

ANDRÉ BARBOSA VERONA

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE REDES DE SENSORES SEM FIO
APLICADAS À VITICULTURA**

MARINGÁ

2010

ANDRÉ BARBOSA VERONA

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE REDES DE SENSORES SEM FIO
APLICADAS À VITICULTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. João Angelo Martini
Co-Orientadora: Prof^ª. Dra. Linnyer Beatryz Ruiz
Aylon

MARINGÁ

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

V548s Verona, André Barbosa
Simulação e análise de redes de sensores sem fio aplicadas à viticultura. / André Barbosa Verona. -- Maringá, 2010. xviii, 93 p. : il. color., figs., tabs.

Orientador : Prof. Dr. João Angelo Martini.
Co-orientador : Prof^a Dr^a Linnyer Beatrys Ruiz Aylon.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, 2010.

1. Redes de sensores sem fio - Rede plana. 2. Redes de sensores sem fio - Rede hierárquica. 3. Network simulator 2. 4. Viticultura - Monitoramento ambiental. 5. Protocolo de roteamento. 6. Nó sensor sem fio. 7. MannaSim. 8. Agrometeorologia. 9. Redes de sensores sem fio - Atraso médio. 10. Redes de sensores sem fio - Consumo de energia. 11. Redes de sensores sem fio - Número de pacotes perdidos. I. Martini, João Angelo, orient. II. Aylon, Linnyer Beatryz Ruiz, co-orient. III. Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. IV. Título.

CDD 21.ed. 004.62

ANDRÉ BARBOSA VERONA

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE REDES DE SENSORES SEM FIO APLICADAS À VITICULTURA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovado em 01/03/2010.

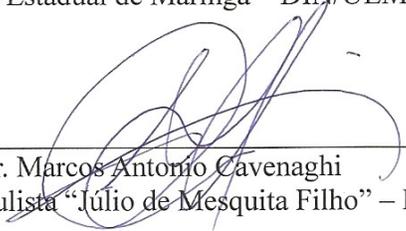
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. João Angelo Martini
Universidade Estadual de Maringá – DIN/UEM



Profa. Dra. Luciana Andréia Fondazzi Martimiano
Universidade Estadual de Maringá – DIN/UEM



Prof. Dr. Marcos Antonio Cavenaghi
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – DCo/UNESP

“Não basta destruir os abusos, é necessário modificar os costumes. Destruiu-se o moinho, mas ainda ficou o vento”.

Victor Hugo

Agradecimentos

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho. Aos professores João e Linnyer, que foram os guias de todo este trabalho, meu muito obrigado. Ao professor Jozé Marcos do DAG da UEM pela grande ajuda esclarecendo assuntos relacionados ao cultivo das videiras. Aos meus pais, avós, irmãos e demais familiares por sempre darem apoio incentivando e motivando a buscar novos sonhos e novas conquistas. A minha namorada, parceira pra todas as horas, que compartilhou comigo grande parte do tempo do desenvolvimento deste trabalho. A Isabela da UFMG que me ajudou com os traces do NS. Ao Michel e ao Alemão, pela ajuda inicial com a linguagem Phyton. Aos amigos e colegas do mestrado, Huffus, Carlitos, Tigonka, Gauchão, pelos bons momentos passados juntos. Fica aqui a saudade desse tempo bom que passei aqui na UEM, com o consolo que essas lembranças me acompanharão pela vida toda.

Resumo

A agricultura é uma das atividades econômicas mais importantes para o Brasil. No entanto, essa atividade está sujeita à influência direta das condições climáticas. Situações climáticas adversas podem ocasionar enormes prejuízos econômicos e sérios impactos sociais e ambientais.

