20 e 50) e por cenário. Em cenários com menor área geográfica, como no caso do Morro Santa Marta, e com maior quantidade de nós (20 ou 50), pode haver uma diminuição dessa distância. Após 20 tentativas de posicionamento aleatório sem sucesso, o programa reduz a distância para 4 metros e efetua uma nova rodada. Caso não consiga encontrar uma coordenada X,Y não utilizada, a distância é novamente reduzida, até que seja possível posicionar adequadamente cada nó.

Conforme pode ser observado nas figuras de conectividade dos cenários Complexo da Maré, Morro do Adeus e Piancó e Morro Santa Marta (Figura 54, Figura 56 e Figura 58), apresentadas na subseção 7.2 – Cenários, nas simulações com poucos nós há a incidência de cenários “desertos”, ou seja, cenários onde inexistente conectividade entre o ponto de acesso e todos os demais nós da rede.

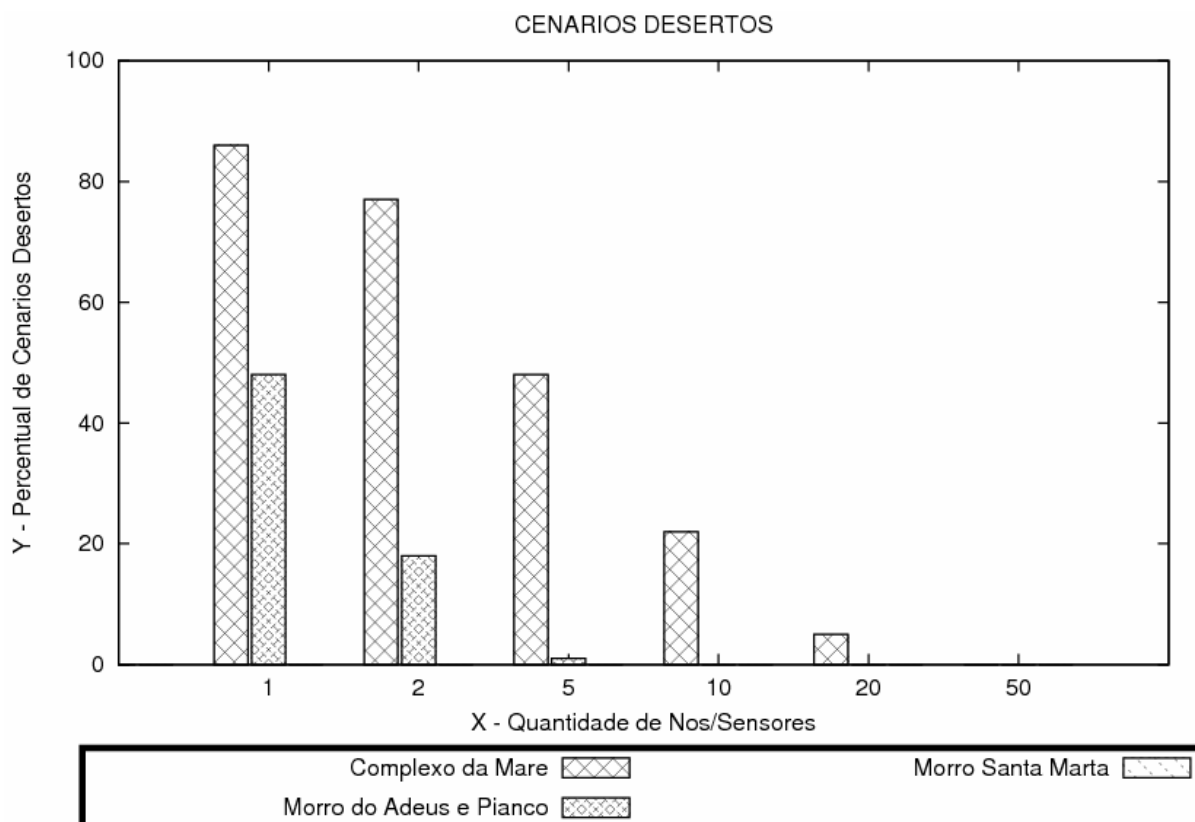


Figura 59 – Percentual de Cenários Desertos

A Figura 59 apresenta o percentual de simulações “desertas” por cenário, corroborando a necessidade de definição de uma quantidade mínima de nós por cenário para que haja conectividade plena ou, pelo menos, aceitável. Com base na Figura 59 é possível tecer as seguintes observações com respeito ao nível de conectividade:

- Cenário Complexo da Maré – Para que haja conectividade plena são necessários 50 nós. Um nível aceitável de conectividade pode ser alcançado com 20 nós;
- Cenário Morro do Adeus e Pianco – Para que haja conectividade plena são necessários 10 nós. Um nível aceitável de conectividade pode ser alcançado com 5 nós;
- Cenário Morro Santa Marta – Neste cenário, em função da área geográfica reduzida, todos os nós encontram-se ao alcance do ponto de acesso. Não há, desta forma, ocorrência de cenário “deserto”.

Em função da quantidade total de simulações (21.600) e do tempo necessário às simulações (em média 1 hora e 25 minutos cada simulação com 50 nós), o planejamento exigiu a distribuição dos cenários em servidores diferenciados. As simulações foram executadas em 3 sistemas, a saber:

- tvd.ic.uff.br – servidor com 2 processadores Pentium Xeon 3,2 GHz, 2 GB de RAM e dois discos de 80 GB com controladora SCSI, instalado com sistema operacional CentOS 4. Este servidor foi responsável pelo processamento do cenário Morro Santa Marta. Foram necessários 68 dias para concluir as simulações com o cenário do Morro Santa Marta;
- Servidor Dell - servidor com 1 Processador Pentium Xeon 3,2 GHz, 4 GB de RAM e dois discos de 60 GB com controladora SCSI, instalado com sistema operacional SuSe 9. Este servidor foi responsável pelo processamento dos cenários Complexo do Alemão e Morro do Adeus e do Piancó. Foram necessários 41 dias para concluir as simulações com o cenário do Complexo da Maré e 62 dias para o cenário do Morro do Adeus e Piancó;
- *Mainframe* IBM – Servidor IBM Z890, configurado com 3 partições, a saber: uma com sistema operacional OS/390, outra com sistema operacional z/OS e a última com sistema operacional z/VM (com máquinas virtuais z/Linux). A partição Z/VM dispõe de 2 processadores IFL (*Integrated Facility for Linux*) de 1 GHz dedicados, servidor de disco *Baby Shark*, emulando discos 3390 modelo 3 com capacidade individual de 2.8 GB e de 17.984 MB de RAM compartilhada entre todas as máquinas virtuais. A máquina virtual criada para a execução das simulações foi instalada com sistema operacional SuSe 9 *Enterprise Edition* SLES9 *Service Pack* 3 e configurada com 2GB de RAM. Como o desempenho deste servidor esteve muito aquém do esperado, mesmo após o uso de opções para otimizar o código da linguagem de programação C, a execução de simulações neste ambiente foi descartada.

As seguintes métricas foram calculadas, após cada uma das simulações, com base no arquivo de *trace* gerado pelo ns-2 e com índice de confiança de 95%:

- Atraso Médio – O atraso medido refere-se ao atraso da camada AGT (*Agent*), ou seja, pelo tráfego gerado pela aplicação CBR (*Constant Bit Rate*). Como cada pacote enviado possui um identificador único, foi necessário apenas subtrair o tempo do evento de recepção do pacote pelo tempo do evento de transmissão. Os valores individuais de atraso de cada pacote são acumulados e, ao final, o atraso médio é calculado através da divisão do atraso acumulado pela quantidade de pacotes. O atraso médio é apresentado em segundos;

- **Vazão Média** – A vazão média é calculada pela quantidade de bytes dos pacotes recebidos pela camada AGT (*Agent*), dividida tempo da simulação. A quantidade de bytes de cada pacote é acumulada e, ao final, dividida pelo tempo da simulação. A vazão média é exibida em Mbps (milhões de *bits* por segundo);
- **Percentual de Perdas** – O percentual de eventos de perda causado por congestionamento (estouro de fila – IFQ) e o percentual de eventos de perda acumulado (todos os tipos de perda) da camada de rede foram calculados em relação à quantidade total de pacotes transmitidos com sucesso;
- **Percentual de Colisões** – Representa o percentual de ocorrência de colisões na camada MAC em relação à quantidade total de pacotes transmitidos com sucesso.
- **Conectividade** – Apresenta a distribuição, em percentual, dos nós em relação à quantidade de saltos (*hops*) com destino ao ponto de acesso. Os gráficos resultantes desta métrica foram apresentados na seção 7.2 – Cenários e na Figura 59.

7.4 – Resultados

De forma a simplificar o entendimento, os resultados serão apresentados agrupados pelo tipo de cenário, ou seja, agrupados em Ponto-Multiponto e em Multiponto-Ponto.

7.4.1 – Ponto-Multiponto

No cenário Ponto-Multiponto, o ponto de acesso envia n fluxos em *unicast* para cada um dos nós existentes na topologia criada. As métricas de atraso, vazão e percentual de perdas são analisadas nas subseções a seguir.

O cenário Ponto-Multiponto apresenta uma grande concentração de mensagens transmitidas do ponto de acesso, que é único, para os nós que encontram-se a 1 salto (*hop*) de distância. A partir deste ponto, principalmente nos cenários de ampla área geográfica como no Complexo da Maré, inicia-se um processo de disseminação das mensagens para os nós da rede (pontos de concentração), que encontram-se geograficamente distribuídos. Ou seja, na região onde existe uma maior concentração de mensagens, a imensa maioria destas mensagens é enviada por um único nó da rede, o ponto de acesso. Como a disputa para obter acesso ao meio será mínima, a quantidade de colisões na camada MAC será reduzida.

7.4.1.1 – Atraso

No cenário Complexo da Maré, conforme apresentado pela Figura 60, os algoritmos de difusão para redes de sensores 1PP e *Push* apresentaram um atraso inferior ao algoritmo 2PP, o que era de fato esperado. O fato do algoritmo de difusão 2PP executar uma fase de inundação a mais que os outros dois algoritmos de difusão implica um atraso maior. Além disso, os nós enviam, periodicamente, mensagens *exploratory data*, com o intuito de ajustar os gradientes, em função da possibilidade de alteração na topologia da rede. Este fato fica evidenciado com o aumento da quantidade de nós e, conseqüentemente, da quantidade de fluxos CBR ativos.

Em relação aos protocolos para redes *ad hoc*, o comportamento apresentado pelo protocolo DSR era, de fato, esperado, pois o protocolo DSR atua de forma reativa. De acordo com [Perkins et al. 2001], o efeito produzido pelo armazenamento de rotas no *route cache* do protocolo DSR surte efeito até um limite, dependendo da topologia da rede. Após este limite o protocolo DSR passa a apresentar resultados inferiores. Além disso, o aproveitamento de rotas desatualizadas no *root cache* pelo protocolo DSR implica o estabelecimento de rotas ineficientes. [Jiang e Garcia-Luna-Aceves 2001] relatam, ainda, que o protocolo DSR envia uma quantidade significativa de pacotes de controle em simulações com muitos fluxos de dados. Os protocolos AODV e DSDV apresentaram resultados praticamente idênticos. Os resultados comentados podem ser visualizados na Figura 60.

O protocolo DSDV apresentou o melhor resultado, tendo o atraso calculado em 0,227 segundo. O pior resultado coube ao algoritmo de difusão 2PP, com 1,946 segundo.

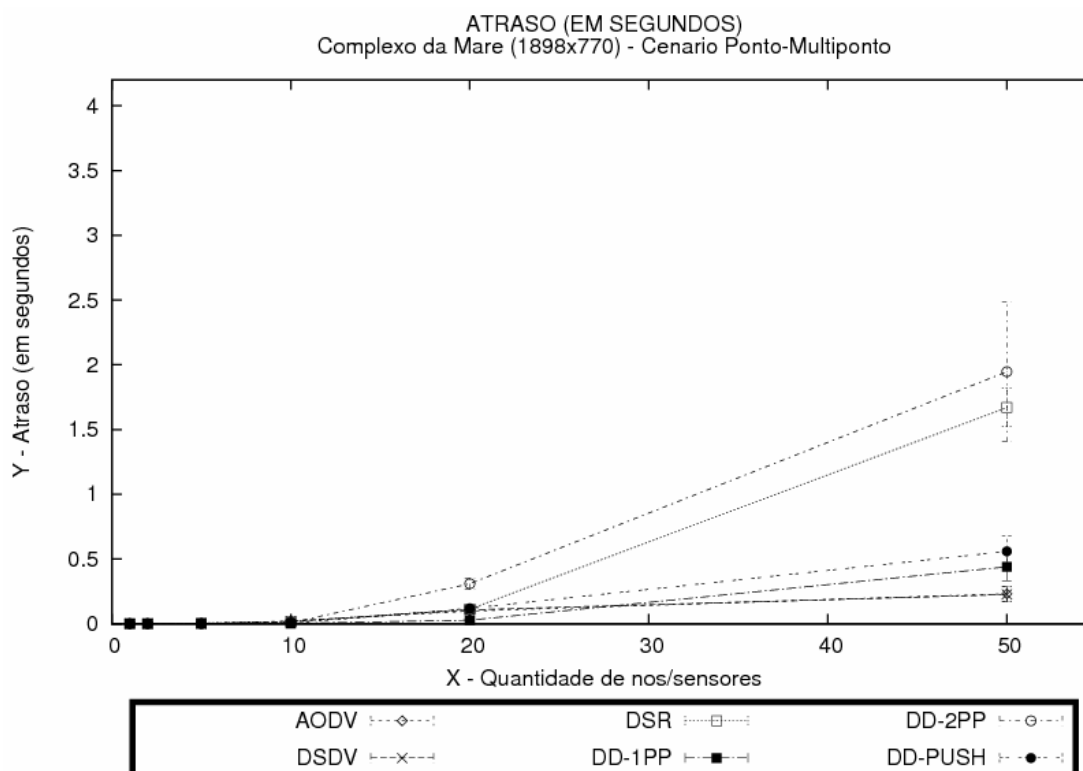


Figura 60 – Complexo da Maré - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Atraso

A Figura 61 apresenta os resultados obtidos nas simulações com o cenário do Morro do Adeus e do Piancó. O atraso observado do protocolo DSR e do algoritmo de difusão 2PP acompanhou a análise anterior. Como agravante, o fato da área geográfica ser inferior ao cenário do Complexo da Maré determinou uma maior ocorrência de colisões na camada MAC durante a simulação do protocolo DSR e do algoritmo de difusão 2PP, implicando a necessidade de retransmissões e, conseqüentemente, provocando um atraso maior.

Os protocolos para redes *ad hoc* AODV e DSDV, assim como os algoritmos de difusão 1PP e *Push*, apresentaram atraso inferior em todas as medições efetuadas. Neste cenário, na simulação com 50 nós, o algoritmo de difusão 2PP apresentou um atraso 64,52% superior com a mesma comparação. O algoritmo de difusão *Push* apresentou a maior redução, sendo 72,04% inferior à medida anterior. O melhor resultado foi apresentado pelo protocolo DSDV, com atraso de 0,102 segundo e o pior resultado foi apresentado pelo algoritmo de difusão 2PP, com atraso de 3,202 segundos.

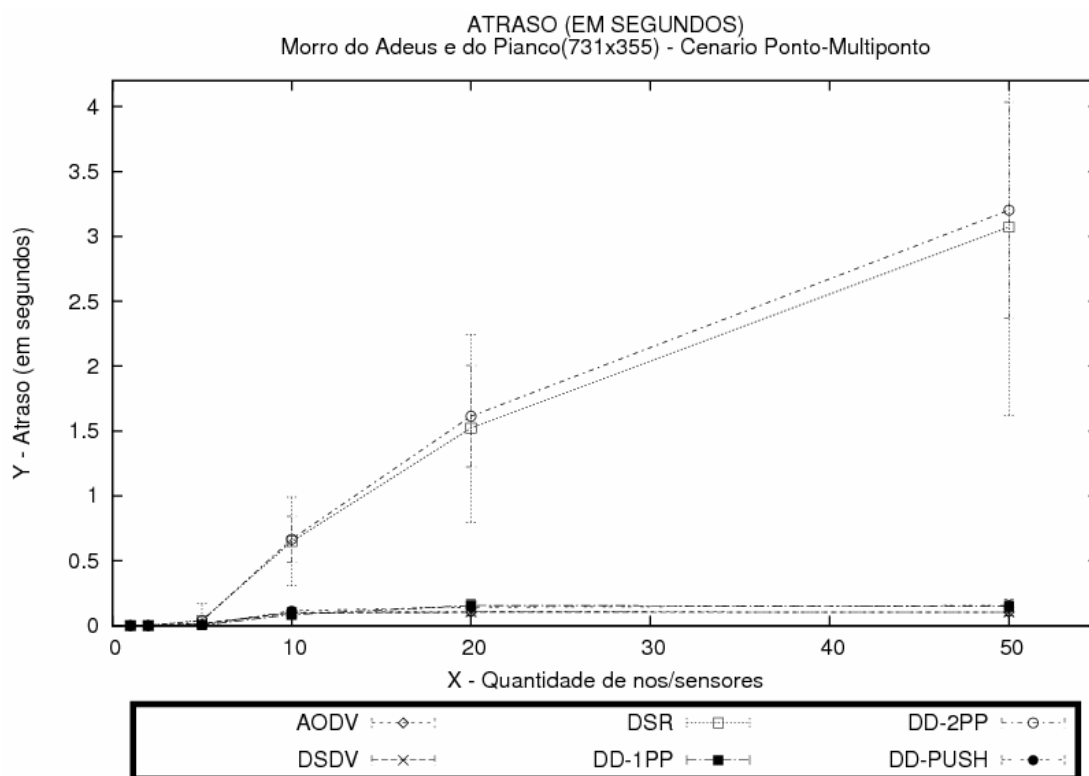


Figura 61 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Atraso

O mesmo comportamento descrito para o cenário do Morro do Adeus e do Piancó se aplica ao cenário do Morro Santa Marta e pode ser notado na Figura 62. Novamente os maiores atrasos foram observados nos resultados obtidos com o protocolo DSR e, principalmente, pelo algoritmo de difusão 2PP.

O fato de todos os nós estarem a um salto (*hop*) de distância do ponto de acesso, ou seja, a comunicação entre o ponto de acesso e os nós passa a ser direta (sem retransmissão de nós intermediários), reduziu o percentual de colisões na camada MAC observadas e permitiu, conseqüentemente, uma redução no valor do atraso. Neste cenário, na simulação com 50 nós, novamente o algoritmo de difusão *Push* apresentou a maior redução, sendo 64,11% inferior à medida anterior, além de apresentar o menor tempo de atraso (0,056 segundo). O pior resultado foi apresentado pelo algoritmo de difusão 2PP, com atraso de 2,298 segundos.

Vale ressaltar que os protocolos AODV e DSDV, além do algoritmo de difusão *Push*, apresentaram percentual de colisões na camada MAC inferior a 0,20%.

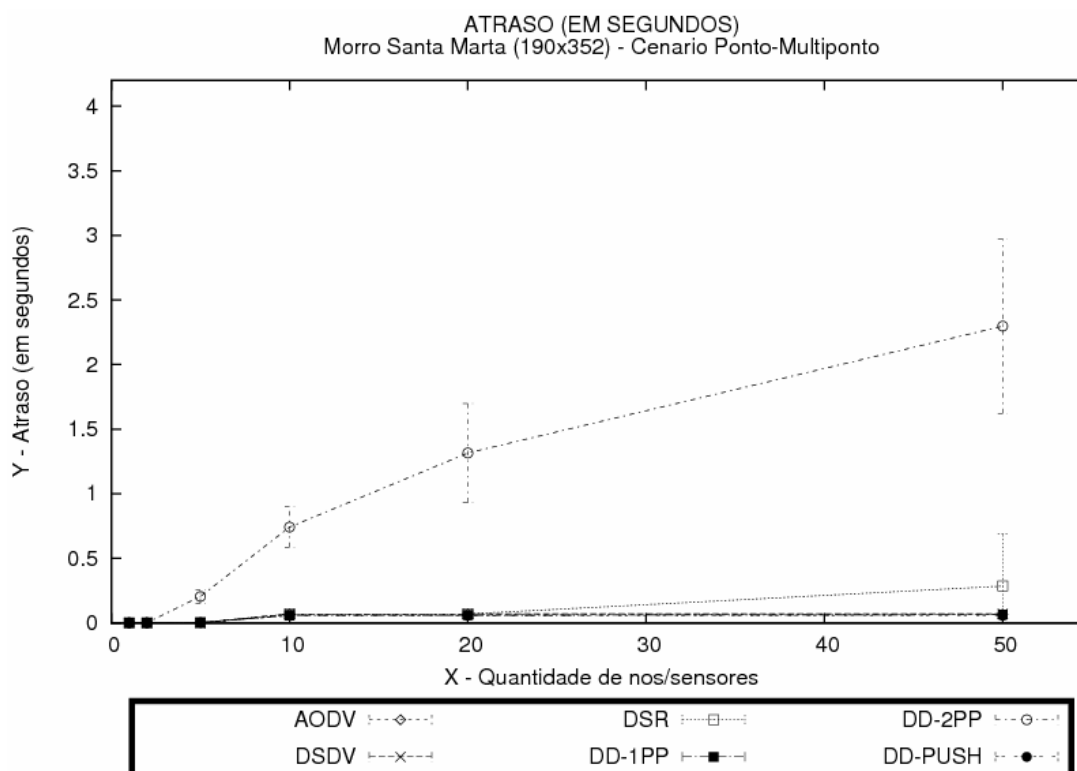


Figura 62 – Morro Santa Marta - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Atraso

Embora o cenário do Complexo da Maré tenha apresentado um atraso bem inferior aos demais cenários nas simulações com 1, 2, 5, 10 e 20 nós, este resultado não é absoluto, pois foi obtido em função do grande percentual de cenários “desertos”, conforme pode ser observado na Figura 59. Nessas simulações, como não houve tráfego entre o ponto de acesso e os demais nós, também não houve atraso, ou seja, o atraso foi zerado. Este fato também ocorre no cenário Morro do Adeus e Piancó, porém em menor escala. Nas simulações onde a incidência de cenários “desertos” foi significativa, as métricas foram recalculadas, excluindo-se os resultados zerados. No entanto, como o resultado sofreu uma variação desprezível, os valores zerados foram mantidos no resultado final.