Diante desse contexto, surge o desafio de prever e controlar tais condições adversas. O esforço nesse sentido consiste em empregar a ciência da Meteorologia focada no auxílio à agricultura (Agrometeorologia). As microestações agrometeorológicas surgiram para esse fim, e são capazes de coletar e armazenar dados climáticos como temperatura e umidade. Elas, porém, coletam dados que refletem o microclima de uma pequena área, sendo necessária a utilização de várias delas para monitorar grandes áreas. Como não possuem capacidade de se comunicarem umas com as outras, a coleta dos dados demanda esforço extra com material humano. Uma opção interessante que surgiu recentemente são as redes de sensores sem fio (RSSF), que são constituídas de dispositivos capazes de sensoriar o ambiente e que podem se comunicar uns com os outros, encaminhando os dados coletados entre todos os dispositivos até um ponto de coleta centralizado.

Neste trabalho foram simuladas e analisadas várias configurações de RSSF, visando identificar quais são os parâmetros de configuração com melhor desempenho considerando o tempo de vida, atraso na entrega e perda de dados nas RSSFs aplicadas no monitoramento das plantações de uva, atendendo uma grande quantidade de agricultores da cidade de Marialva – PR, cidade que se destaca pela grande produção de uvas, movimentando a economia da cidade e também da região. Foi realizado ainda um estudo da cultura da videira para identificar os principais fatores climáticos que as influenciam, utilizando-os como parâmetros nas simulações. Como resultado deste trabalho, encontraram-se o melhor protocolo de roteamento, a melhor localização do AP (Access Point) e a melhor organização da rede

utilizando as características do nó sensor mica2, que poderá ser utilizado como guia para a implantação de uma RSSF real para monitoramento do clima nas plantações de uva.

Abstract

Agriculture is one of the most important economic activities in Brazil. However, this activity is submitted to a direct influence of weather conditions. Adverse climatic conditions can cause enormous economic losses and serious social and environmental impacts.

On this context, it came to us the challenge to predict and control such adverse conditions. The effort therein consists in employing the science of meteorology focused on a support for agriculture (Agrometeorology). The agrometeorological microstation emerged for this purpose, and are able to collect and store weather data like temperature and humidity. They, however, collect data that reflect the microclimate of a small area, requiring the use of several of them to monitor large areas. Lacking ability to communicate with each other, the data collection demand extra effort with human material. An interesting option that has recently emerged are the networks of wireless sensor network (WSN), which consist of devices capable of sensing the environment and can communicate with each other, sending the collected data across all devices to a collection point centralized.

In this study, several configurations of WSN were simulated and analyzed, in order to identify what are the configuration parameters with best performance, considering the time of life, delay in delivery and data loss for WSNs, applied in the monitoring of grape plantations. Thus, it was possible to reach a lot of farmers in the town of Marialva - PR, a city that stands out for its large production of grapes, moving the economy of the city and the region. Also a further study was carried out upon the vine culture to identify major climatic factors that influence them, using it as parameters in the simulations. As an end result of this study, it was found the best routing protocol, the best location of the AP (Access Point) and the best organization of the network using the characteristics of the Mica2 sensor node, which can be used as a guide for the deployment of a real WSN for monitoring of climate on grape crops, to increase the life span, reduce the delay in delivery of data and reduce the number of missing data in the network.

Lista de Ilustrações

<i>Figura 1.1. Microestação Ag-solve (Agsolve, 2008).....</i>	<i>02</i>
<i>Figura 2.1. Exemplo de MANET</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.2. Redes de Sensores Sem Fio (Braga, 2006)</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.3. Fluxos de Informações em redes</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.4. Descoberta de rota no protocolo AODV</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.5. Camadas de rede de um nó sensor móvel</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.6. Dispositivos de Hardware de um nó sensor</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.7. Nós sensores da Crossbow</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.1. Componentes de software da ferramenta NS-2</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.2. Exemplo do formato newtrace</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.3. Ferramenta de geração de gráficos TraceGraph.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.1. Área de simulação da rede plana com 48 nós sensores e AP no canto.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.2. Área de simulação da rede plana com 48 nós sensores e AP no centro</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.3. Área de simulação da rede hierárquica com 44 nós sensores comuns 4 cluster-heads e AP no centro</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.4. Área de simulação da rede plana com 80 nós sensores e AP no canto</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.5. Área de simulação da rede plana com 80 nós sensores e AP no centro</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.6. Área de simulação da rede hierárquica com 76 nós sensores comuns,4 cluster-heads e AP no centro</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.7. Área de simulação da rede plana com 168 nós sensores e AP no canto.....</i>	<i>41</i>

<i>Figura 4.8. Área de simulação da rede plana com 168 nós sensores e AP no centro.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.9. Área de simulação da rede hierárquica com 164 nós sensores comuns, 4 cluster-heads e AP no centro</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.1. Atraso médio da rede plana com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.2. Aumento e diminuição da distância dos nós sensores em relação ao AP – Pico de atraso no dispositivo 6 e vale de atraso no dispositivo 7</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.3. Atraso médio da rede plana com 48 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.4. Atraso médio da rede plana com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.5. Atraso médio da rede plana com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.6. Atraso médio da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.7. Atraso médio da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.8. Atraso médio da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.9. Atraso médio da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.10. Energia restante da rede plana com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.11. Energia restante da rede plana com 48 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.12. Energia restante da rede plana com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.13. Energia restante da rede plana com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.14. Energia restante da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.15. Energia restante da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro</i>	<i>54</i>

<i>Figura 5.16. Energia restante da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto</i>	55
<i>Figura 5.17. Energia restante da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro</i>	55
<i>Figura 5.18. Número de pacotes perdidos na área com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro</i>	56
<i>Figura 5.19. Número de pacotes perdidos na área com 48 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro</i>	57
<i>Figura 5.20. Número de pacotes perdidos na área com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro</i>	57
<i>Figura 5.21. Número de pacotes perdidos na área com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro</i>	58
<i>Figura 5.22. Número de pacotes perdidos na área com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto</i>	58
<i>Figura 5.23. Número de pacotes perdidos na área com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro</i>	59
<i>Figura 5.24. Número de pacotes perdidos na área com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto</i>	59
<i>Figura 5.25. Número de pacotes perdidos na área com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro</i>	60
<i>Figura 5.26. Atraso médio da rede hierárquica com 44 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro</i>	62
<i>Figura 5.27. Atraso médio da rede hierárquica com 76 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro</i>	62
<i>Figura 5.28. Atraso médio da rede hierárquica com 164 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro</i>	63
<i>Figura 5.29. Energia restante da rede hierárquica com 44 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro</i>	64
<i>Figura 5.30. Energia restante da rede hierárquica com 76 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro</i>	65

<i>Figura 5.31. Energia restante da rede hierárquica com 164 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.32. Número de pacotes perdidos da rede hierárquica com 44 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.33. Número de pacotes perdidos da rede hierárquica com 76 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.34. Número de pacotes perdidos da rede plana com 164 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.35. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.36. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.37. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.38. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.39. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.40. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.41. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.42. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro – Desempenho semelhante das redes</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.43. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.44. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.45. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro.....</i>	<i>74</i>

<i>Figura 5.46. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.47. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.48. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.49. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.50. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.51. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.52. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.53. Atraso médio da rede plana utilizando o protocolo DSDV e da rede hierárquica utilizando o AODV na área de simulação com 48 nós sensores</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.54. Atraso médio da rede plana utilizando o protocolo DSDV e da rede hierárquica utilizando o AODV na área de simulação com 80 nós sensores</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.55. Atraso médio da rede plana utilizando o protocolo DSDV e da rede hierárquica utilizando o AODV na área de simulação com 168 nós sensores</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.56. Número de pacotes perdidos da rede plana utilizando o protocolo AODV e da rede hierárquica utilizando o DSDV na área de simulação com 48 nós sensores</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.57. Número de pacotes perdidos da rede plana utilizando o protocolo AODV e da rede hierárquica utilizando o DSDV na área de simulação com 80 nós sensores</i>	<i>83</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1. Configurações de RSSFs (RUIZ, 2003).....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2.2. Características de hardware do nó sensor Mica2.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 6.1. Melhor configuração encontrada para cada área de simulação em cada parâmetro de interesse.....</i>	<i>86</i>