7.4.1.2 – Percentual de Colisões

Na avaliação do percentual de colisões na camada MAC do cenário do Complexo do Alemão, representado pela Figura 63, os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push* do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores apresentaram uma quantidade de colisões na camada MAC superior aos protocolos AODV, DSDV e DSR para redes *ad hoc*.

[Figueiredo et al. 2004] e [Nakamura et al. 2004] ressaltam que o protocolo *Directed Diffusion* busca sempre identificar o melhor caminho⁴ entre os nós (sensores fonte) e o ponto de acesso (sensor sorvedouro). O ponto de acesso recebe, então, dados de múltiplos caminhos, com diferentes frequências (taxas) de entrega e reforça o melhor caminho. Caso o melhor caminho venha a falhar, um outro caminho alternativo é selecionado através do envio de mensagem de reforço e a frequência (taxa) de envio dos dados é aumentada gradativamente. Esta abordagem implica o envio de mensagens em difusão, produzindo uma inundação controlada. O uso do protocolo *Directed Diffusion* associado ao uso do protocolo MAC IEEE 802.11 (CSMA/CA - *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) provoca um aumento na quantidade de colisões na camada MAC quando o número de fontes é elevado, até que se estabeleça o melhor caminho. O protocolo *Directed Diffusion* não consegue estabelecer as rotas, em função da perda das mensagens de reforço devido à ocorrência de colisões na camada MAC, resultando em um tráfego ainda maior. Através da Figura 63, podemos observar este comportamento principalmente nos algoritmos de difusão 1PP e 2PP, em função do envio de uma maior quantidade de mensagens em difusão.

A quantidade de colisões na camada MAC produzida pelo algoritmo de difusão 2PP foi superior à quantidade de colisões na camada MAC do algoritmo 1PP. Este fato é esperado, em função do algoritmo de difusão 2PP dispor de duas mensagens transmitidas por inundação, enquanto que o algoritmo 1PP dispõe de apenas uma. Além disso, os nós executando o algoritmo 2PP enviam, periodicamente, mensagens *exploratory data*, com o intuito de ajustar os gradientes. Estas mensagens são enviadas devido a alterações que possam ocorrer na topologia da rede, seja por mobilidade de sensores, seja por perda de alimentação, perda de conectividade etc.

Entre os protocolos para redes *ad hoc*, o protocolo DSR voltou a apresentar um desempenho ruim nas simulações com 50 nós. As observações produzidas por [Perkins et al. 2001] e [Jiang e Garcia-Luna-Aceves 2001] se aplicam novamente.

⁴ No caso dos algoritmos de difusão do *Directed Diffusion*, o melhor caminho é normalmente definido pelo caminho de menor atraso.

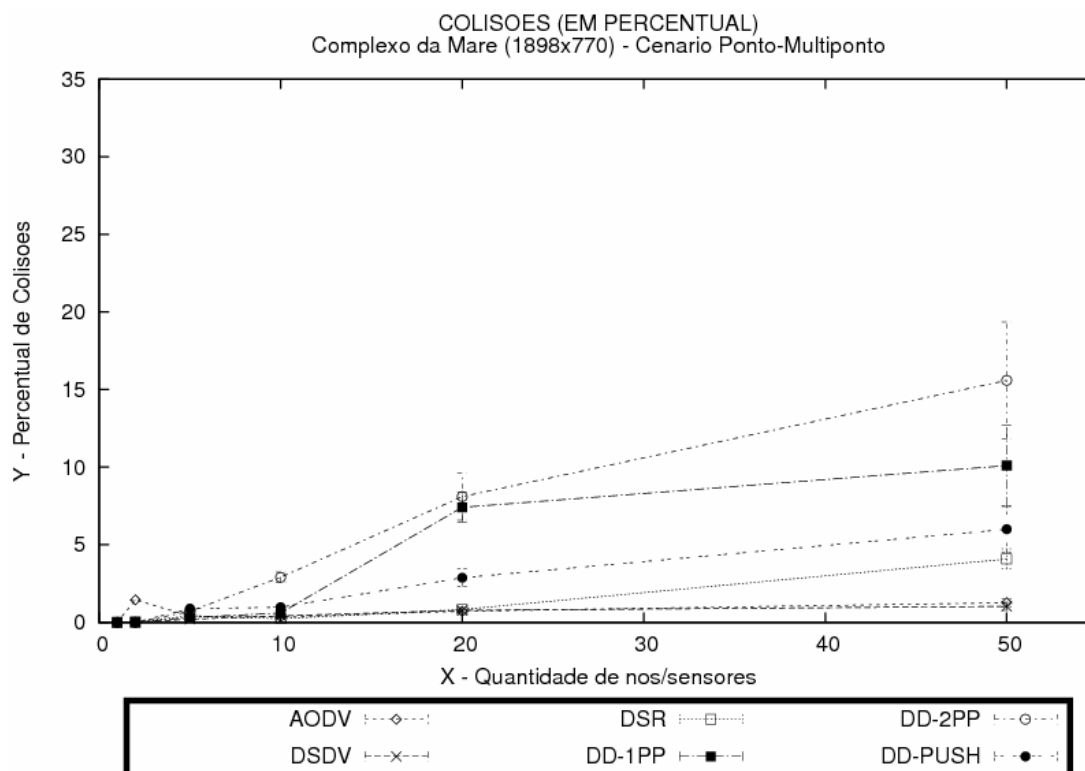


Figura 63 – Complexo da Maré - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Colisões

A Figura 64 e a Figura 65 ratificam que os mesmos comentários efetuados para o cenário do Complexo da Maré se aplicam aos cenários do Morro do Adeus e do Piancó e do Morro Santa Marta. Deve-se ressaltar, ainda, o aumento significativo do percentual de colisões na camada MAC do protocolo DSR nas simulações com 50 nós. Os protocolos AODV e DSDV apresentaram comportamento praticamente idêntico nos dois cenários, com um percentual de colisões na camada MAC bastante reduzido. Cabe ressaltar que em todas as simulações com o protocolo AODV, independente da quantidade de nós, não houve ocorrência de colisões na camada MAC no cenário do Morro Santa Marta e, no cenário do Morro do Adeus e do Piancó, o pior caso (10 nós) apresentou percentual de colisões na camada MAC igual a 1,17%.

Os algoritmos de difusão *Push* e 1PP apresentaram um comportamento similar em relação à métrica de atraso. Neste caso, houve redução do percentual de colisões na camada MAC, principalmente no caso do algoritmo de difusão *Push*, que no cenário do Morro Santa Marta apresentou percentual de colisões na camada MAC igual a 0,12% no pior caso (50 nós) e no cenário do Morro do Adeus e do Piancó percentual de colisões na camada MAC igual a 2,00% no pior caso (10 nós). O algoritmo de difusão 2PP voltou a apresentar o pior resultado entre os protocolos para rede de sensores, devido, principalmente, às mensagens enviadas em

broadcast na primeira fase e ao envio periódico de mensagens *exploratory data*.

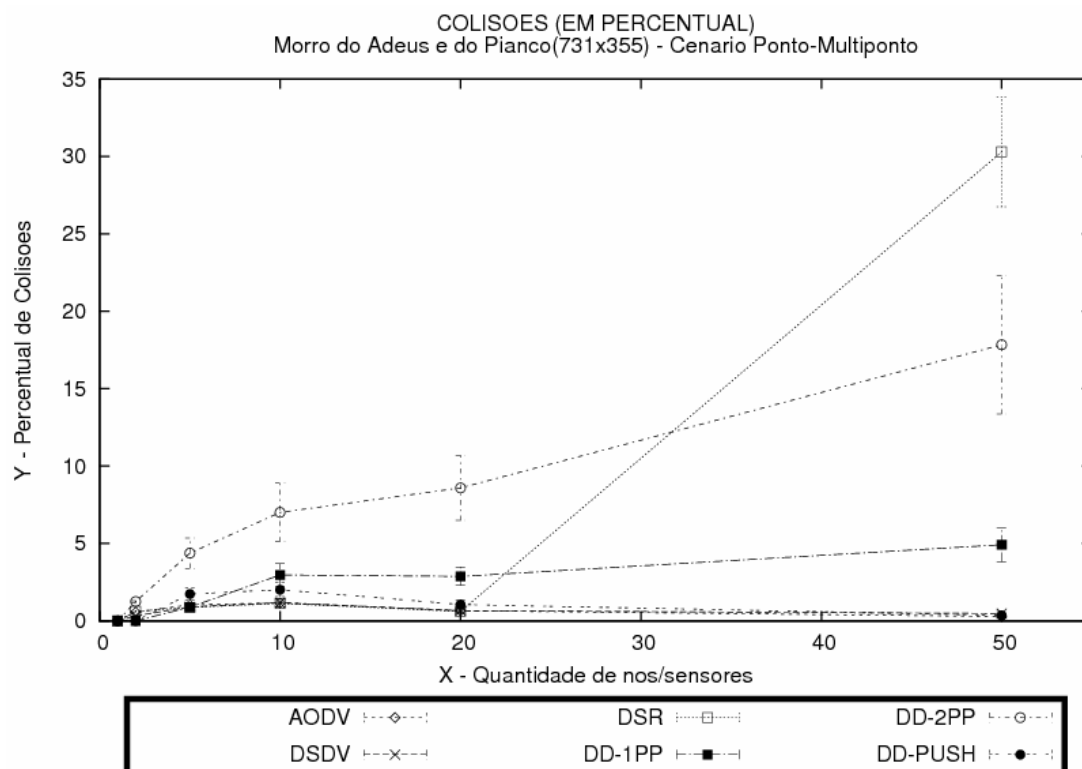


Figura 64 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Colisões

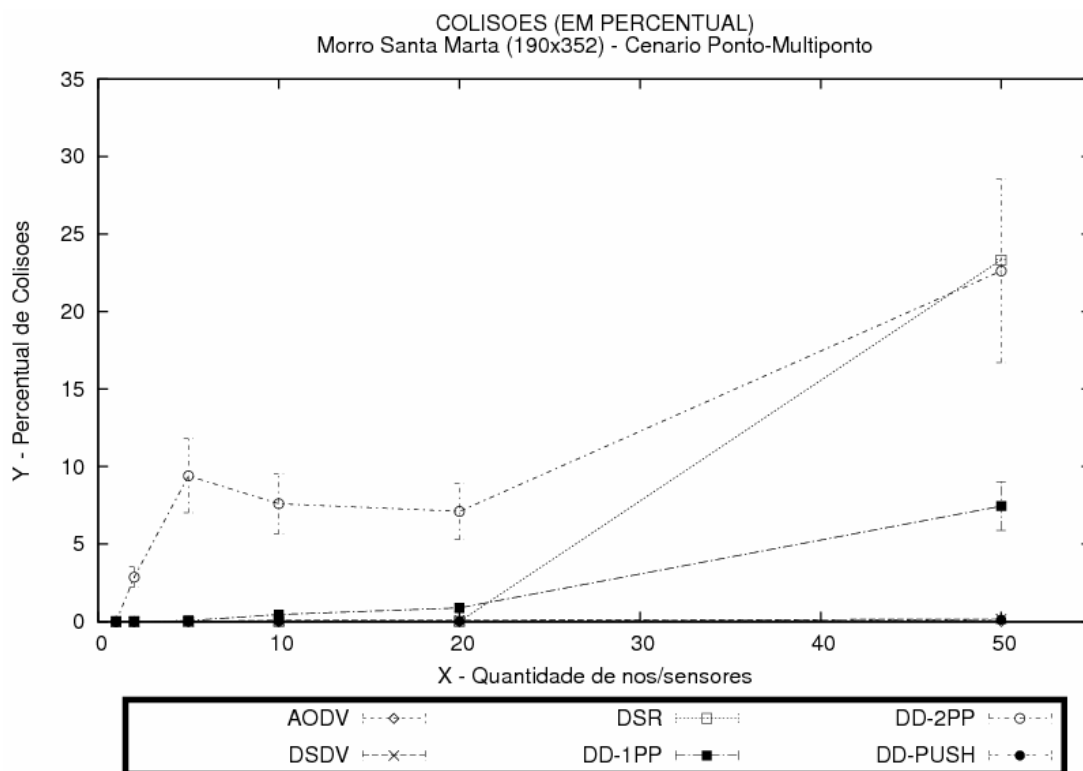


Figura 65 – Morro Santa Marta - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Colisões

7.4.1.3 – Percentual de Perda por Congestionamento

Entre os protocolos para redes *ad hoc*, o protocolo DSR apresentou o melhor resultado, conforme pode ser visto na Figura 66. Como o protocolo DSR atua de forma totalmente reativa, acaba enviando poucas mensagens de controle na rede. Já o processo de descoberta de rotas no protocolo AODV, embora também seja considerado reativo, requer o envio de mensagens RREQ e RREP em difusão, inundando a rede. Além disso, o protocolo AODV envia periodicamente mensagens de *hello* em difusão, com o intuito de identificar a ocorrência de alguma falha. O protocolo DSDV apresentou o pior resultado entre os protocolos analisados, o que era, de fato, esperado. Por ser pró-ativo, o protocolo DSDV envia, periodicamente, mensagens de controle (*full dump e incremental*), de forma que todos os nós da rede possam manter suas tabelas de roteamento atualizadas.

Entre os algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores, o 2PP e *Push* apresentaram resultados próximos. O algoritmo de difusão 2PP envia duas mensagens em difusão, uma estabelecendo o gradiente do ponto de acesso até o nó e outra estabelecendo o gradiente do nó até o ponto de acesso. Este processo inicial consome, evidentemente, mais recursos da rede, entretanto permite o estabelecimento de gradientes independente dos enlaces de comunicação entre os nós serem simétricos ou assimétricos. Além disso, como o caminho do ponto de acesso para o sensor fonte não é, necessariamente, o mesmo do nó para o ponto de acesso, dois caminhos diferentes podem ser eleitos, aproveitando melhor os recursos da rede. Já no algoritmo de difusão 1PP os gradientes estabelecidos serão utilizados para a transmissão de dados nos dois sentidos, abordagem que pode causar congestionamento. Esses comentários, exemplificados através da Figura 66, explicam porque o algoritmo de difusão 2PP apresenta um percentual de congestionamento inferior ao 1PP, mesmo enviando mais mensagens em difusão.

Embora os algoritmos de difusão *Push* e 1PP estabeleçam um único gradiente para a transmissão de dados, o algoritmo de difusão *Push* apresenta um percentual de congestionamento bem inferior. [Silva et al. 2004a] enfatizam que o algoritmo de difusão *Push* é adequado para cenários com muitos sensores sorvedouros (nós) e poucos sensores fonte (ponto de acesso). Esta afirmação explica o desempenho do algoritmo de difusão *Push* no cenário Ponto-Multiponto, cujo modelo de tráfego pode ser definido pelo envio de n fluxos de dados para vários nós da rede por um único ponto de acesso. A Figura 66 apresenta o comportamento dos protocolos analisados no cenário do Complexo da Maré.

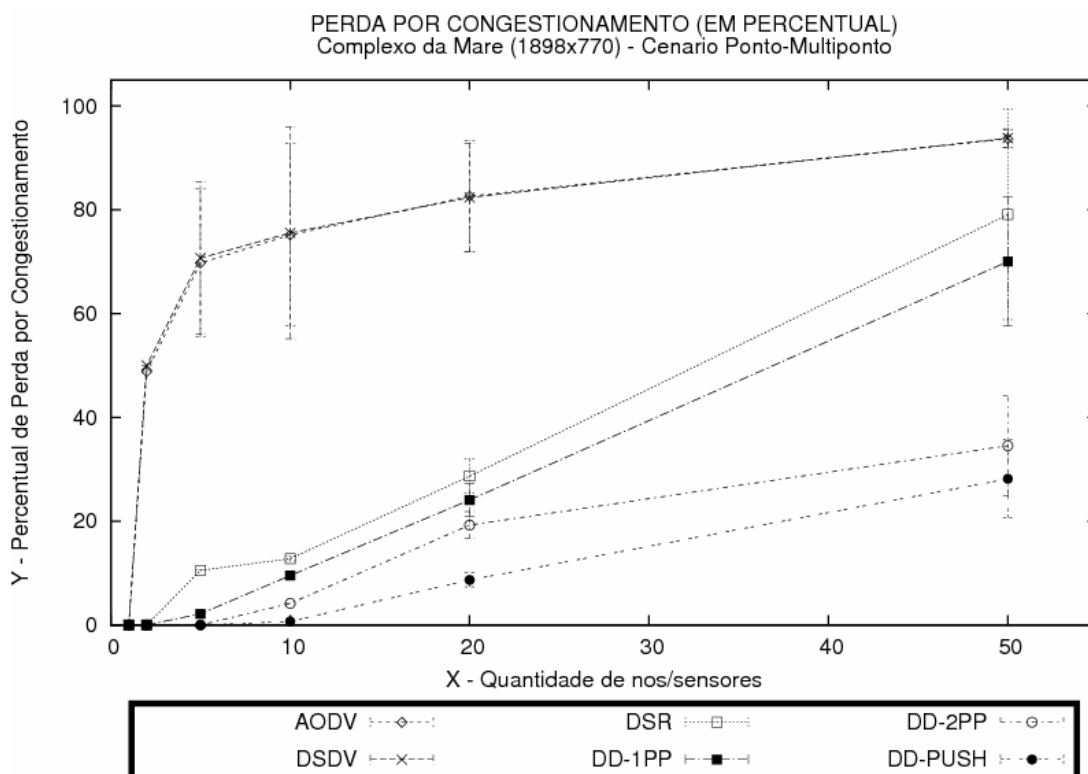


Figura 66 – Complexo da Maré - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento

Embora Morro do Adeus e do Piancó e o Morro Santa Marta descrevam cenários com área geográfica diferenciada, a maior densidade de nós nas redes destes dois cenários provocou um comportamento praticamente idêntico nos protocolos analisados, conforme pode ser observado na Figura 67 e na Figura 68. O percentual de congestionamento seguiu o mesmo padrão, apesar dos protocolos analisados apresentarem valores absolutos diferenciados.

O grupo de protocolos AODV e DSDV, assim como o grupo de algoritmos de difusão 1PP e *Push*, manteve praticamente o mesmo comportamento nos dois cenários. Na comparação com os demais protocolos para redes *ad hoc*, o protocolo DSR apresentou, nos dois cenários e em todas as simulações, um percentual de congestionamento inferior aos protocolos AODV e DSDV. Já o algoritmo de difusão 2PP somente apresentou um percentual de congestionamento inferior aos algoritmos de difusão 1PP e *Push* nas simulações com 50 nós. Nas demais simulações, os algoritmos de difusão 1PP e *Push* apresentaram melhores resultados. A existência de poucos nós não permite ao algoritmo de difusão 2PP utilizar caminhos alternativos e menos congestionados. Além disso, o algoritmo de difusão 2PP envia mais mensagens em difusão.