Lista de Abreviaturas e Siglas

AD.....	<i>Analógico Digital</i>
AODV.....	<i>Ad-hoc On-demand Distance Vector</i>
AP	<i>Access Point</i>
ARP	<i>Address Resolution Protocol</i>
DA	<i>Digital Analógico</i>
DD	<i>Directed Diffusion</i>
DSDV	<i>Destination-Sequenced Distance-Vector</i>
IFq	<i>Interface queue</i>
LEACH	<i>Low Energy Adaptative Cluster Head</i>
LL	<i>Link Layer</i>
PA	<i>Ponto de Acesso</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
ROM	<i>Read Only Memory</i>
RSSF	<i>Redes de Sensores Sem Fio</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

Sumário

Introdução	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
Agrometeorologia e as Redes de Sensores Sem Fio	5
2.1. Monitoramento Ambiental	6
2.2. Viticultura	7
2.3. Redes de Sensores Sem Fio.....	9
2.3.1. Fundamentos de Redes de Sensores Sem Fio	9
2.4. Características de Funcionamento de Protocolos de Roteamento.....	17
2.4.1. Protocolo de Roteamento AODV.....	17
2.4.2. Protocolo de Roteamento DSDV	20
2.4.3. Protocolo de Roteamento LEACH.....	20
2.5. Camadas de Rede de um Nó Sensor Sem Fio	21
2.6. Nó Sensor Sem Fio.....	22
Ferramentas de Simulação e Trabalhos Relacionados.....	29
3.1. Network Simulator 2 (NS-2).....	29
3.2. TraceGraph.....	32
3.3. MannaSim	33
3.4. Trabalhos Relacionados	34
Parâmetros de Avaliação.....	36
4.1. Parâmetros das Simulações	36
Análise dos Resultados	44
5.1. Análise dos Resultados da Rede Plana.....	45
5.1.1 Atraso Médio.....	45
5.1.2. Consumo Energia	61

5.1.3. Número de Pacotes Perdidos	68
5.2. Análise dos Resultados da Rede Hierárquica	61
5.2.1 Atraso Médio	45
5.2.2. Consumo Energia	61
5.2.3. Número de Pacotes Perdidos	68
5.3. Análise dos Resultados da Rede Plana com os Resultados da Rede Hierárquica	68
5.3.1 Atraso Médio	45
5.3.2. Consumo Energia	61
5.3.3. Número de Pacotes Perdidos	68
5.3.4 Comparações Adicionais	45
Conclusão e Trabalhos Futuros	84
6.1. Conclusão	84
6.2. Trabalhos Futuros	86
Referências Bibliográficas	87

Introdução

1.1. Considerações Iniciais

O uso de microestações agrometeorológicas (Hasu e Koivo, 2008) para monitoramento climático vem ao longo dos anos mostrando que pode ajudar na melhoria da produção de alimentos. Por meio da análise dos dados coletados pelas microestações pode-se otimizar o cultivo e a produção de alimentos, com menor utilização de água e de inseticidas, o que possibilita a produção de alimentos mais saudáveis e com menor custo, impactando diretamente na melhoria da qualidade e no custo de vida das pessoas.

As microestações (Hasu e Koivo, 2008), porém, são limitadas, pois centralizam a coleta de dados em apenas um ponto, refletindo as variações climáticas daquele micro clima, o que possibilita a correta intervenção daquela região e de uma pequena área concêntrica àquela. Com isso, a intervenção em outras regiões fica comprometida, pois os fatores climáticos nessas regiões podem ser diferentes dos coletados pela microestação. Outra limitação encontrada nas microestações é que elas não têm a capacidade de se comunicarem umas com as outras, fazendo com que a coleta de dados tenha que ser realizada em cada uma separadamente, demandando maior intervenção humana nesse monitoramento. A Figura 1.1 mostra uma microestação que conta com sensores de velocidade e direção do vento, radiação solar, temperatura e umidade do ar, além de uma placa solar para captura de energia e carregamento das baterias.



Figura 1.1. Microestação Ag-solve (Agsolve, 2008)

Nos últimos anos surgiram as redes de sensores sem fio (RSSF) (Pottie, 1998; Estrin *et al.*, 2002; Lewis, 2004; Akyildiz e Vuran, 2010), compostas por vários dispositivos conhecidos como nós sensores, capazes de se comunicar e de trocar dados até o envio destes a um ponto de coleta. Cada nó sensor é composto por um conjunto de sensores que captam os mais variados dados, como temperatura, umidade relativa do ar, umidade do solo, radiação solar, utilizando para isso um microcontrolador, um dispositivo de radiofrequência e uma bateria. O nó sensor tem capacidade para enviar estes dados para outros nós sensores. As RSSFs têm potencial para minimizar o problema de coleta localizada e de intervenção humana por parte das microestações.

As redes de sensores sem fio não são utilizadas apenas para monitoramento ambiental, mas também em várias áreas, como militar, por exemplo, para monitorar a movimentação de inimigos em um campo de batalha; engenharia, para monitorar possíveis abalos em estruturas de edifícios e pontes; medicina, para monitorar algum dado importante e que só seria possível monitorar por meio de cirurgia; dentre outras aplicações.

Outra grande vantagem das RSSFs é a possibilidade de atuação em ambientes inóspitos, atuando de forma autônoma, onde a presença do homem seria impossível, ou praticamente impossível, como em um pântano, ou em uma mata fechada em um local remoto.

Na região de Maringá-PR, mais especificamente na cidade de Marialva-PR, há uma concentração de produtores de uva. Esse fato tem impacto econômico relevante para a região, e demanda monitoramento de fatores climáticos que interferem na cultura da uva (viticultura).

Existem várias ferramentas que realizam simulação de ambientes reais coletando dados em uma RSSF, como Network Simulator (NS-2, 2009) e Java in Simulation Time (Jist, 2009). Essas ferramentas permitem a configuração de uma rede comum ou de uma RSSF, por meio de parâmetros como tamanho da área de simulação, quantidade de nós sensores utilizados, localização dos nós sensores, camada de aplicação da rede, camada de acesso ao meio da rede, protocolo de roteamento da rede, potência da antena dos nós sensores, quantidade de energia disponível em cada nó sensor, consumo para envio e recepção de dados dos nós sensores, dentre outros. Após a simulação, essas ferramentas geram um arquivo contendo dados que descrevem quais eventos ocorreram na rede simulada e em que instante de tempo. Esses dados podem então ser analisados e comparados com os de outras redes, mostrando qual configuração é a mais viável para cada parâmetro de interesse. Algumas características que podem ser analisadas após a simulação são: pacotes enviados pelos nós sensores e os que foram recebidos pelo ponto de coleta; atraso médio desde a coleta pelo nó sensor até a chegada ao ponto de coleta; energia consumida pela rede em um determinado instante de tempo; influência da densidade da rede, do protocolo de roteamento e do local do ponto de coleta nos parâmetros anteriores.

No presente trabalho foi utilizado o Network Simulator na versão 2.29 em conjunto com o MannaSim (Mannasim, 2009) para realização das simulações das RSSFs. O MannaSim se integra ao Network Simulator e estende suas funcionalidades para utilização nas RSSFs, como adição de novas formas de organização da rede.

O objetivo principal deste trabalho consiste em identificar o melhor cenário de configuração de uma RSSF com melhor desempenho que satisfaça o monitoramento de fatores climáticos importantes na viticultura.