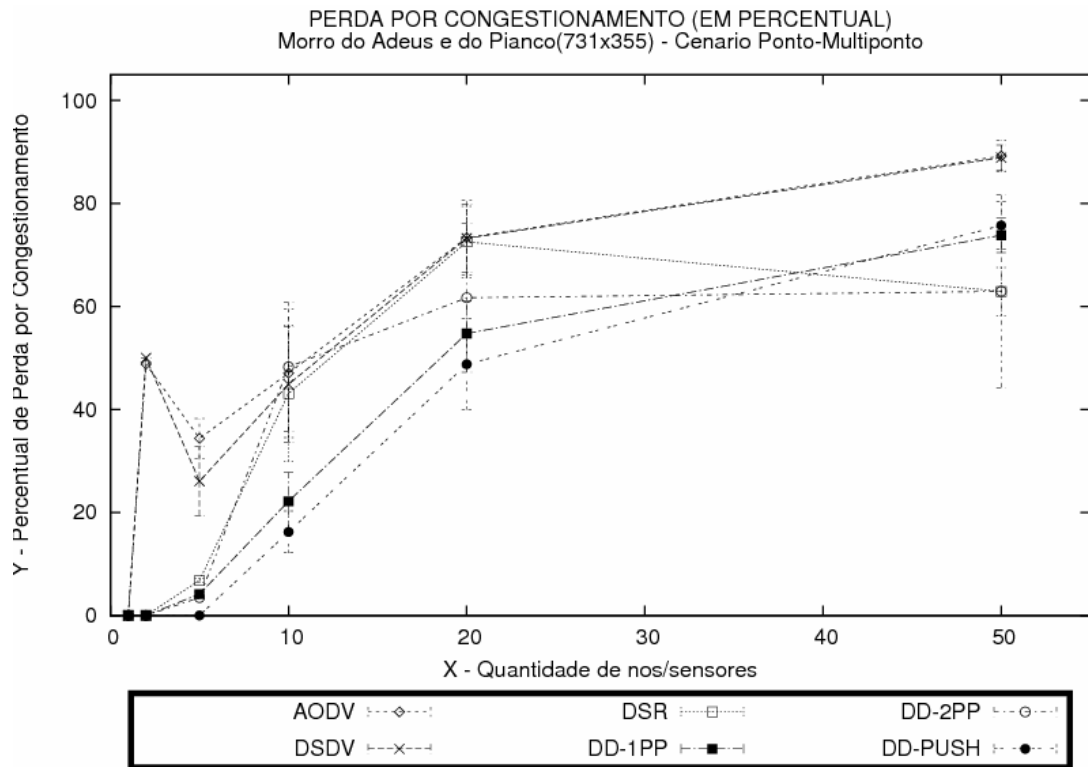


Figura 67 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento

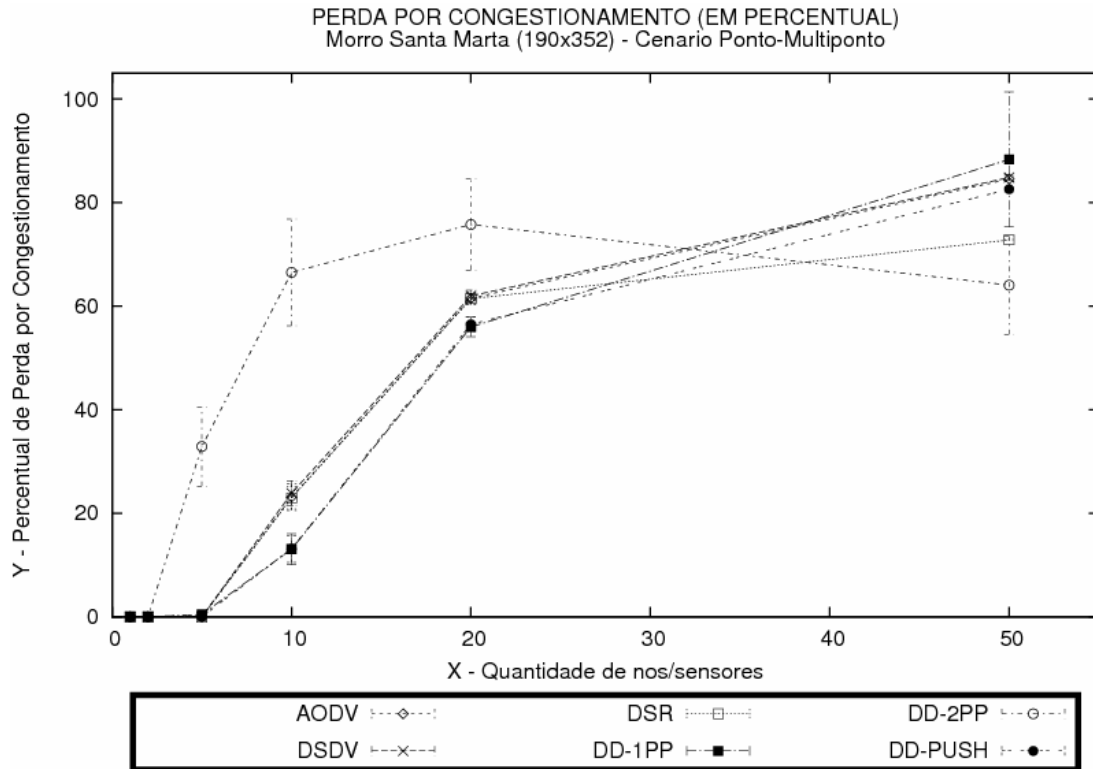


Figura 68 – Morro Santa Marta - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento

7.4.1.4 – Percentual Total de Perdas

Embora inúmeros tipos de erro na camada de rede tenham sido observados nas 21.600 simulações realizadas, o principal erro foi descrito na subseção 7.4.1.3 – Percentual de Perda por Congestionamento. A ocorrência de demais erros, decorrentes da inexistência de rota (NRTE – *No Route*), TTL expirado (TTL – *Time To Live reached 0*) etc, não foi significativa ao ponto que justificasse uma abordagem específica. O percentual total de perdas de cada um dos cenários pode ser observado na Figura 69, na Figura 70 e na Figura 71.

No cenário do Complexo da Maré, os protocolos para redes de sensores apresentam um percentual de perdas bem inferior aos protocolos para redes *ad hoc*. Enquanto que os protocolos para redes *ad hoc* apresentam percentual de perda em torno de 95%, os algoritmos 1PP, 2PP e *Push* apresentam, respectivamente, 80,08%, 51,40% e 34,22%.

Nos cenários do Morro do Adeus e do Piancó e do Morro Santa Marta, a diferença entre o comportamento dos protocolos para redes *ad hoc* e os algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* não foi tão evidente. No cômputo geral, o algoritmo de difusão *Push* apresentou o menor percentual de perdas em todos os cenários.

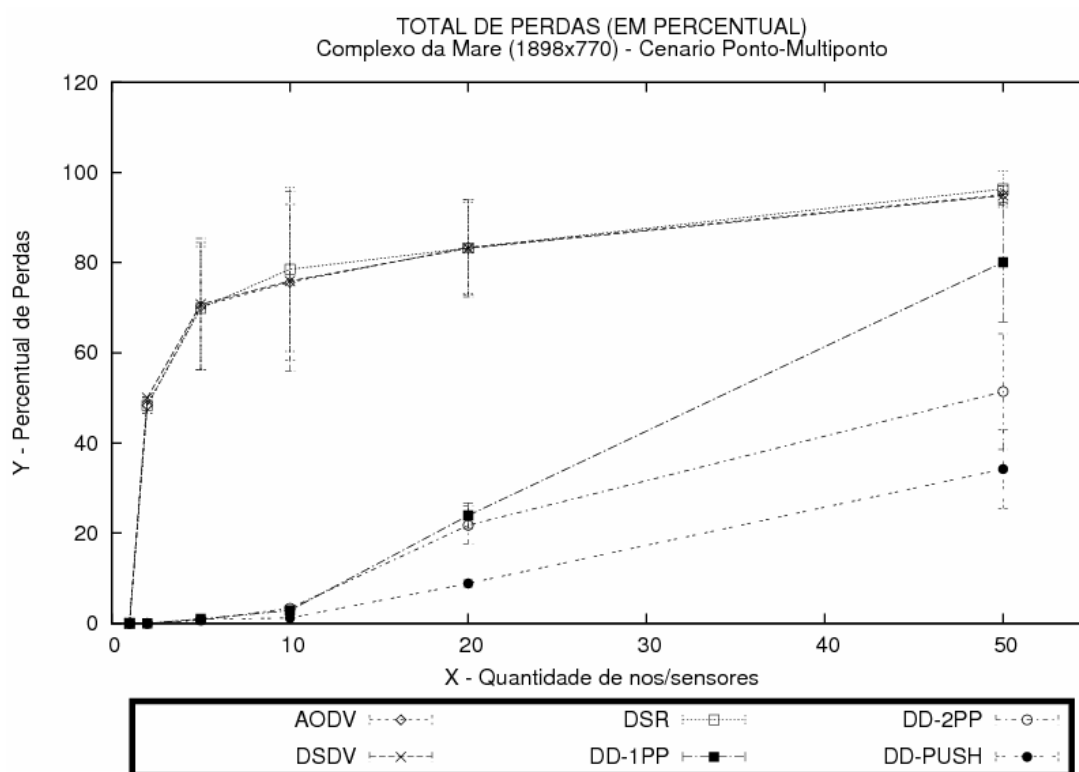


Figura 69 – Complexo da Maré - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual Total de Perdas

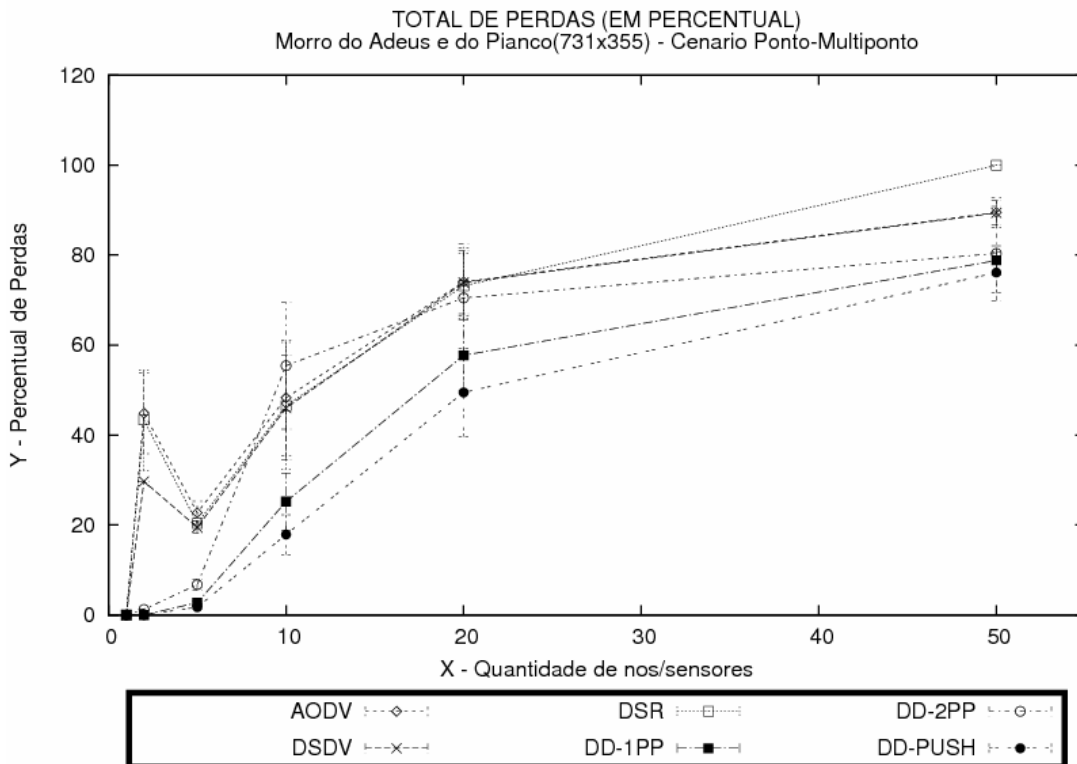


Figura 70 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual Total de Perdas

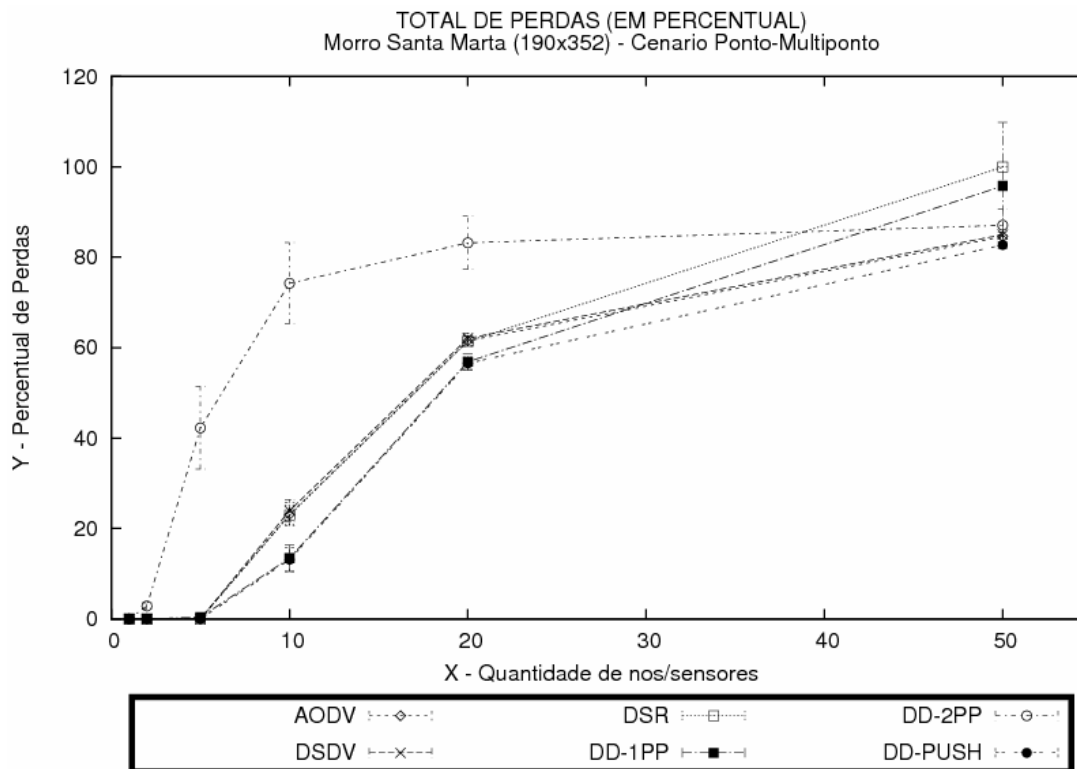


Figura 71 – Morro Santa Marta - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Percentual Total de Perdas

7.4.1.5 – Vazão

No cenário do Complexo da Maré, conforme apresentado pela Figura 72, é notória a maior capacidade de vazão dos algoritmos de difusão *Push* e 2PP, com 1,46 Mbps e 1,18 Mbps, respectivamente. Entre os protocolos para redes *ad hoc*, o DSDV (0,35 Mbps) e AODV (0,34 Mbps) apresentaram vazão superior ao protocolo DSR (0,27 Mbps).

O comportamento do algoritmo de difusão *Push* do protocolo *Directed Diffusion* corrobora as afirmativas de [Silva et al. 2004a]. Os referidos autores afirmam que o algoritmo de difusão *Push* é indicado para redes com muitos sensores sorvedouros (*data sink*), ou seja, sensores que desejam receber dados, e com poucos sensores fonte (*data source*), ou seja, sensores produtores de dados. Essa descrição se encaixa perfeitamente no modelo de tráfego Ponto-Multiponto. Além disso, a capacidade de armazenamento de dados em sensores intermediários e de agregação de dados dos algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* reduz a necessidade e a quantidade de transmissões.

A capacidade do algoritmo de difusão 2PP do protocolo *Directed Diffusion* de utilizar caminhos diferentes na comunicação de um ponto de acesso para um nó e deste nó para o ponto de acesso, possibilita o uso mais racional dos recursos da rede. O cenário do Complexo da Maré, por dispor de uma área geográfica ampla, favorece o algoritmo de difusão 2PP. Já o algoritmo de difusão 1PP, por estabelecer um único caminho para a comunicação nos dois sentidos, não é capaz de aproveitar melhor os recursos existentes na rede.

A perda por congestionamento, apresentada anteriormente pela Figura 66, explica a baixa capacidade de vazão dos protocolos para redes *ad hoc* neste cenário.

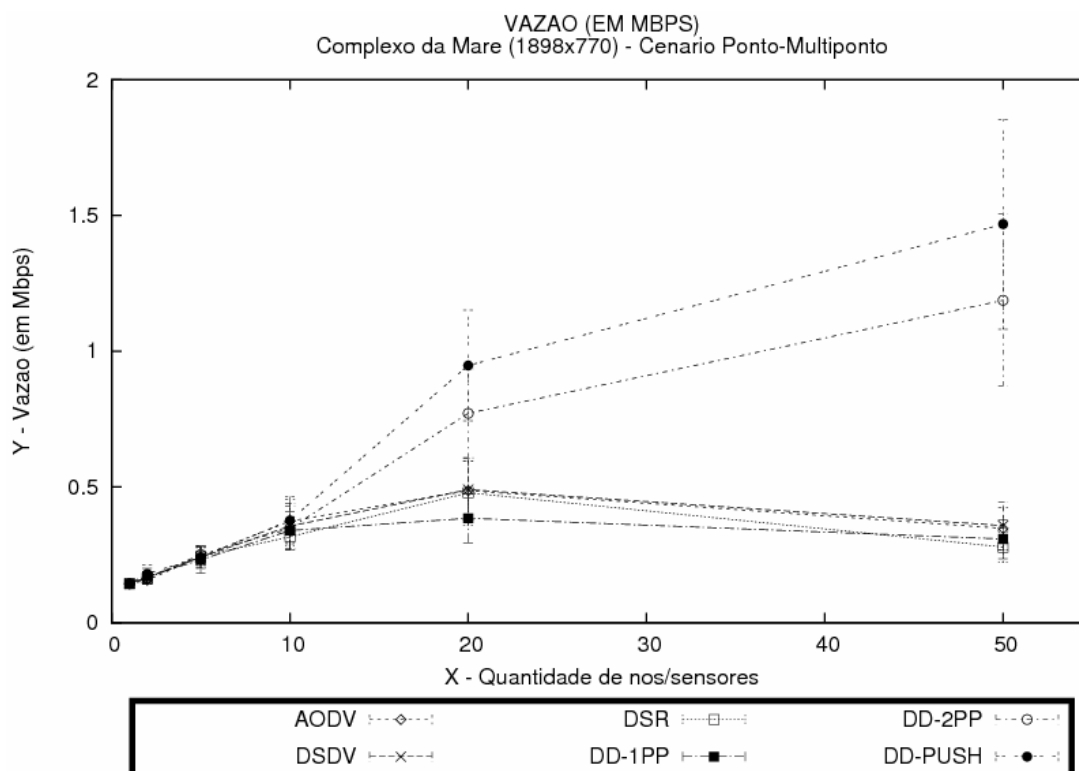


Figura 72 – Complexo da Maré - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Vazão

Nos cenários do Morro do Adeus e do Piancó e do Morro Santa Marta, o algoritmo de difusão *Push* manteve o mesmo comportamento analisado no cenário anterior, conforme demonstrado na Figura 73 e na Figura 74. Já o algoritmo de difusão 2PP, por dispor de duas fases de mensagens exploratórias enviadas por inundação, não conseguiu manter o mesmo desempenho em função da redução da área geográfica e da maior densidade. Em contrapartida, o algoritmo de difusão 1PP, por dispor de uma única fase de envio de mensagens exploratória, passou a apresentar um melhor comportamento.

Entre os protocolos para redes *ad hoc*, os protocolos AODV e DSDV apresentaram resultados praticamente idênticos nos cenários do Morro do Adeus e do Piancó e do Morro Santa Marta. Já o protocolo DSR manteve praticamente a mesma vazão dos protocolos AODV e DSDV até as simulações com 20 nós. A partir deste ponto, o protocolo DSR apresentou uma capacidade de vazão inferior, principalmente no cenário do Morro do Adeus e do Piancó. Esse resultado está associado à ocorrência significativa de colisões do protocolo DSR, conforme pode ser observado na Figura 64.

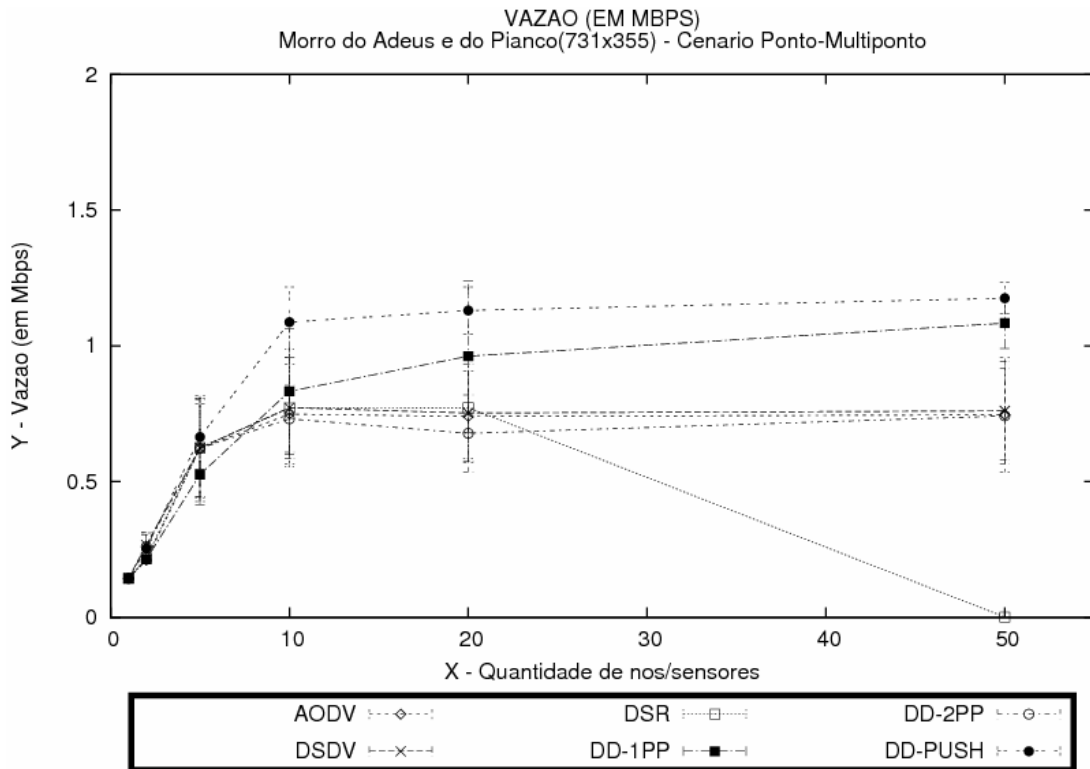


Figura 73 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Vazão

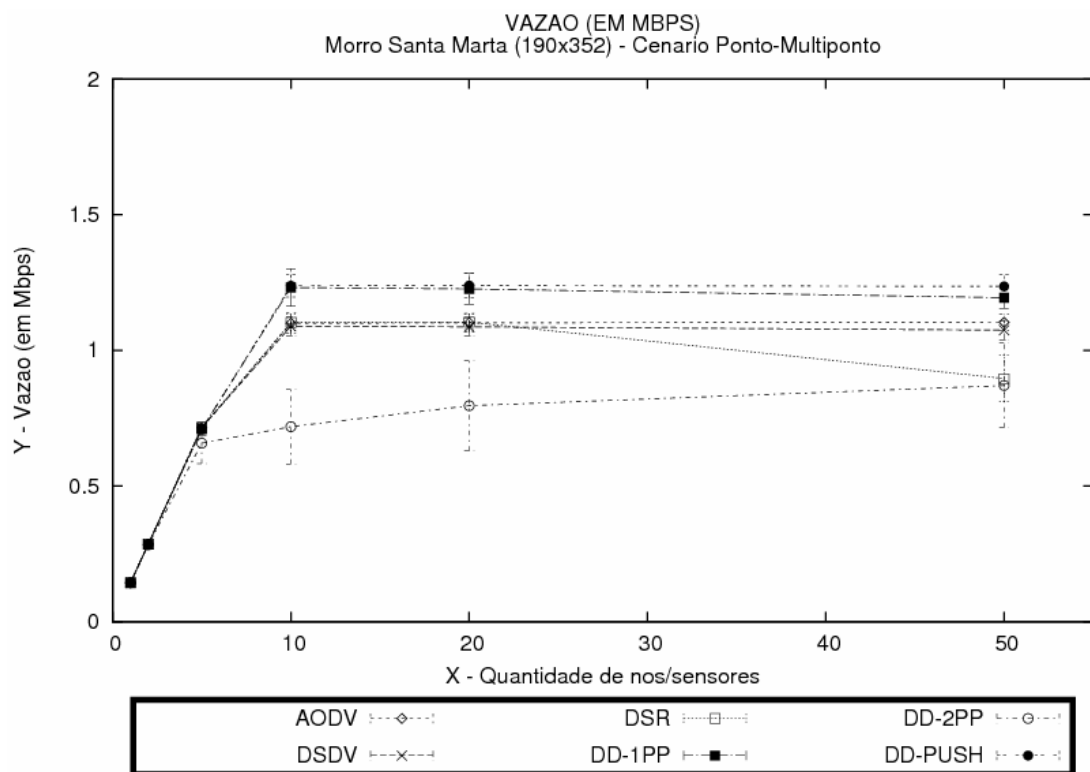


Figura 74 – Morro Santa Marta - Cenário Ponto-Multiponto - Métrica: Vazão

7.4.2 – Multiponto-Ponto

No cenário Multiponto-Ponto, os nós da rede (pontos de presença) enviam n fluxos em *unicast* para o ponto de acesso em cada uma das topologias criadas. As mesmas métricas de atraso, vazão e percentual de perdas são analisadas nas subseções a seguir.

O cenário Multiponto-Ponto apresenta uma grande concentração de mensagens transmitidas dos inúmeros nós da rede com destino exclusivo ao ponto de acesso, que em todos os cenários avaliados é único. As mensagens são retransmitidas pelos nós intermediários até que alcançam os nós que encontram-se a 1 salto (*hop*) do ponto de acesso. A partir deste ponto, os nós posicionados a 1 salto (*hop*) iniciam o processo de disseminação das mensagens com destino ao ponto de acesso. Neste caso, haverá disputa entre todos esses nós para obter acesso ao meio de transmissão, implicando um aumento no número de colisões na camada MAC.

O novo paradigma proposto em [Estrin et al. 1999, Intanagonwiwat et al. 2000] ratifica a aplicabilidade de redes de sensores em cenários Multiponto-Ponto, onde os sensores fonte (nós ou pontos de presença) enviam, periodicamente, dados para o sensor sorvedouro (ponto de acesso). O uso de protocolos de roteamento para redes de sensores, cujo roteamento é centrado em dados, diferentemente das redes tradicionais cujo roteamento é centrado em endereços, e a capacidade de agregação de dados implementada em todos os sensores (nós) da rede reforça o paradigma descrito. Ou seja, de forma geral, o cenário Multiponto-Ponto favorece o uso de protocolos para redes de sensores. Para complementar, os resultados apresentados nesta subseção corroboram estas afirmativas.

7.4.2.1 – Atraso

No cenário Complexo da Maré, conforme demonstrado pela Figura 75, os algoritmos de difusão para redes de sensores apresentaram um atraso inferior ao atraso apresentado pelos protocolos para redes *ad hoc*. Conforme dito anteriormente, o modelo de tráfego Multiponto-Ponto favorece o uso de protocolos para redes de sensores.

O algoritmo de difusão 2PP aparece em destaque, com atraso registrado de 0,670 segundo nas simulações com 50 nós. Neste cenário, a capacidade de estabelecer gradientes diferenciados para o tráfego de dados e de controle do algoritmo de difusão 2PP influencia de forma positiva no aproveitamento dos recursos da rede e a fase adicional não provocou um

maior atraso. Já para os algoritmos de difusão 1PP e *Push*, o atraso calculado foi, respectivamente, de 0,735 segundo e 0,738 segundo. Nas demais simulações, o algoritmo de difusão *Push* apresentou o menor atraso entre todos os protocolos analisados.

Em relação aos protocolos para redes *ad hoc*, o comportamento apresentado pelo protocolo DSR era, de fato, esperado, pois o protocolo DSR atua de forma reativa. De acordo com [Perkins et al. 2001], o efeito produzido pelo armazenamento de rotas no *route cache* do protocolo DSR surte efeito até um limite, dependendo da topologia da rede. Após este limite o protocolo DSR passa a apresentar resultados inferiores. Além disso, o aproveitamento de rotas desatualizadas no *root cache* pelo protocolo DSR implica o estabelecimento de rotas ineficientes. [Jiang e Garcia-Luna-Aceves 2001] relatam, ainda, que o protocolo DSR envia uma quantidade significativa de pacotes de controle em simulações com muitos fluxos de dados. O protocolo DSDV, por atuar de forma pró-ativa, mantém em todos os nós da rede rotas para o ponto de acesso, minimizando o atraso para envio das mensagens. Os resultados comentados encontram-se disponíveis na Figura 75.

Entre os protocolos para redes *ad hoc*, o protocolo DSDV exibiu o menor atraso nas simulações com 50 nós, com 1,002 segundo. Já para os protocolos AODV e DSR, o atraso calculado foi de 1,122 segundo e 1,162 segundo, respectivamente.

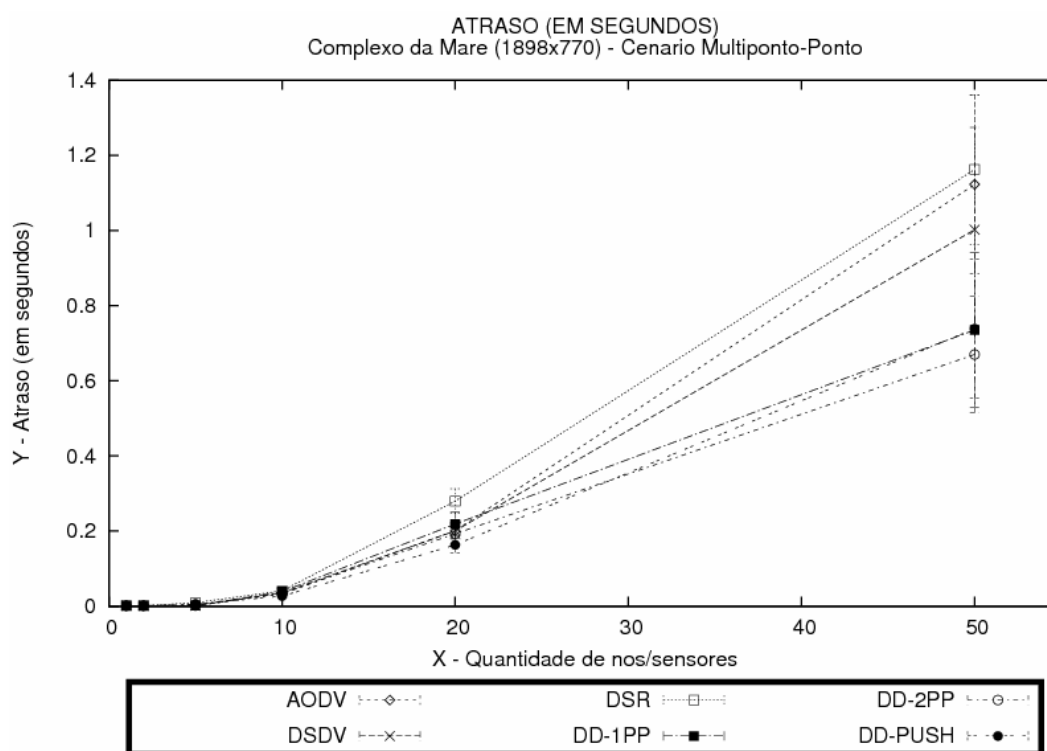


Figura 75 – Complexo da Maré - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Atraso

Como os valores obtidos na Figura 75 (Complexo da Maré) encontram-se em um patamar muito inferior aos valores obtidos na Figura 76 (Morro do Adeus e Piancó) e na Figura 77 (Morro Santa Marta), a escala daquela figura não foi modificada.

No cenário do Morro do Adeus e do Piancó, conforme exibido pela Figura 76, os protocolos para redes de sensores voltaram a apresentar os melhores resultados, com o menor atraso registrado pelo algoritmo de difusão *Push*.

Os algoritmos de difusão *Push*, 2PP e 1PP obtiveram resultados bastante similares durante todas as simulações neste cenário. Nas simulações mais estressantes, onde foram utilizados 50 nós transmitindo simultaneamente, o atraso calculado dos algoritmos de difusão *Push*, 2PP e 1PP foi, respectivamente, 1,893 segundo, 2,017 segundos e 2,241 segundos.

Entre os protocolos para redes *ad hoc*, o protocolo DSDV apresentou o menor atraso em todas as simulações, o que era esperado. Com 50 nós, o atraso do protocolo DSDV foi de 2,389 segundos e o atraso dos protocolos AODV e DSR, nas mesmas condições, foi de 5,005 segundos e 2,883 segundos, respectivamente. [Perkins et al. 2001] observaram que o atraso elevado do protocolo AODV, identificado na Figura 76, ocorre em função do alto nível de congestionamento da rede. Nas simulações com 50 nós, o protocolo AODV enviou uma média de 5.180,18 mensagens (RREQ e RREP) por segundo, enquanto que o protocolo DSR enviou, em média, 189,90 mensagens por segundo. Cabe ressaltar que os autores descrevem inúmeras críticas ao protocolo AODV, tais como:

- Não dispõe de mecanismos que permitam a implementação de controle de tráfego, de forma a efetuar uma distribuição eficiente dos fluxos de dados;
- Não implementa um mecanismo de roteamento baseado na fonte (*source routing*), que possibilitaria o aprendizado de mais rotas;
- Pela incapacidade de aprender novas rotas “escutando” a rede em modo promíscuo;
- Pela inexistência de rotas alternativas em função dos nós de destino no protocolo AODV enviarem uma mensagem RREP (*Route Reply*) somente ao primeiro RREQ (*Route Request*) recebido;
- Entre outras.

De acordo com [Perkins et al. 2001], a concentração do tráfego com o protocolo AODV ocorre com menos frequência em redes com alta mobilidade, pois a própria

movibilidade dos nós provoca, automaticamente, uma distribuição do tráfego. Embora nas simulações realizadas pelos autores o tráfego seja bastante inferior (2 a 4 pacotes por segundo) às simulações realizadas nesta dissertação (93,75 pacotes por segundo), o problema descrito pelos autores se repete no cenário Multiponto-Ponto.

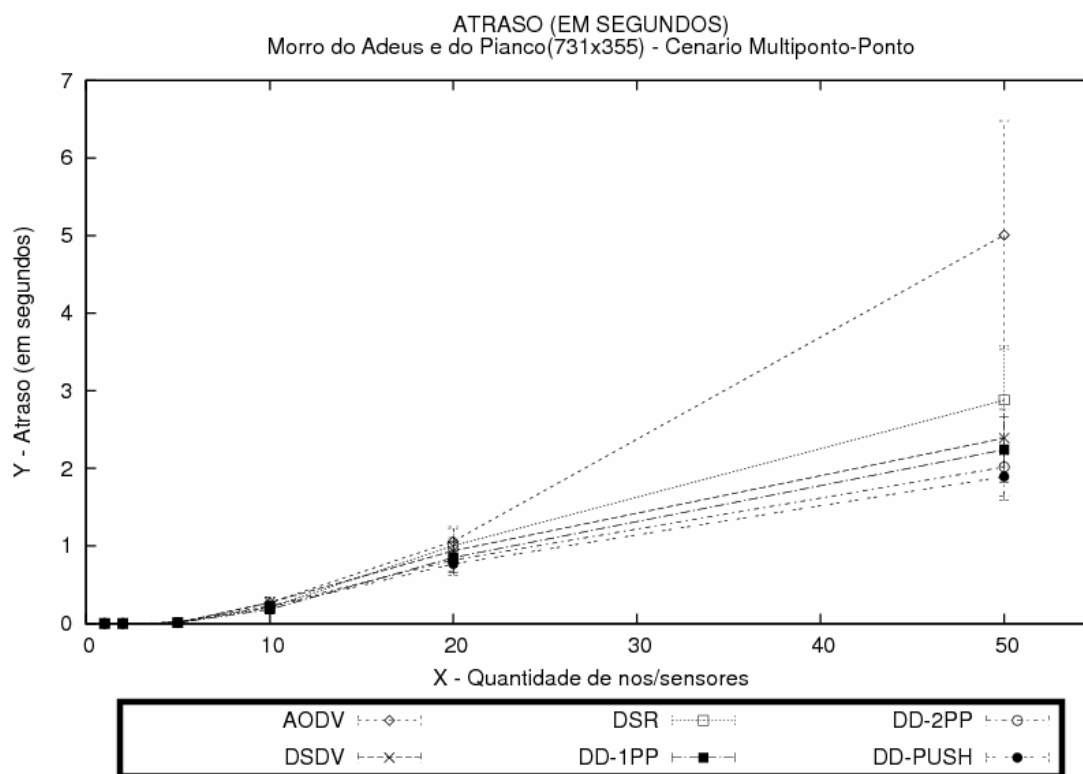


Figura 76 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Atraso

No cenário do Morro Santa Marta, cujos resultados encontram-se representados pela Figura 77, novamente os algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* apresentaram melhor resultado que os protocolos para redes *ad hoc*. O algoritmo de difusão 2PP apresentou o melhor resultado entre todos os protocolos avaliados, com atraso de 2,354 segundos, nas simulações com 50 nós. Já os algoritmos de difusão 1PP e *Push* apresentaram atraso de 3,032 segundos e 2,545 segundos, respectivamente.

Entre os protocolos para redes *ad hoc*, os resultados foram praticamente idênticos, com o protocolo AODV apresentando um atraso um pouco inferior ao atraso dos protocolos DSDV e DSR. O atraso calculado dos protocolos AODV, DSR e DSDV foi, respectivamente, de 3,271 segundos, 3,413 segundos e de 3,453 segundos.

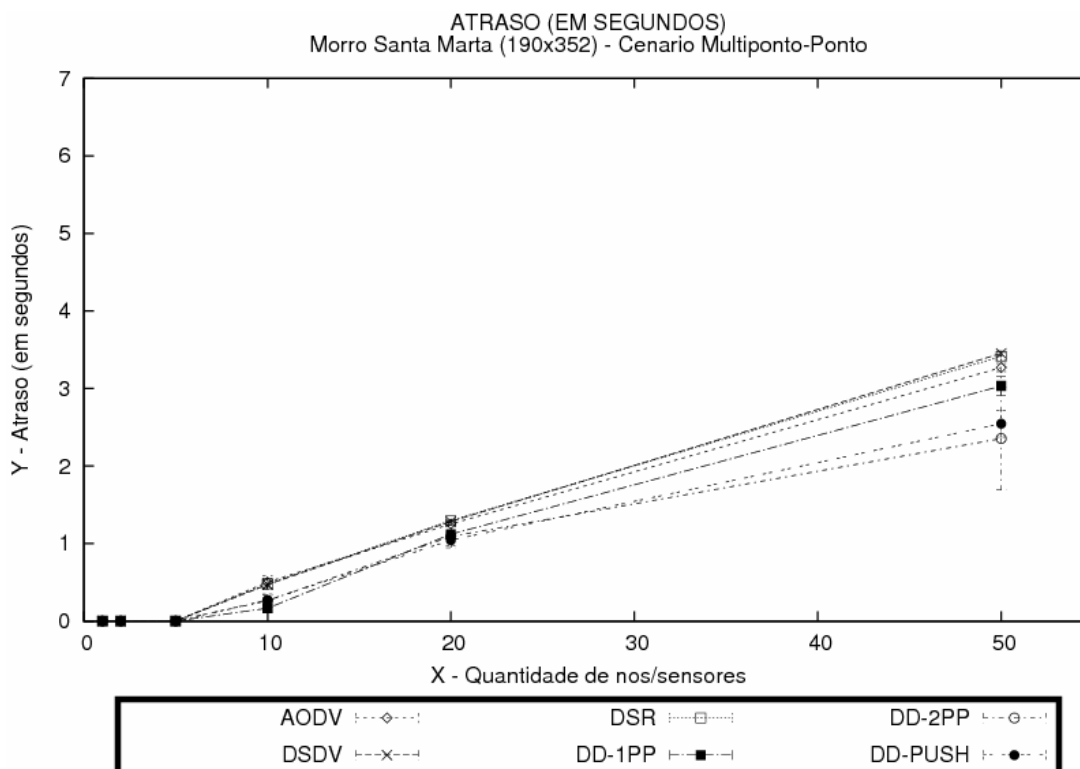


Figura 77 – Morro Santa Marta - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Atrasso

7.4.2.2 – Percentual de Colisões

Na avaliação do percentual de colisões na camada MAC do cenário do Complexo do Alemão, representado pela Figura 78, os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push* do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores apresentaram uma quantidade de colisões na camada MAC superior aos protocolos AODV, DSDV e DSR para redes *ad hoc*.

Conforme descrito na subseção 7.4.1.2 – Percentual de Colisões, [Figueiredo et al. 2004] e [Nakamura et al. 2004] ressaltam que o protocolo *Directed Diffusion* busca sempre identificar o melhor caminho entre os nós (sensores fonte) e o ponto de acesso (sensor sorvedouro). O ponto de acesso recebe, então, dados de múltiplos caminhos, com diferentes frequências (taxas) de entrega e reforça o melhor caminho. Caso o melhor caminho venha a falhar, um outro caminho alternativo é selecionado através do envio de mensagem de reforço e a frequência (taxa) de envio dos dados é aumentada gradativamente. Esta abordagem implica o envio de mensagens em difusão, produzindo uma inundação controlada. O uso do protocolo *Directed Diffusion* associado ao uso do protocolo MAC IEEE 802.11 (CSMA/CA - *Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance*) provoca um aumento na quantidade de colisões quando o número de fontes é elevado, até que se estabeleça o melhor caminho. O

protocolo *Directed Diffusion* não consegue estabelecer as rotas, em função da perda das mensagens de reforço devido à ocorrência de colisões na camada MAC, resultando em um tráfego ainda maior. Através da Figura 78, podemos observar este comportamento principalmente nos algoritmos de difusão 1PP e 2PP, em função do envio de uma maior quantidade de mensagens em difusão.

A quantidade de colisões na camada MAC produzida pelo algoritmo de difusão 2PP foi superior à quantidade de colisões na camada MAC do algoritmo 1PP. Este fato é esperado, em função do algoritmo de difusão 2PP dispor de duas mensagens transmitidas por inundação, enquanto que o algoritmo 1PP dispõe de apenas uma. Além disso, os nós executando o algoritmo 2PP enviam, periodicamente, mensagens *exploratory data*, com o intuito de ajustar os gradientes. Estas mensagens são enviadas devido a alterações que possam ocorrer na topologia da rede, seja por mobilidade de sensores, seja por perda de alimentação, perda de conectividade etc.

Entre os protocolos para redes *ad hoc*, o protocolo AODV voltou a apresentar um desempenho ruim nas simulações com 50 nós. [Perkins et al. 2001] observaram que o percentual de colisões na camada MAC elevado do protocolo AODV, identificado através da Figura 78, ocorre em função do alto nível de congestionamento da rede, ocasionado por colisões na camada MAC e pela imensa quantidade de mensagens de controle. Entre todos os protocolos analisados, o protocolo DSR apresentou o melhor resultado, com percentual de colisões na camada MAC de 7,66% e o protocolo AODV o pior resultado, com 14,75%.

Vale a pena ressaltar que os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push* mantiveram o percentual de colisões na camada MAC com 20 e 50 nós praticamente estável. Já o percentual de colisões na camada MAC dos protocolos de roteamento para redes *ad hoc* AODV, DSDV e DSR sofreu um incremento substancial.

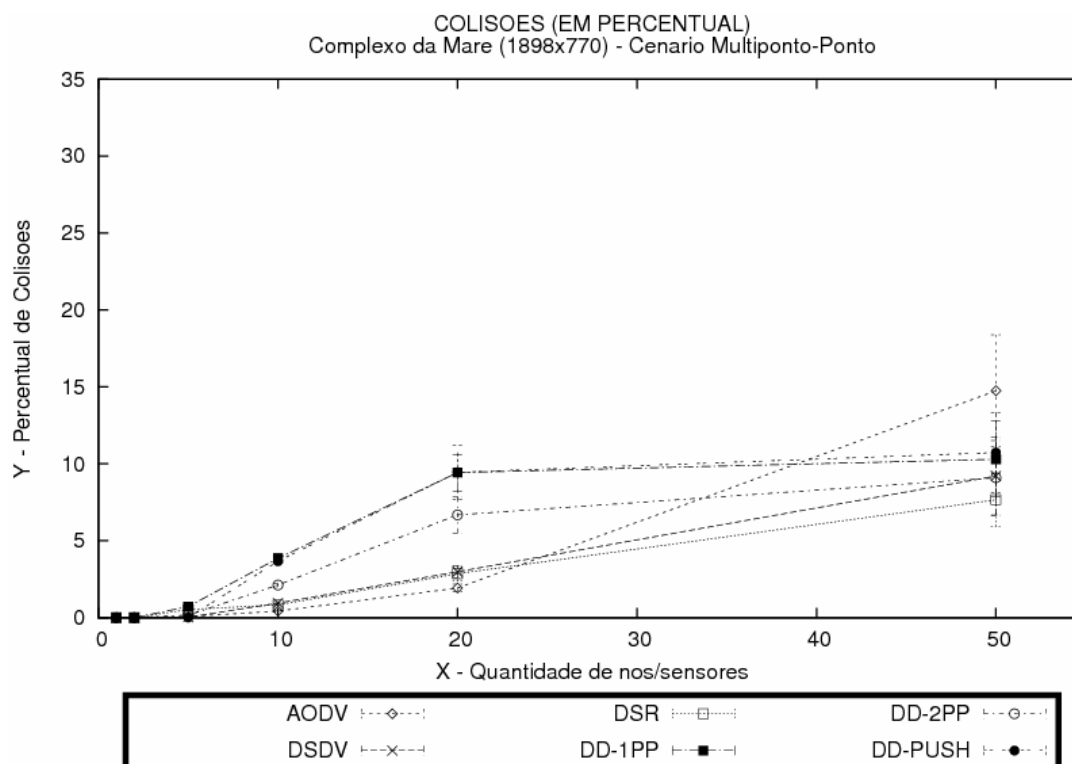


Figura 78 – Complexo da Maré - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Colisões

A Figura 79 apresenta o percentual de colisões na camada MAC no Morro do Adeus e do Piancó. Neste cenário, o protocolo AODV voltou a apresentar, nas simulações com 50 nós, um percentual de colisões na camada MAC bem superior ao percentual de colisões na camada MAC dos demais protocolos analisados. Este problema foi observado por [Perkins et al. 2001] e comentado na análise do percentual de colisões na camada MAC no Complexo da Maré.

Em relação aos demais protocolos, não houve nenhuma mudança extremamente significativa de comportamento. Os algoritmos de difusão para redes de sensores do protocolo *Directed Diffusion* apresentaram percentuais de colisões na camada MAC inferiores aos observados no Complexo da Maré. O algoritmo de difusão 2PP apresentou percentual de colisões na camada MAC de 7,51%, enquanto que o protocolo DSR apresentou percentual de colisão na camada MAC de 7,27%.

Como o algoritmo de difusão 2PP é capaz de estabelecer gradientes diferenciados para o tráfego de controle e para o tráfego de dados, os recursos da rede acabam sendo melhor utilizados. As principais características do protocolo DSR, tais como o fato de ser reativo, a

capacidade de “escutar” rotas em modo promíscuo e o uso da técnica de *source routing*, favoreceram o desempenho apresentado.

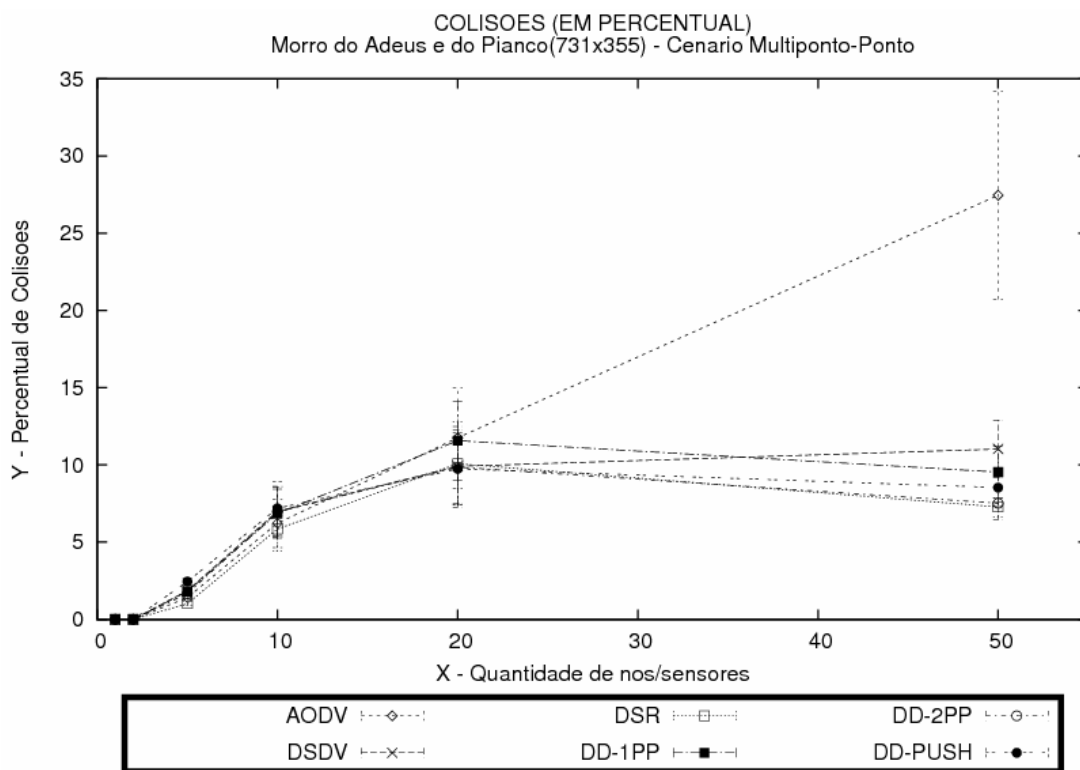


Figura 79 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Colisões

Conforme exibido na Figura 80, o protocolo DSR e o algoritmo de difusão 2PP apresentaram, novamente, os melhores resultados, sendo que desta vez o algoritmo de difusão 2PP obteve um percentual de colisão na camada MAC (9,46%) ligeiramente inferior ao valor obtido pelo protocolo DSR (9,66%). O protocolo AODV voltou a apresentar o pior desempenho com a rede mais densa.

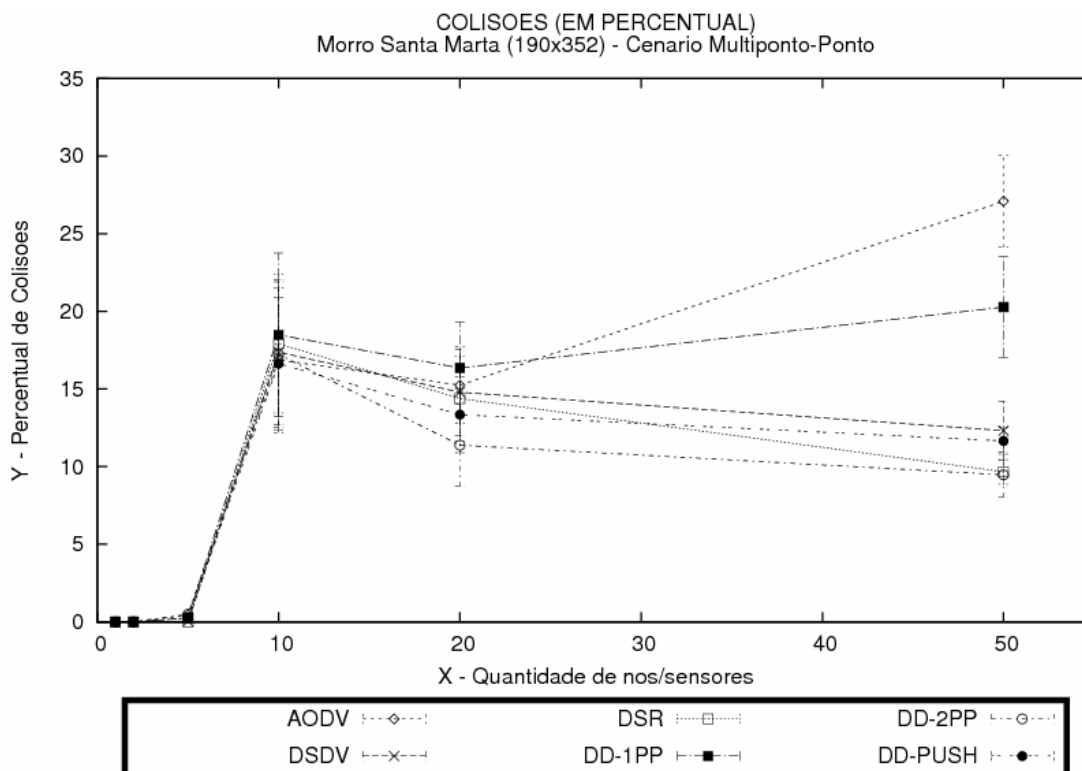


Figura 80 – Morro Santa Marta - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Colisões

7.4.2.3 – Percentual de Perda por Congestionamento

O percentual de perda por congestionamento do Complexo da Maré é exibido na Figura 81. Nas simulações até 20 nós inclusive, os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push*, além do protocolo para redes *ad hoc* DSR se destacam, apresentando valores significativamente inferiores aos apresentados pelos protocolos para redes *ad hoc* AODV e DSDV. Esses valores são explicados devido à baixa vazão apresentada pelo protocolo para redes *ad hoc* AODV e pode ser observado através da Figura 87.

No entanto, nas simulações com 50 nós, os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push* e o protocolo para redes *ad hoc* DSR exibem um percentual de perda por congestionamento expressivamente superior. Em contrapartida, o protocolo para redes *ad hoc* AODV demonstrou redução de 13,80% no percentual de perda por congestionamento nas simulações com 50 nós quando comparado com os resultados obtidos com 20 nós. No cálculo do percentual de perda por congestionamento com 50 nós do protocolo para redes *ad hoc* DSDV foi registrado um aumento de 5,14%, também quando comparado com os valores obtidos com 20 nós. O comportamento descrito pode ser observado na Figura 81.

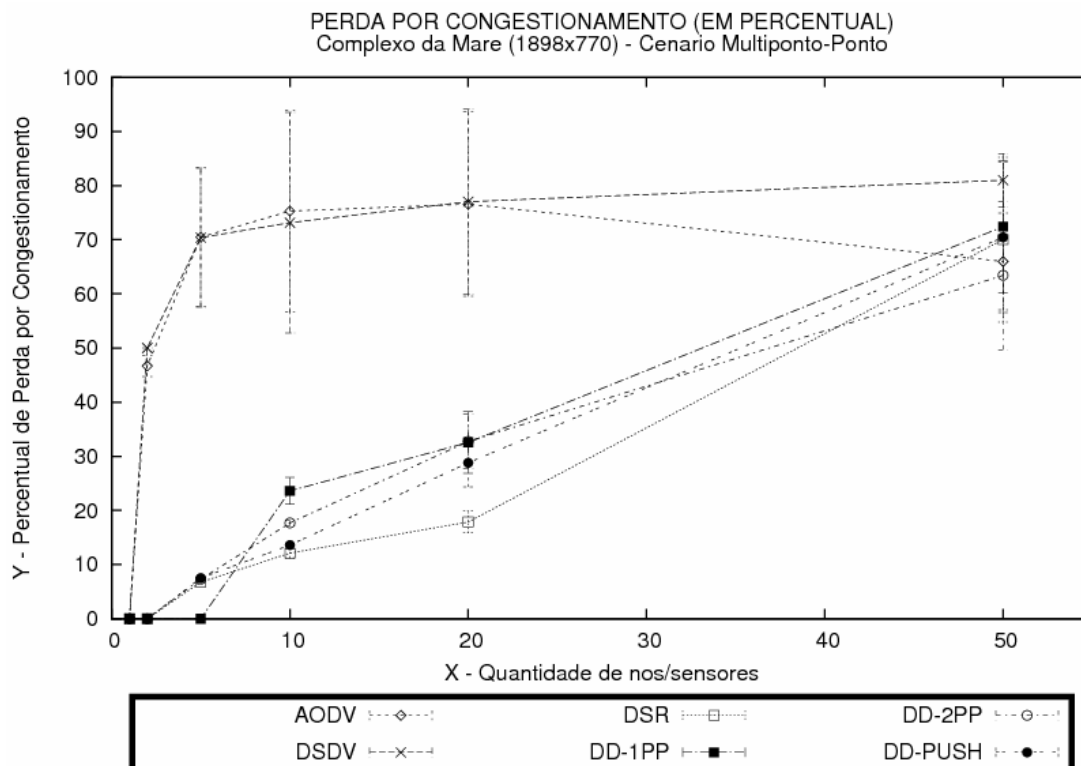


Figura 81 – Complexo da Maré - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento

A Figura 82 demonstra o percentual de perda por congestionamento do Morro do Adeus e do Piancó. Na maioria das simulações os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push*, do protocolo *Directed Diffusion* e os protocolos para redes *ad hoc* DSDV e DSR apresentam valores similares, inclusive nas simulações com 50 nós. O destaque vem do protocolo AODV, que apresenta um percentual de perda por congestionamento maior que todos os demais protocolos nas simulações com até 20 nós inclusive.

Nas simulações com 50 nós, todos os demais protocolos mantêm o mesmo padrão, aumentando o percentual de perda por congestionamento, no entanto, o protocolo para redes *ad hoc* AODV apresenta um aumento de apenas 1,95% quando comparado com o resultado da simulação com 20 nós. Esse percentual de perda por congestionamento reduzido ocorre em função da baixa vazão apresentada pelo protocolo para redes *ad hoc* AODV e pode ser observado através da Figura 88.

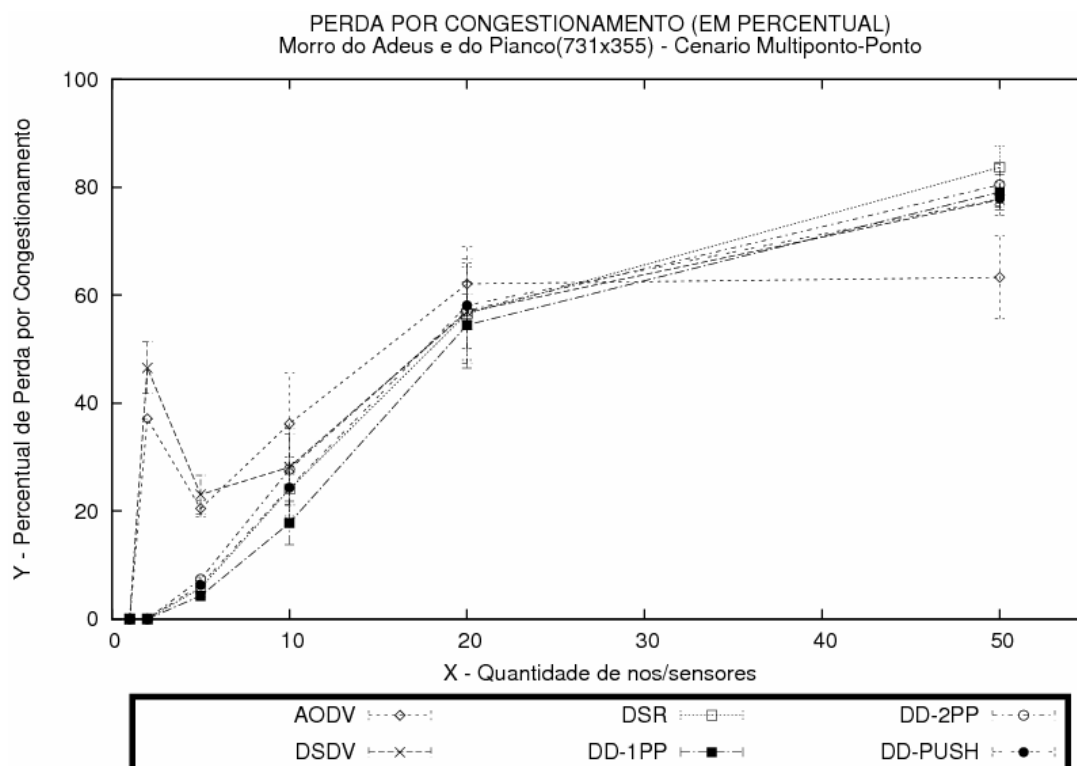


Figura 82 – Morro do Adeus e Piancó - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento

O cenário do Morro Santa Marta apresenta a particularidade que todos os nós encontram-se ao alcance direto uns dos outros, ou seja, todos os nós receptores encontram-se a um salto de distância dos nós transmissores. Em função desta particularidade, os resultados apurados do percentual de perda por congestionamento foram bastante semelhantes.

Novamente a exceção foi o protocolo para redes *ad hoc* AODV, que obteve um percentual de perda inferior a todos os demais protocolos avaliados nas simulações com 50 nós, embora nas demais simulações o algoritmo para difusão 1PP do protocolo *Directed Diffusion* tenha apresentado os menores valores. Esse reduzido percentual de perda por congestionamento ocorre em função da baixa vazão apresentada pelo protocolo para redes *ad hoc* AODV e pode ser observado na Figura 89.

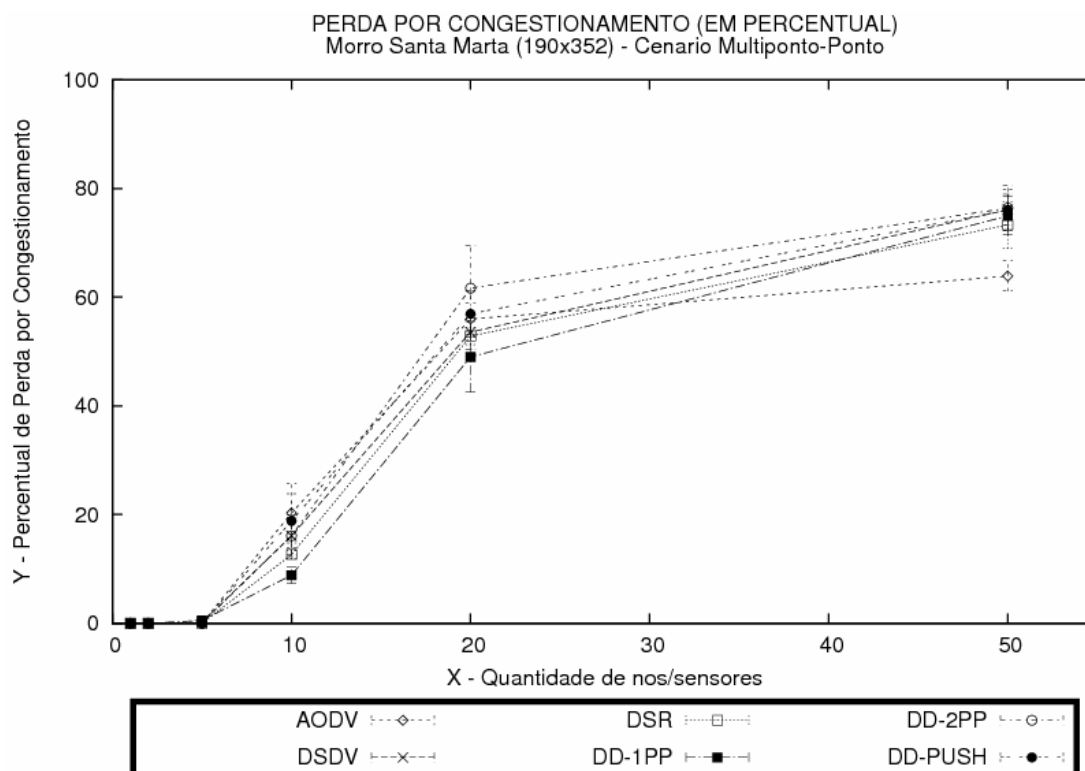


Figura 83 – Morro Santa Marta - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual de Perda por Congestionamento

7.4.2.4 – Percentual Total de Perdas

Entre os inúmeros tipos de erro na camada de rede observados nas 21.600 simulações realizadas, o principal erro foi descrito na subseção 7.4.2.3 – Percentual de Perda por Congestionamento. A ocorrência de demais erros, decorrentes da inexistência de rota (NRTE – *No Route*), TTL expirado (TTL – *Time To Live reached 0*) etc, não foi significativa ao ponto que justificasse uma abordagem específica. O percentual total de perdas de cada um dos cenários pode ser observado na Figura 84, na Figura 85 e na Figura 86.

No cenário do Complexo da Maré, os protocolos para redes de sensores apresentam um percentual de perdas bem inferior aos protocolos para redes *ad hoc*. O destaque é do algoritmo de difusão 2PP do protocolo para redes de sensores com percentual de total de perda de 73,13%.

Nos cenários do Morro do Adeus e do Piancó e do Morro Santa Marta, a diferença entre o comportamento dos protocolos para redes *ad hoc* e os algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* não foi tão evidente, a exceção do protocolo para redes *ad hoc* AODV, que teve o pior desempenho entre todos os protocolos analisados nos três cenários.

No cômputo geral, os algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores apresentaram o menor percentual de perdas em todos os cenários.

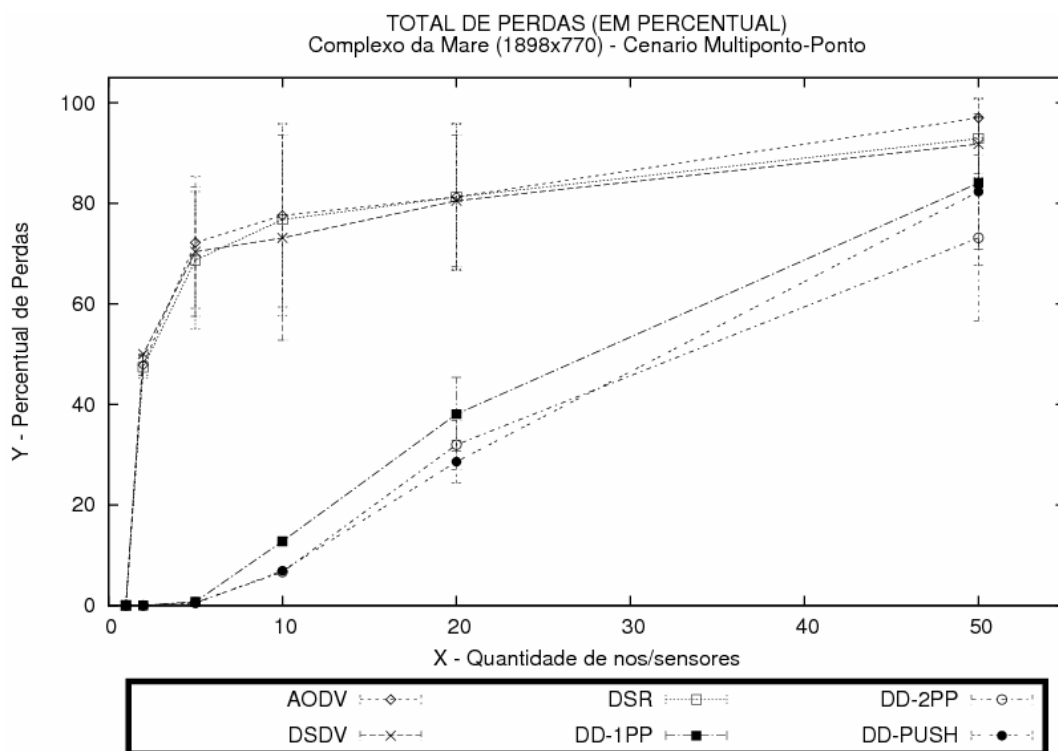


Figura 84 – Complexo da Maré - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual Total de Perdas

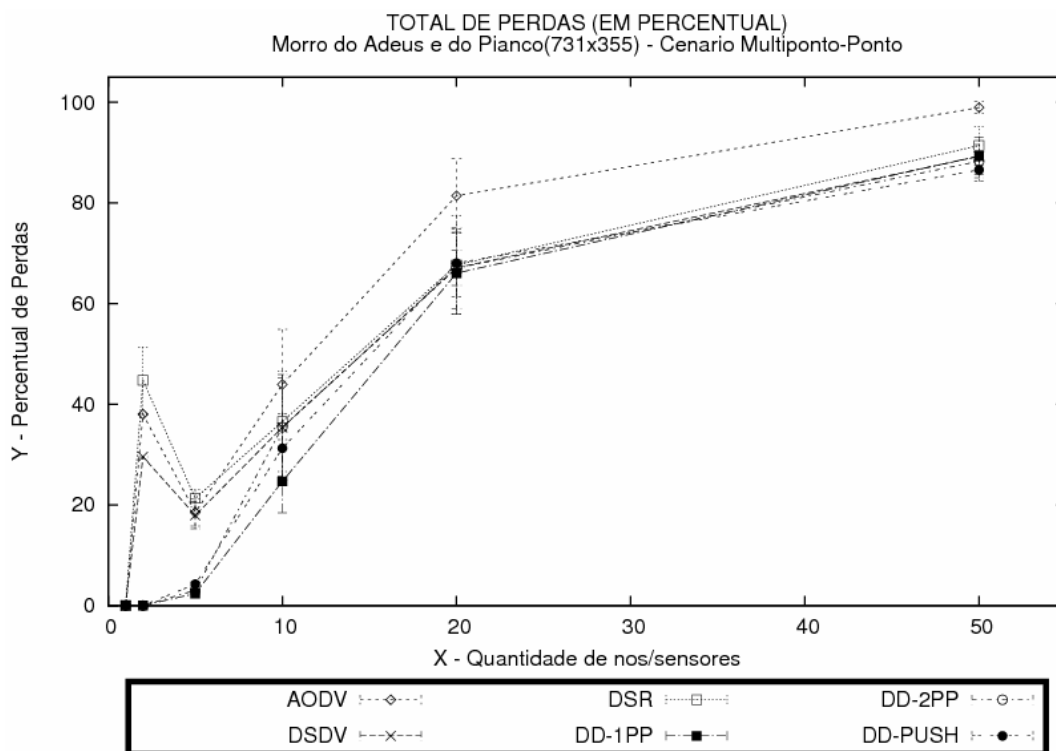


Figura 85 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual Total de Perdas

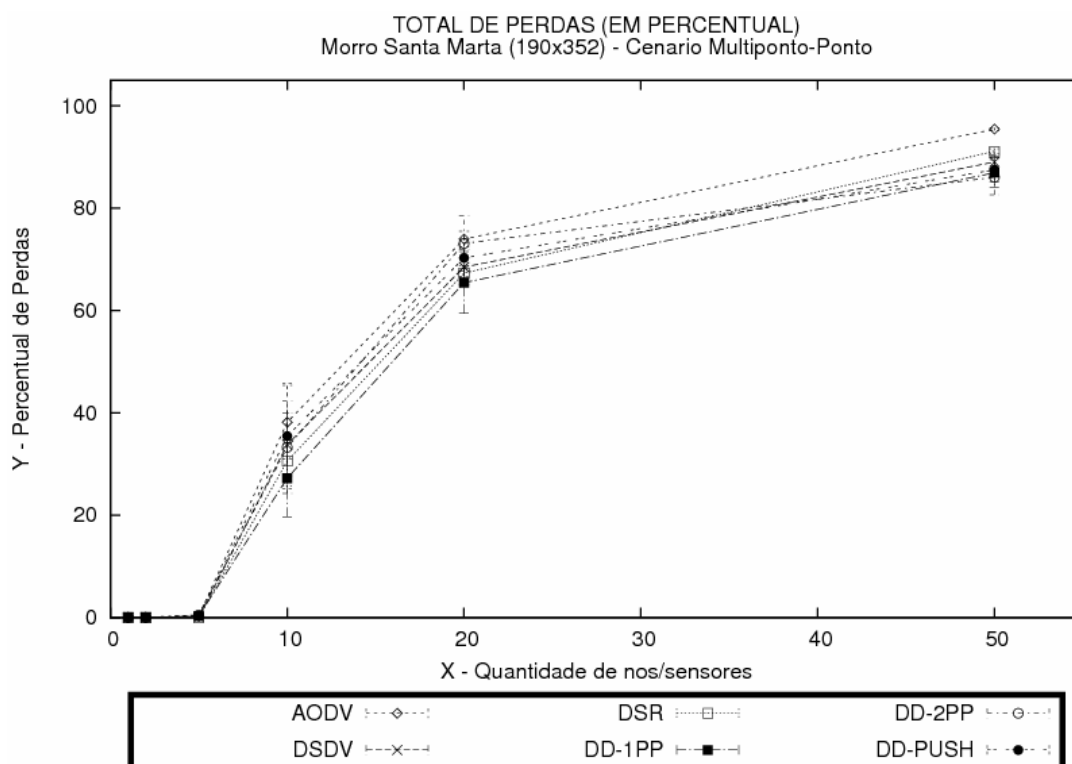


Figura 86 – Morro Santa Marta - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Percentual Total de Perdas

7.4.2.5 – Vazão

No cenário do Complexo da Maré, conforme apresentado pela Figura 87, é notória a maior capacidade de vazão dos algoritmos de difusão 2PP, 1PP e *Push*, com 0,83 Mbps, 0,76 Mbps e 0,69 Mbps, respectivamente. Entre os protocolos para redes *ad hoc*, o protocolo DSDV (0,65 Mbps) e DSR (0,56 Mbps) apresentaram vazão superior ao protocolo AODV (0,24 Mbps).

O comportamento do algoritmo de difusão 2PP do protocolo *Directed Diffusion* corrobora as afirmativas anteriores que a capacidade de estabelecer gradientes diferenciados para o tráfego de dados e de controle, em uma área geográfica ampla como o cenário do Complexo da Maré, permite que o algoritmo de difusão 2PP aproveite de forma mais adequada os recursos da rede, obtendo, com isso, uma melhor vazão. O algoritmo de difusão 1PP, por estabelecer um único caminho para a comunicação de dados e de controle, não é capaz de aproveitar de forma tão adequada os recursos existentes na rede quanto o algoritmo de difusão 2PP.

Entre os protocolos para redes *ad hoc*, os protocolos DSDV e DSR apresentaram resultados satisfatórios, embora inferiores aos resultados apurados pelos algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion*. O fraco desempenho do protocolo para redes *ad hoc* AODV deve-se, principalmente, à quantidade de mensagens de controle enviadas, principalmente nas redes mais densas. Nestas situações, quando comparado com o protocolo DSR, o protocolo AODV enviou uma quantidade de mensagens de controle mais de 27 vezes superior ao protocolo DSR.

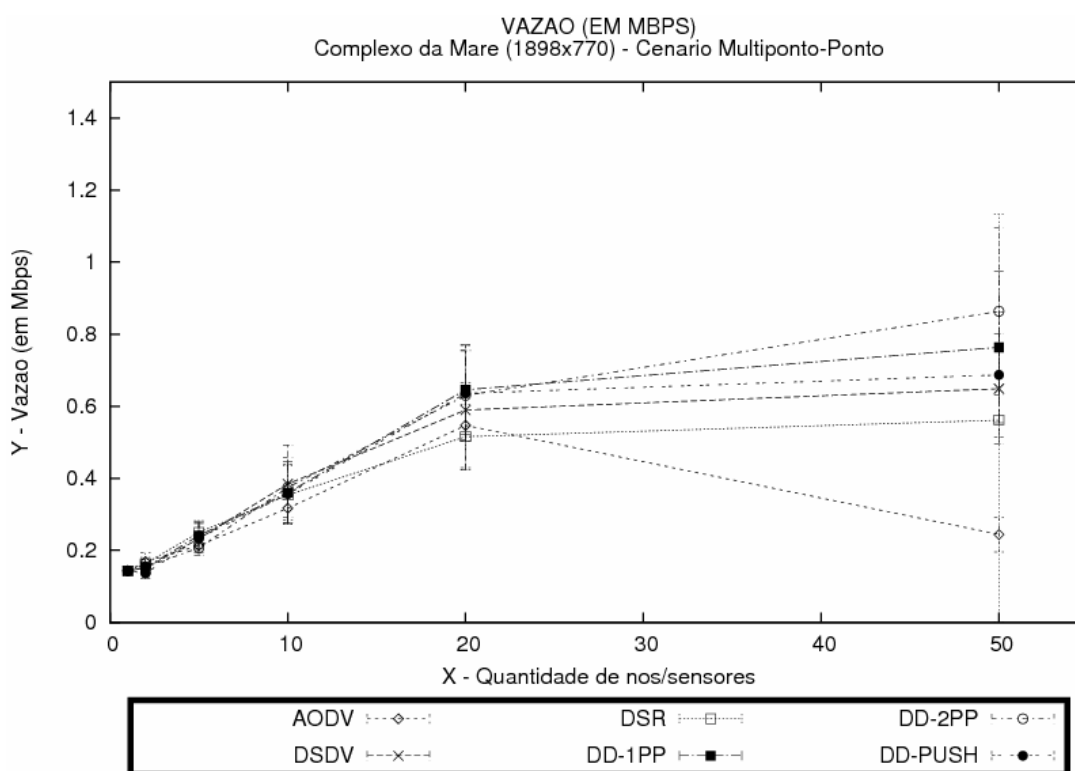


Figura 87 – Complexo da Maré - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Vazão

No cenário do Morro do Adeus e do Piancó, o algoritmo de difusão *Push* apresentou o melhor desempenho nas simulações com 50 nós, conforme demonstrado pela Figura 88. Nas demais simulações neste cenário, o algoritmo de difusão 1PP exibiu os melhores resultados.

Entre os protocolos para redes *ad hoc* o melhor desempenho foi obtido pelo protocolo DSDV. O fraco desempenho do protocolo AODV deve-se, principalmente, à quantidade de mensagens de controle enviadas pela rede.

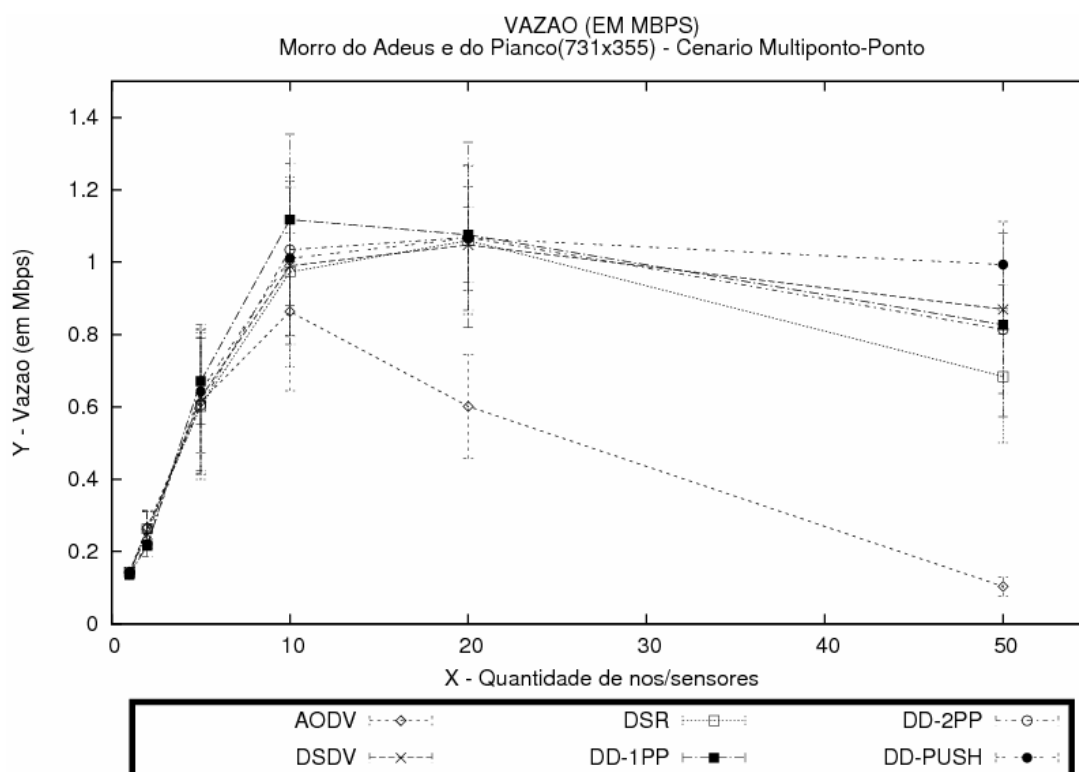


Figura 88 – Morro do Adeus e do Piancó - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Vazão

A Figura 89 apresenta o comportamento dos protocolos avaliados no cenário do Morro Santa Marta, segundo a métrica de vazão. Basicamente, a vazão apurada de todos os protocolos neste cenário não sofreu alteração drástica quando comparada com a vazão apurada no cenário do Morro do Adeus e do Piancó.

Nas simulações com até 20 nós inclusive, o algoritmo de difusão 1PP apresentou a melhor vazão, entretanto, nas simulações com 50 nós, o algoritmo de difusão *Push* apresentou vazão superior.

Entre os protocolos para redes *ad hoc*, novamente o protocolo DSDV apresentou melhor vazão, assim como novamente o protocolo AODV apresentou a pior vazão.

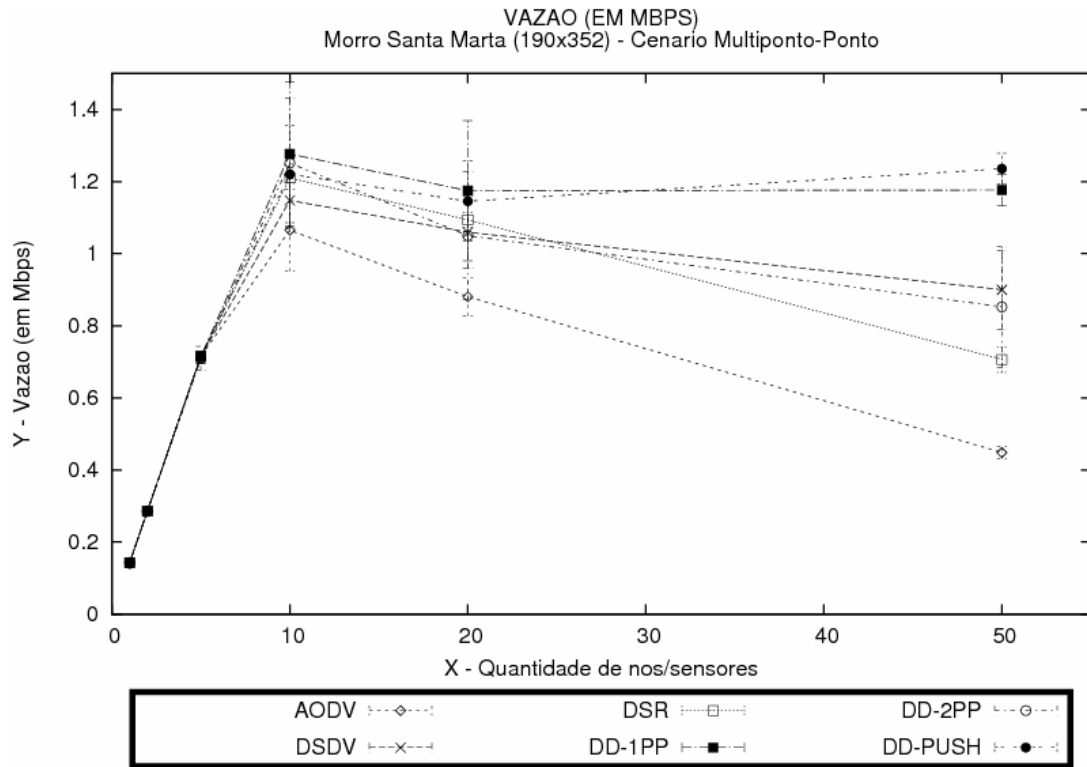


Figura 89 – Morro Santa Marta - Cenário Multiponto-Ponto - Métrica: Vazão

Capítulo 8 – Conclusão

O Governo Federal vem se esforçando para reduzir o percentual de brasileiros que sofre com o problema da exclusão social e digital através de incentivos e investimentos em vários programas de alcance diferenciado. Dentre esses projetos, dois se destacam em relação à capacidade de atingir uma quantidade significativa de brasileiros: Cidades Digitais e Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa.

Para que a população possa usufruir o projeto Cidades Digitais é imprescindível estar na área de cobertura, dispor de um microcomputador ou equipamento similar e, ainda, um meio de comunicação que permita a conexão. Nos casos das comunidades mais carentes, haverá a necessidade do governo associar o uso de Telecentros com Cidades Digitais, provendo todos os recursos necessários para o acesso, assim como treinamento. Espera-se que, com acesso à informação, a população alvo possa se tornar parte do grupo de incluídos digitais e sociais.

A implantação do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa deverá possibilitar ao governo uma maior interação com a população mais carente, seja através de programas educativos interativos ou através da oferta de novos serviços à população, além de prover o acesso à Internet. Deve-se ressaltar que o acesso à Internet, assim como os serviços interativos, requer um canal de comunicação entre o telespectador e a emissora ou provedor de conteúdo.

Torna-se imprescindível um estudo sobre alternativas de viabilidade técnica e econômica para a definição de uma infra-estrutura de comunicação para o projeto Cidades Digitais e para o Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa, de forma que os referidos projetos possam, de fato, obter a abrangência desejada e atingir as metas de redução da exclusão social e digital planejadas pelo Governo Federal.

Dentre as possíveis alternativas, as redes *ad hoc* sem fio autoconfiguráveis surgem como uma excelente alternativa para prover a infra-estrutura de comunicação necessária à implantação do projeto Cidades Digitais e do projeto Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa. Além da vantagem tecnológica óbvia de não necessitar de cabos, o custo reduzido das unidades de transmissão e recepção, a facilidade de implementação e o vasto alcance de

determinadas tecnologias são algumas das características que se encaixam nas diretrizes dos projetos destacados.

O comportamento dos protocolos para redes *ad hoc* e o comportamento dos protocolos para redes de sensores foi analisado nesta dissertação, em cenários cujo padrão de tráfego estabelecido seja aplicável ao Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa e às Cidades Digitais, mantendo-se o viés nas inclusões digital e social. Os protocolos AODV, DSDV e DSR para redes *ad hoc* e os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push* do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores foram utilizados nas simulações.

Foram realizadas 21.600 simulações utilizando o ns-2 durante 68 (sessenta e oito) dias, em cenários que mapeavam o Complexo da Maré, o Morro do Adeus e do Piancó e o Morro Santa Marta com padrões de tráfego Ponto-Multiponto e Multiponto-Ponto. As análises dos resultados obtidos nos cenários das simulações indicam as seguintes conclusões:

- Um nível de conectividade aceitável é obtido com 50 ou mais nós no Complexo da Maré (1898 x 778 metros), com 10 ou mais nós no Morro do Adeus e do Piancó (731 x 355 metros) e com qualquer quantidade de nós no Morro Santa Marta (190 x 352 metros), conforme demonstrado através da Figura 54, Figura 56 e Figura 58, respectivamente;
- No padrão de tráfego Ponto-Multiponto os algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores apresentaram, de forma genérica, um desempenho melhor que os protocolos para redes *ad hoc*, com destaque para o algoritmo de difusão *Push*. Em todos os cenários avaliados, ou seja, nos cenários do Complexo da Maré, Morro do Adeus e Piancó e Morro Santa Marta, o algoritmo de difusão *Push* apresentou o melhor desempenho nas métricas percentual total de perdas e vazão. Somente nas métricas atraso e percentual de colisões na camada MAC que os protocolos para redes *ad hoc* suplantaram os algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores, com o protocolo AODV exibindo o melhor desempenho em ambas as métricas;
- No padrão de tráfego Multiponto-Ponto os algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores apresentaram, novamente, um desempenho melhor que os protocolos para redes *ad hoc*, com destaque para os algoritmos de difusão *Push* e 2PP. No cenário do Complexo da Maré, o algoritmo de difusão 2PP

apresentou o melhor desempenho nas métricas atraso, percentual de perda por congestionamento, percentual total de perdas e vazão. Já o algoritmo de difusão *Push* exibiu o melhor desempenho nas métricas atraso, percentual total de perdas e vazão no cenário do Morro do Adeus e do Piancó, exibindo, ainda, a maior vazão no cenário do Morro Santa Marta. Os protocolos para redes *ad hoc* não conseguiram exibir, em nenhuma das métricas, resultados consistentemente melhores que os resultados dos algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push*.

Características intrínsecas aos protocolos para redes de sensores, tais como a capacidade de agregação de dados em nós intermediários e o roteamento centrado em dados, além de características próprias dos algoritmos de difusão 2PP (capacidade de estabelecer gradientes diferenciados para tráfego de dados e de controle) e *Push* (adequado para cenários com muitos nós e poucos ponto de acesso [Silva et al. 2004a]) do protocolo *Directed Diffusion* possibilitaram um desempenho superior ao desempenho apresentado pelos protocolos para redes *ad hoc*.

A única métrica em que os algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores não obteve um desempenho constantemente superior ao desempenho dos protocolos para redes *ad hoc* foi o percentual de colisões na camada MAC. Deve-se ressaltar que o padrão IEEE 802.11 [IEEE 802.11 2006], com taxa de 11 Mbps, foi escolhido como protocolo para a subcamada MAC para todas as simulações com o intuito de manter inalteradas as características das simulações, variando somente os protocolos de roteamento.

Os resultados apontam que os protocolos de roteamento para redes de sensores, por disporem de características favoráveis aos padrões de tráfego Ponto-Multiponto e Multiponto-Ponto, apresentam-se como alternativas promissoras aos protocolos de roteamento tradicionais para redes *ad hoc* nos projetos Cidades Digitais e Sistema Brasileiro de Televisão Digital Interativa.

A Tabela 10 apresenta um resumo dos resultados obtidos nas simulações, indicando o grupo de protocolos (protocolos para redes *ad hoc* ou protocolos para redes de sensores) que apresentou o melhor resultado nas métricas avaliadas, com os padrões de tráfego ponto-multiponto e multiponto-ponto, nos cenários do Complexo da Maré, Morro do Adeus e do Piancó e Morro Santa Marta com 50 nós.

Tabela 10 – Resumo das Simulações

	COMPLEXO DA MARÉ				MORRO DO ADEUS E DO PIANCÓ				MORRO SANTA MARTA			
	P-MP		MP-P		P-MP		MP-P		P-MP		MP-P	
	AD HOC	SEN-SOR	AD HOC	SEN-SOR	AD HOC	SEN-SOR	AD HOC	SEN-SOR	AD HOC	SEN-SOR	AD HOC	SEN-SOR
ATRASSO (EM SEGUNDOS)	AD HOC		SENSORES		AD HOC		SENSORES		SENSORES		SENSORES	
	0,226 DSDV	0,439 1PP	1,002 DSDV	0,670 2PP	0,101 DSDV	0,147 1PP	2,389 DSDV	1,893 PUSH	0,068 AODV	0,063 1PP	3,271 AODV	2,354 2PP
PERCENTUAL DE COLISÕES	AD HOC		AD HOC		AD HOC		AD HOC		AD HOC		SENSORES	
	1,03 DSDV	5,99 PUSH	7,66 DSR	9,09 2PP	0,27 AODV	0,35 PUSH	7,27 DSR	7,51 2PP	0,00 AODV	0,12 PUSH	9,66 DSR	9,46 2PP
PERCENTUAL DE PERDA POR CONGESTIONAMENTO	SENSORES		SENSORES		AD HOC		AD HOC		SENSORES		AD HOC	
	79,09 DSR	28,18 PUSH	65,98 AODV	63,42 2PP	62,87 DSR	62,94 2PP	63,31 AODV	77,86 PUSH	72,80 DSR	64,04 2PP	63,90 AODV	74,96 1PP
PERCENTUAL DE PERDA	SENSORES		SENSORES		SENSORES		SENSORES		SENSORES		SENSORES	
	94,87 DSDV	34,22 PUSH	91,82 DSDV	73,13 2PP	89,36 DSDV	76,09 PUSH	89,24 DSDV	86,57 2PP	84,57 AODV	82,71 PUSH	89,03 DSDV	86,05 2PP
VAZÃO (EM MBPS)	SENSORES		SENSORES		SENSORES		SENSORES		SENSORES		SENSORES	
	0,357 DSDV	1,467 PUSH	0,648 DSDV	0,863 2PP	0,760 DSDV	1,175 PUSH	0,869 DSDV	0,993 PUSH	1,102 AODV	1,235 PUSH	0,899 DSDV	1,235 PUSH

Deve-se ressaltar que o melhor resultado dos protocolos para redes *ad hoc* na métrica percentual de perda por congestionamento, com o padrão de tráfego multiponto-ponto nos cenários do Morro do Adeus e do Piancó e do Morro Santa Marta deve-se, exclusivamente, aos problemas do protocolo AODV descritos por [Perkins et al. 2001] e comentados na subseção 7.4.2.1 – Atraso.

8.1 – Trabalhos Relacionados

Embora não se tenha conhecimento de algum trabalho que apresente resultados comparando os protocolos de roteamento para redes *ad hoc* com os protocolos para redes de sensores relacionados nesta dissertação e em cenários correlacionados aos projetos Cidades Digitais e Sistemas de Televisão Digital Interativa, a literatura dispõe de uma quantidade significativa de trabalhos similares, tais como:

- Em [Perkins et al. 2001] e [Das et al. 2000], os autores efetuam comparações entre os protocolos para redes *ad hoc* DSR e AODV;
- Já em [Jiang e Garcia-Luna-Aceves 2001], os autores comparam os protocolos para redes *ad hoc* AODV, DSR e STAR [Garcia-Luna-Aceves e Spohn 1999];

- [Broch et al. 1998] comparam os protocolos para redes *ad hoc* AODV, DSDV, DSR e TORA [Park e Corson 1997];
- [Lu et al. 2003b] propõem o protocolo para redes *ad hoc* CADV, comparando-o com os protocolos para redes *ad hoc* AODV e DSDV;
- [He et al. 2003] apresentam o protocolo para redes de sensores SEED e comparam seu desempenho com cinco protocolos para redes *ad hoc*, tais como AODV, DSR etc;
- Em [Tilak et al. 2002b], os autores comparam o desempenho dos protocolos para redes *ad hoc* AODV, DSDV e DSR em cenários típicos de redes de sensores;
- [Heidemann et al. 2003] comparam os algoritmos de difusão 1PP, 2PP, *Push* e *Gear* variando a quantidade de mensagens transmitidas por segundo, a quantidade de sensores sorvedouro, a quantidade de sensores fonte, etc.

8.2 – Contribuições

Esta dissertação deixa como contribuição um estudo detalhado sobre inúmeros indicadores sociais, sobre Redes *Mesh*, Cidades Digitais e sobre TV Digital. Ainda em relação ao trabalho de pesquisa, foram investigados os principais protocolos para redes *ad hoc* e para redes de sensores, com destaque para os protocolos AODV, DSDV e DSR e para os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push* do protocolo *Directed Diffusion*.

Como um dos focos deste trabalho está relacionado ao processo de inclusão social e de inclusão digital, comunidades carentes de pequena, média e grande escala foram modeladas, possibilitando a realização de simulações com os protocolos AODV, DSDV, DSR e com os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push* do protocolo *Directed Diffusion*. As simulações foram realizadas com o simulador de redes ns-2 [NS-2 2006].

Para que a realização das simulações no ns-2 fosse possível, foi necessário desenvolver um módulo que permitisse aos algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push* do protocolo *Directed Diffusion* a transmissão de dados simulando o padrão de tráfego CBR (*Constant Bit Rate*).

Os resultados obtidos através das simulações foram analisados, possibilitando avaliar a aplicabilidade dos protocolos para redes *ad hoc* e dos protocolos para redes de sensores nos cenários definidos. Entre as métricas avaliadas para computar o desempenho dos protocolos relacionados encontram-se o atraso, a vazão, métricas de perda e métricas de conectividade.

8.3 – Trabalhos Futuros

Como a única métrica em que os algoritmos de difusão do protocolo *Directed Diffusion* para redes de sensores não obteve um desempenho constantemente superior ao desempenho dos protocolos para redes *ad hoc* foi o percentual de colisões na camada MAC, estima-se que a avaliação de protocolos de controle de acesso ao meio, tais como S-MAC [Ye et al. 2002], B-MAC [Polastre et al. 2004], TRAMA [Rajendran et al. 2003], MMF-TDMA [Sridharan e Krishnamachari 2004], entre outros, possa ampliar o desempenho dos protocolos para redes de sensores sobre os protocolos para redes *ad hoc* mantendo-se os padrões de tráfego Ponto-Multiponto e Multiponto-Ponto.

A investigação de outros protocolos para redes de sensores, tais como SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*) [Heinzelman et al. 1999], SAR (*Sequential Assignment Routing*) [Sohrabi et al. 2000], LEACH [Heinzelman et al. 2000], TEEN [Manjeshwar e Agrawal 2001], GeoMote [Broadwell et al. 2004], GPSR [Karp e Kung 2000], GEAR [Yu et al. 2001] etc.

O desenvolvimento de um módulo para o ns-2 que possibilite a avaliação de tráfego TCP e, conseqüentemente, dos protocolos HTTP e FTP, sobre os algoritmos de difusão 1PP, 2PP e *Push* permitirá uma avaliação mais precisa do cenário do projeto Cidades Digitais. Além disso, a implementação de um modelo de tráfego que permita a simulação de uma rede *full mesh* com tráfego Ponto-Multiponto e Multiponto-Ponto simultâneos possibilitaria a avaliação de serviços diferenciados, tais como *peer-to-peer* e VoIP (*Voice over IP*).

Bibliografia

- [Abelém et al., 2005] Abelém, A., Câmara, M., Stanton, M. Alternatives for community metropolitan networks for the major cities of the Amazon region of Brazil: the case of Belém. In: 2nd International Conference on Broadband Networks, Outubro de 2005.
- [Abolhasan et al, 2004] Abolhasan, M., Wysocki, T, Dutkiewicz, E. A review of routing protocols for mobile ad hoc networks. In: Ad Hoc Networks, ed. Elsevier Science Publishers, v. 2, n. 1, p. 1-22, Janeiro de 2004.
- [Akyildiz et al., 2002a] Akyildiz, I., Su, W., Snkarasubramaniam, Y., Cayirci, E. Wireless sensor networks: a survey. In: Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, ed. Elsevier Science Publishers, v. 38, i. 4, p. 393-422, Março de 2002.
- [Akyildiz et al., 2002b] Akyildiz, I., Su, W., Snkarasubramaniam, Y., Cayirci, E. A Survey on Sensor Networks. In: IEEE Communications Magazine, p. 102-114, Agosto de 2002.
- [Akyildiz et al., 2005] Akyildiz, I., Wang, X., Wang, W. Wireless Mesh Networks: a Survey. In: Computer Networks, ed. Elsevier Science Publishers, v. 47, n. 4, p. 445-487, Janeiro de 2005.
- [Akyildiz e Wang, 2005] Akyildiz, I., Wang, X. A Survey on Wireless Mesh Networks. In: IEEE Communications Magazine, v. 43, i. 9, p. S23-S30, Setembro de 2005.
- [Albuquerque et al., 2006] Albuquerque, C., Saade, D., Leite, J., Magalhães, L, et al. Rede Mesh de Acesso Universitario Faixa Larga Sem Fio. Disponível em: <http://mesh.ic.uff.br>, acessado em Setembro de 2006.
- [ANATEL, 2003] ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. GT PowerLine - Power Line Communication ou Broadband Over Power Lines. Disponível em: http://www.anatel.gov.br/Tools/frame.asp?link=/comites_comissoes/cbc/cbc7/documentos_apoio/anexo_a_tutorial_plc_aptel.pdf, acessado em Setembro de 2006.
- [ATSC, 2006] ATSC, Inc.. Advanced Television Systems Committee. Disponível em: <http://www.atsc.org>, acessado em Agosto de 2006.
- [Bastos, 2005] Bastos, C. TV Digital Terrestre – Modelos, Padrões e Produtos. In: I Workshop de TV Digital do 23o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Maio de 2005.
- [Batista, 2005] Batista, J.C. Efeitos Econômicos, Tecnológicos e Sociais da TV Digital no Brasil: alternativas para a transmissão terrestre. In: Instituto de Economia da UFRJ, 2005.
- [Becker e Montez, 2004] Becker, V., Montez, C. In: TV Digital Interativa: Conceitos, Desafios e Perspectivas para o Brasil, Florianópolis: I2TV, 2004.
- [Bicket et al., 2005] Bicket, J., Aguayo, D., Biswas, S., Morris, R. Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network. In: Mobicom 2005. Disponível em: <http://pdos.csail.mit.edu/roofnet>, acessado em Setembro de 2006.
- [BME, 2006] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco Multidimensional de Estatísticas. Disponível em: <https://www.bme.ibge.gov.br/>, acessado em Agosto de 2006.
- [Bolaño e Vieira, 2004] Bolaño, C., Vieira, V. TV digital no Brasil e no mundo: estado da arte. Revista Electrónica Internacional de Economía Política de las Tecnologías de la Información y Comunicación, São Cristovão, v. 6, n. 2, p. 102-138, Maio de 2004.
- [Broadwell et al., 2004] Broadwell, P., Polastre, J., Rubin, R. Geographic Multicast for Networked Sensors. Disponível em: <http://citeseer.nj.nec.com/broadwell01geomote.html>, acessado em Outubro de 2006.

- [Broch et al., 1998] Broch, J., Maltz, D., Johnson, D., et al. A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols. In: Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, p. 85-97, 1998.
- [Bruno et al., 2005] Bruno, R., Conti, M., Gregori, E. Mesh Networks: Commodity Multihop Ad Hoc Networks. In: IEEE Communications Magazine, v. 43, i. 3, p. 123-131, 2005.
- [Campista et al., 2006] Campista, M., Moraes, I., Esposito, P., et al. Wireless Ad Hoc Networks on Underserved Communities: An Efficient Solution for Interactive Digital TV. In: 8th IFIP IEEE International Conference on Mobile and Wireless Communication Networks - MWCN 2006, 2006, v. 211, p. 187-198.
- [Cisco, 2006] Cisco Inc. Cisco Systems do Brasil – Redação Virtual. Disponível em: <http://www.ciscoredacaovirtual.com/redacao/manchetes/default.asp?Id=101>, acessado em Outubro de 2006.
- [Cordeiro e Agrawal, 2002] Cordeiro, C., Agrawal, D. Mobile Ad hoc Networking. In: XXº Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, p. 125-186, Julho de 2002.
- [CPqD, 2005] CPqD. Panorama Mundial de Modelos de Exploração e Implantação. Disponível em: <http://sbtvd.cpqd.com.br/>, acessado em Setembro de 2006.
- [CPqD, 2006] CPqD. Arquitetura de Referência – Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre. Disponível em: <http://sbtvd.cpqd.com.br/>, acessado em Setembro de 2006.
- [Delicato, 2005] Delicato, F. Middleware Baseado em Serviços Para Redes de Sensores Sem Fio. In: Universidade Federal do Rio de Janeiro: Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica, Junho de 2005.
- [Das et al., 2000] Das, S., Perkins, C., Royer, E. Performance Comparison of Two On-demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks. In: Proceedings of IEEE Computer and Communications Societies Conference on Computer Communications (INFOCOM'00), p. 3-12, Março de 2000.
- [DiBEG, 2006] DiBEG. Digital Broadcasting Experts Group. Disponível em: <http://www.dibec.org>, acessado em Agosto de 2006.
- [DSL Forum, 2006] DSL Forum. DSL Fórum. Disponível em: <http://www.dslforum.org/index.shtml>, acessado em Setembro de 2006.
- [DVB, 2006] DVB Project. Digital Video Broadcasting. Disponível em: <http://www.dvb.org>, acessado em Agosto de 2006.
- [Elson e Estrin, 2001] Elson, J., Estrin, D. Random, Ephemeral Transaction Identifiers in Dynamic Sensor Networks. In: Proceedings 21st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS-21), p. 459-568, 2001.
- [Estivill, 2003] Estivill, J. Panorama da Luta Contra a Exclusão Social: Conceitos e Estratégias – CIARIS (Centro Informático de Aprendizagem e de Recursos para a Inclusão Social). Disponível em: <http://www.ilo.org/ciaris/pages/portugue/frame/download/entier.pdf>, acessado em Agosto de 2005.
- [Estrin et al., 1999] Estrin, D., Govindan, R., Heidemann, J., Kumar, S. Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks. In: Proceedings of the 5th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking - MobiCom'99, ed. ACM Press, p. 263-269, 1999.
- [Fernandes et al., 2004] Fernandes, J., Lemos, G., Silveira, G. Introdução à Televisão Digital Interativa: Arquitetura, Protocolos, Padrões e Práticas. In: Jornada de Atualização em Informática do Congresso da Sociedade Brasileira de Computação – JAI-SBC, Agosto de 2004.
- [Ferro e Potorti, 2005] Ferro, E., Potorti, F. Bluetooth and IEEE 802.11 Wireless Protocols: A Survey and a Comparison. In: IEEE Wireless Communication – Personal Communication, v. 12, i. 1, p. 12-26, Fevereiro de 2005.

- [FGV, 2003] Fundação Getúlio Vargas. Mapa da Exclusão Digital. Disponível em: http://www2.fgv.br/ibre/cps/mapa_exclusao/apresentacao/apresentacao.htm, acessado em Agosto de 2006.
- [Figueiredo et al., 2004] Figueiredo, C., Nakamura, E., Loureiro, A. Protocolo Adaptativo Híbrido para Disseminação de Dados em Redes de Sensores sem Fio Auto-Organizáveis. In: 22o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2004), 2004.
- [Garcia-Luna-Aceves e Spohn, 1999] Garcia-Luna-Aceves, J. e Spohn, M. Source-Tree Routing in Wireless Networks. In: Proceedings of 7th International Conference on Network Protocols, 1999.
- [GESAC, 2005] Portal Inclusão Digital. Governo Eletrônico Serviço de Atendimento ao Cidadão. Disponível em: <http://www.idbrasil.gov.br/>, acessado em Agosto de 2006.
- [Haas, 1997] Haas, Z. A New Routing Protocol for the Reconfigurable Wireless Networks. In: IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communication Record, v. 2, p. 562-566, 1997.
- [Haas e Pearlman, 2001] Haas, Z, Pearlman, M. The Performance of Query Control Schemes for the Zone Routing Protocol. In: IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), v. 9, i. 4, p. 427-438, 2001.
- [He et al., 2003] He, T., Stankovic, J., Lu, C., Abdelzaher, T. SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks. In: Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'03), Maio de 2003.
- [Heidemann et al., 2001] Heidemann, J., Silva, F., Intanagonwiwat, C., et al. Building Efficient Wireless Sensor Networks with Low-Level Naming. In: Proceedings of the 8th ACM symposium on Operating Systems Principles, p. 146-159, 2001.
- [Heidemann et al., 2003] Heidemann, J., Silva, F., Estrin, D. Matching Data Dissemination Algorithms to Application Requirements. In: Proceedings of the 1st ACM Conference On Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), p. 218-229, Novembro, 2003.
- [Heinzelman et al., 1999] Heinzelman, W., Kulik, J., Balakrishnan, H. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, p. 174-185, 1999.
- [Heinzelman et al., 2000] Heinzelman, W., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on Systems Sciences, v. 8, p. 8020, 2000.
- [Hong et al., 2002] Hong, X., Xu, K., Gerla, M. Scalable Routing Protocols for Mobile Ad hoc Networks. In: IEEE Network, v. 16, i, 4, p.11-21, Julho de 2002.
- [IEEE 802.11, 2006] IEEE 802.11 WLAN. IEEE 802.11, The Working Group Setting the Standards for Wireless LANs. Disponível em: <http://www.ieee802.org/11/>, acessado em Setembro de 2006.
- [IEEE 802.15, 2006] IEEE 802.15 WPAN. IEEE 802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs). Disponível em: <http://www.ieee802.org/15/>, acessado em Setembro de 2006.
- [IEEE 802.16, 2006] IEEE 802.16 WMAN. The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards. Disponível em: <http://www.ieee802.org/16/>, acessado em Setembro de 2006.
- [InfoWorld, 2006] InfoWorld. Taipei's city-wide Wi-Fi passes test | InfoWorld | News | 2006-06-27 | By Dan Nystedt, IDG News Service. Disponível em: http://www.infoworld.com/article/06/06/27/79664_HNtaipeiwifi_1.html?source=NLC-WIR2006-06-29, acessado em Setembro de 2006.

- [Intanagonwiwat et al., 2000] Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In: Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking - MobiCom'00, ed. ACM Press, p. 56-67, 2000.
- [Intanagonwiwat, 2002] Intanagonwiwat, C. Directed Diffusion: An Application-Specific and Data-Centric Communications Paradigm for Wireless Sensor Networks. In: University of Southern California: Doctor in Philosophy (Computer Science), Dezembro, 2002.
- [Intanagonwiwat et al., 2003] Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D., et al. Directed Diffusion for Wireless Sensor Networks. In: IEEE/ACM Transactions on Networking – TON'03, IEEE Press, v. 11, i. 1, p. 2-16, Fevereiro, 2003.
- [Intel, 2006] Intel Corp. Intel Chairman Unveils The World's Most Remote Digital. Disponível em: <http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/20060920corp.htm>, acessado em Outubro de 2006.
- [IPP, 2005] Secretaria Municipal de Urbanismo – Instituto Pereira Passos. Informações da Cidade do Rio de Janeiro para Subsidiar a Câmara dos Vereadores no Processo de Elaboração do Plano Diretor – 2005. Disponível em: http://www.rio.rj.gov.br/ipp/download/PD_CMRJ.pdf, acessado em Outubro de 2006.
- [ITI, 2005] ITI – Instituto Nacional de Tecnologia da Informação. Casa Brasil. Disponível em: <http://www.iti.br/twiki/bin/view/Main/CasaBrasil>, acessado em Agosto de 2006.
- [Jacquet et al., 2001] Jacquet, P., Muhlethaler, P., Clausen, T. et al. Optimized Link State Routing Protocol. In: IEEE INMIC – Multi Topic Conference – Technology for the 21st Century Proceedings, p. 62-68, 2001.
- [Jiang e Garcia-Luna-Aceves, 2001] Jiang, H., Garcia-Luna-Aceves, J. Performance Comparison of Three Routing Protocols for Ad Hoc Networks. In: Proceedings 12th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), Outubro, 2001.
- [Johansson et al., 1999] Johansson, P., Larsson, T., Hedman, N., et al. Scenario-based Performance Analysis of Routing Protocols for Mobile Ad-hoc Networks. In: Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, p. 195-206, 1999.
- [Johnson e Maltz, 1996] Johnson, D., Maltz, D. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. In: Mobile Computing, c. 5, p. 153-181, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [JPL, 2006] Jet Propulsion Laboratory. Jet Propulsion Laboratory. Disponível em: <http://www.jpl.nasa.gov/>, acessado em Outubro de 2006.
- [Karp e Kung, 2000] Karp, B., Kung, H. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. In: Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom), ACM Press, p. 243-254, Agosto de 2000.
- [Kurose e Ross, 2006] Kurose, J. e Ross, K. In: Redes de Computadores e a Internet, 3a edição, ed. Pearson Education do Brasil, 2006.
- [Lemos, 1997] Lemos, A. Anjos Interativos e Retribalização do Mundo. Sobre Interatividade e Interfaces Digitais. Disponível em: <http://www.facom.ufba.br/ciberpesquisa/lemos/interativo.pdf>, acessado em Setembro de 2006.
- [Loureiro et al., 2002] Loureiro, A., Ruiz, L., Nogueira, J., Mini, R. Rede de Sensores Sem Fio. In: Simpósio Brasileiro de Computação – Jornada de Atualização de Informática, p. 193-234, 2002.
- [Loureiro et al., 2003] Loureiro, A., Nogueira, J., Ruiz, L., Mini, R., et al. Rede de Sensores Sem Fio. In: 21o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, p. 179-226, 2003.
- [Lu et al., 2003a] Lu, Y., Zhong, Y., Bhargava, B. Packet Loss in Mobile Wireless Networks. In: Technical Report – Purdue University, Abril de 2003.

- [Lu et al., 2003b] Lu, Y., Zhong, Y., Bhargava, B. Study of Distance Vector Routing Protocols for Mobile Ad hoc Networks. In: Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM'03), 2003.
- [Macedo et al., 2004] Macedo, D., Correia, L., Nogueira, J., Loureiro, A. Proc: Um protocolo Pró-ativo com Coordenação de Rotas em Redes de Sensores Sem Fio. In: 22o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2004), 2004.
- [Maclin, 2001] Maclin, B. What every marketer needs to know about iTV. Disponível em: <http://www.broadbandbananas.com/wem.pdf>, acessado em Agosto de 2006.
- [Manjeshwar e Agrawal, 2001] Manjeshwar, A., Agrawal, D. TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium, p. 2009-2015, Abril de 2001.
- [Mauve et al., 2001] Mauve, M., Wildmer, A., Hartenstein, H. A survey on position-based routing in mobile ad hoc networks. In: IEEE Network, v. 15, i. 6, p. 30-39, Novembro de 2001.
- [Mendes e Fasolo, 2002] Mendes, L., Fasolo, S. Introdução à Televisão Digital. Disponível em http://cict.inatel.br/nova2/docentes/luciano/Artigos/SIT2002/TV_Digital_SIT2002.pdf, acessado em Setembro de 2006.
- [MRE 2006] MRE. Ministério das Relações Exteriores. Disponível em: http://www.mre.gov.br/portugues/noticiario/nacional/selecao_detalhe.asp?ID_RESENHA=148222, acessado em Setembro de 2006.
- [Murthy e Garcia-Luna-Aceves, 1996] Murthy, S. e Garcia-Luna-Aceves, J. An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks. In: Mobile Networks and Applications, v. 1, i. 2, p. 183-197, Outubro de 1996
- [Nakamura et al., 2004] Nakamura, E., Figueiredo, C., Loureiro, A. Disseminação de Dados Adaptativa em Redes de Sensores sem Fio Auto-organizáveis. In: 22o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2004), 2004.
- [Name, 2003] Name, L. O cinema e a cidade: simulação, vivência e influência. Disponível em: http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq033/arq033_02.asp, acessado em Setembro de 2006.
- [NS-2, 2006] Network Simulator – ns-2. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, acessado em Maio de 2005.
- [Oliveira e Albuquerque, 2005a] Oliveira, E., Albuquerque, C. TV Digital Interativa: Padrões para uma nova era. In: V Escola Regional de Informática RJ/ES da Sociedade Brasileira de Computação, Novembro de 2005.
- [Oliveira e Albuquerque, 2005b] Oliveira, E., Albuquerque, C. TV Interativa: Uma Alternativa para o Processo de Aprendizagem. In: WCCSETE 2006 - World Congress on Computer Science, Engineering and Technology Education, Março de 2006.
- [Park e Corson, 1997] Park, V., Corson, S. A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks. In: Proceeding of IEEE INFOCOM, p. 103-112, Abril de 1997.
- [Perkins e Bhagwat, 1994] Perkins, C. e Bhagwat, P. Higly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV) Routing for Mobile Computers. In: ACM SIGCOMM'94 Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications, v. 24, i. 4, p. 234-244, Outubro de 1994.
- [Perkins e Royer, 1999] Perkins, C., Royer, E. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing. In: IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, p. 90-100, 1999.
- [Perkins et al., 2001] Perkins, C., Royer, E., Das, S., Marina, M. Performance Comparison of Two On-demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks. In: IEEE Personal Communications Magazine Special Issue on Mobile Ad Hoc Networks, v. 8, n. 1, p. 16-29, Fevereiro de 2001.

- [Polastre et al., 2004] Polastre, J., Hill, J., Culler, D. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04), p. 95-107, Novembro de 2004.
- [Piraiá, 2006] Piraiá. Piraiá Digital. Disponível em: <http://www.piraidigital.com.br/>, acessado em Setembro de 2006.
- [PLC, 2006] PLC Forum. PLC Forum. Disponível em <http://www.plcforum.org/>, acessado em Setembro de 2006.
- [PNUD, 2004] PNUD Brasil. Atlas do Desenvolvimento Humano. Disponível em: <http://www.pnud.org.br/atlas>, acessado em Julho de 2006.
- [PNUD, 2005] PNUD Brasil. Destaque - O Brasil no RDH 2005. Disponível em: http://www.pnud.org.br/arquivos/rdh/rdh2005/rdh2005_brasil.pdf, acessado em Agosto de 2006.
- [Pochmann et al., 2004a] Pochmann, M., Barbosa, A., Campos, A., et al. Atlas da Exclusão Social: A Exclusão no Mundo, volume 4, 1a edição, São Paulo, editora Cortez.
- [Pochmann et al., 2004b] Pochmann, M., Barbosa, A., Campos, A., et al. Atlas da Exclusão Social: A Exclusão no Mundo, volume 5, 1a edição, São Paulo, editora Cortez.
- [Projeto ReMesh, 2006] Projeto ReMesh – UFF – RNP. Rede Mesh de Acesso Universitário Faixa Larga Sem Fio. Disponível em: <http://mesh.ic.uff.br>, acessado em Setembro de 2006.
- [Rajendran et al., 2003] Rajendran, V., Obraczka, K., Garcia-Luna-Aceves, J. Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, p. 181-192, ACM Press, 2003.
- [Rao et al., 2003] Rao, A., Ratnasamy, S., Papadimitriou, C., et al. Geographic Routing Without Location Information. In: Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom), p. 96-108, Setembro de 2003.
- [Reisman, 2002] Reisman, R. Rethinking Interactive TV -- I want my Coactive TV. Disponível em: <http://www.teleshuttle.com/cotv/CoTVIntroWtPaper.htm>, acessado em Setembro de 2006.
- [RFC-2501, 1999] Corson, S., Macker, J. Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations. In: RFC 2501, disponível em: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2501.txt>, acessado em Setembro de 2006.
- [RFC-3561, 2003] Perkins, C., Royer, E., Das, S. Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. Disponível em: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, acessado em Setembro de 2006.
- [RFC-3626, 2003] Clausen, T, Jacquet, P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). Disponível em: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>, acessado em Setembro de 2006.
- [RioAtlas, 2006] Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro – Secretaria Municipal de Urbanismo. Rio Atlas. Disponível em: <http://portalgeo.rio.rj.gov.br/rioatlas/rioatlas.htm>, acessado em Junho de 2006.
- [RITS, 2004] Rede de Informação para o Terceiro Setor. Apropriação Cidadã dos Telecentros de São Paulo: Um Levantamento Social. Disponível em: http://www.oppi.org.br/apc-aa-foinclusao/img_upload/28c0788efe23f406d0fb3502b147f3e7/levantamento_telecentros_sp_1.pdf, acessado em Novembro de 2006.
- [RNP 2005] RNP. Rede Wi-Max conecta instituições de ensino em Ouro Preto. Disponível em: <http://www.rnp.br/noticias/2005/not-050927.html>, acessado em Setembro de 2006.
- [RNP 2006] RNP. GT Rede mesh de acesso universitário faixa larga sem fio. Disponível em: <http://www.rnp.br/pd/gts2005-2006/mesh.html>, acessado em Setembro de 2006.

- [Royer e Toh, 1999] Royer, E., Toh, C. A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks. In: IEEE Personal Communications, v. 6, i. 2, p. 46-55.
- [Rubinstein et al., 2006] Rubinstein, M., Moraes, I., Campista, M., et al. A Survey on Wireless Ad Hoc Networks. In: Mobile and Wireless Communication Networks, ISBN 0387346341, Springer-Verlag, p. 1-33, Agosto de 2006.
- [Ruiz et al., 2004] Ruiz, L., Correia, L., Vieira, L., et al. Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fio. In: 22o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, p. 167-218, 2004.
- [Saúde-Rio 2005] Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro – Secretaria Municipal de Saúde. Histórico das Comunidades. Disponível em: http://www.saude.rio.rj.gov.br/cgi/public/cgilua.exe/web/templates/htm/v2/view.htm?infoid=3267&editio_nsectionid=34, acessado em Outubro de 2006.
- [SERPRO, 2005] Portal do Serpro – SERPRO. Portal do Serpro - BNDES prepara financiamento do programa PC para Todos, Disponível em: http://www.serpro.gov.br/noticiasSERPRO/20051103_02/, acessado em Agosto de 2006.
- [Silva, 2002] Silva, M. A (Ciber) Geografia das Cidades Digitais. Dissertação de Mestrado em Geografia – UFF, 2002.
- [Silva et al., 2004a] Silva, F., Heidemann, J., Govindan, R., Estrin, D. An Overview of Directed Diffusion. In: Technical Report ISI-TR-2004-586, USC/Information Sciences Institute, Fevereiro, 2004
- [Silva et al., 2004b] Silva, F. et al. TV Escola Interativa: Uma Proposta Educativa para TV Digital. In: VII Congresso Iberoamericano de Informática Educativa, México, pp. 670-679, Outubro de 2004.
- [Sohrabi et al., 2000] Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V., Pottie, G. Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network. In: IEEE Personal Communications Magazine, v. 7, i. 5, p. 16-27, Outubro de 2000.
- [Sridharan e Krishnamachari, 2004] Sridharan, A., Krishnamachari, B. Max-Min Fair Collision-Free Scheduling for Wireless Sensor Networks. In: International Conference on Performance, Computing, and Communications, p. 585-590, 2004.
- [Sud Mennucci, 2006] Sud Mennucci. Prefeitura Municipal de Sud Mennucci. Disponível em: <http://www.sudmennucci.sp.gov.br/index.php>, acessado em Setembro de 2006.
- [Tanenbaum, 2003] Tanenbaum A. In: Redes de Computadores, 4a edição, 7a reimpressão, ed. Elsevier, 2003.
- [Thepvilojanapong et al., 2005] Thepvilojanapong, N., Tobe, Y., Sezaki, K. HAR: Hierarchy-based Anycast Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. In: Proceeding of Symposium on Applications and the Internet – SAINT'2005, p. 204-212, Janeiro de 2005.
- [Tilak et al., 2002a] Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N., Heinzelman, W. A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models. In: ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, ed. ACM Press, v. 6, i.2, p. 28-36, Abril de 2002.
- [Tilak et al., 2002b] Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N., Heinzelman, W. Infrastructure Tradeoffs for Sensor Networks. In: ACM WSNA 1st International WorkShop on Wireless Sensor Networks and Applications, ed. ACM Press, p. 49-58, 2002.
- [TinyOS, 2006] UC Berkeley. TinyOS Community Forum || An open-source OS for the networked sensor regime. Disponível em: <http://www.tinyos.net/>, acessado em Setembro de 2006.
- [Tome et al., 2001] Tome, T. et al. Relatório Integrador dos Aspectos Técnicos e Mercadológicos da Televisão Digital. Disponível em <http://www.anatel.gov.br>, acesso em Agosto de 2006.

- [Tsarmopoulos et al., 2005] Tsarmopoulos, N., Kalavros, Y., Lalis, S. A Low Cost and Simple-to-Deploy Peer-to-Peer Wireless Network based on Open Source Linux Routers. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Fortaleza, CE, Maio de 2005.
- [TVhistory, 2005] TVhistory. Television History – The First 75 Years. Disponível em: <http://www.tvhistory.tv>, acessado em Setembro de 2006.
- [UCSB, 2006] UCSB MeshNet. UCSB MeshNet. Disponível em: <http://moment.cs.ucsb.edu/meshnet/>, acessado em Setembro de 2006.
- [Usui et al., 1996] Usui, K., Kai, K., Ohya, A., Nishizawa, T. Multimedia Services in the HDTV MUSE System. IEEE Transactions on Broadcasting, September 1996.
- [WiMax Forum, 2006] WiMax Forum. WiMax Forum – WiMax Home. Disponível em: <http://www.wimaxforum.org/home/>, acessado em Setembro de 2006.
- [Wu et al., 2000] Wu, Y., Pliszka, E., Caron, B., Bouchard, P., Chouinard, G. Comparison of Terrestrial DTV Transmission Systems: The ATSC 8-VSB, the DVB-T COFDM and the ISDB-T BST-OFDM. In: IEEE Transactions on Broadcasting, June 2000.
- [Ye et al., 2002] Ye, W., Heidemann, J., Estrin, D. An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of the IEEE INFOCOM 2002, p. 1567-1576, Junho de 2002.
- [Yu et al., 2001] Yu, Y., Govindan, R., and Estrin, D. Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks. In: Technical Report UCLA/CSD-TR-01-0023, UCLA Computer Science Department, 2001.
- [Zancheti, 2001] Zancheti, S. Cidades Digitais e o Desenvolvimento Local. In: Revista de Ciência e Tecnologia – Política e Gestão para a Periferia, v.5, n.2, pp 311-329, ISSN 1415-3262, 2001.
- [Zess, 2006] University of Siegen. Zess – IP – Research: Master Student Topics. Disponível em: http://www.zess.uni-siegen.de/cms/front_content.php?idcat=76, acessado em Outubro de 2006.