Diante desse contexto, o presente trabalho propõe o monitoramento desses fatores por meio de uma RSSF, com o objetivo de melhorar por meio desse monitoramento a produção das videiras. Para identificar as características mais adequadas à viticultura, foram realizadas simulações e análises para várias configurações de RSSF.

Essas análises viabilizam a criação futura de uma RSSF de monitoramento utilizando nós sensores reais aplicadas à viticultura, pois os parâmetros ideais de configuração dessa RSSF serão conhecidos a priori com os resultados das simulações, e a montagem e configuração da rede poderá ser guiada por esses parâmetros.

No capítulo 2 são tratados assuntos relacionados ao monitoramento ambiental, a agrometeorologia e aos fatores que influenciam a cultura da uva. Ainda no capítulo 2, são tratados assuntos relacionados com as redes de sensores sem fio, principais características, características de alguns protocolos de roteamento e as principais características de alguns nós sensores comerciais. No capítulo 3 são apresentadas as ferramentas de simulação e os trabalhos relacionados. No capítulo 4 são descritos os parâmetros utilizados nas simulações (como os protocolos de roteamento e disposição dos nós sensores pela área de simulação). No capítulo 5 são apresentados os gráficos e as análises dos vários cenários simulados. No capítulo 6 encontra-se a conclusão deste trabalho, que apresenta quais características são melhores para cada tipo de cenário simulado. Ainda no capítulo 6, são propostos alguns trabalhos futuros.

Agrometeorologia e as Redes de

Sensores Sem Fio

A *Agrometeorologia*, a *Fitopatologia* e a *Fitotecnia* são áreas de estudo da Agronomia que se integram com o objetivo de alcançar o máximo proveito de uma cultura com um mínimo de intervenção no ambiente. A agrometeorologia, em especial, pode ser conceituada como um método de definir, em valores quantitativos e com a maior precisão possível, os fatores que limitam o desenvolvimento de uma doença, relacionando-os com os períodos de maior probabilidade de ataque em função das condições ambientais (Sentelhas, 2004). Pode ser definida também como o ramo da meteorologia que estuda a interação dos fenômenos meteorológicos e seus impactos na cadeia produtiva do sistema agropecuário (Cemba, 2009).

Este capítulo aborda aspectos inter-relacionados entre a computação e a agronomia, por meio do estudo do monitoramento climático e de quais fatores, como temperatura e umidade, afetam a cultura das videiras. Esse estudo é de suma importância principalmente na definição de alguns parâmetros do monitoramento pretendido, como quais sensores devem ser utilizados em uma plantação de uva. Ainda neste capítulo são apresentadas as Redes de Sensores Sem Fio como uma solução para o monitoramento ambiental.

2.1. Monitoramento Ambiental

O monitoramento é o estudo e o acompanhamento contínuo e sistemático do comportamento de fenômenos, eventos e situações específicas, cujas condições desejamos identificar, avaliar e comparar. Desta forma, é possível estudar as tendências ao longo do tempo, ou seja, verificar as condições presentes, projetando situações futuras (Ibama, 2000). O monitoramento ambiental é definido como o processo de coleta dos dados ambientais e a realização do acompanhamento direto dessas variáveis de interesse, com o objetivo de avaliar a quantidade e a qualidade das condições dos recursos naturais (Ibama, 2000). É uma técnica a cada dia mais utilizada, devido às grandes vantagens que ela possibilita, como por exemplo, saber se a quantidade de água presente no solo é suficiente, e se não, permitir que um sistema de irrigação seja acionado para suprir essa falta, evitando perdas em plantações. A partir do momento em que se tem uma grande quantidade de dados coletados, pode-se realizar análises desses dados em busca de padrões, relacionando-os com eventos indesejáveis, como surgimento de pragas em uma plantação.

O monitoramento ambiental fornece informações sobre os fatores que influenciam no estado de conservação, preservação, degradação e recuperação ambiental. No monitoramento de plantações, em geral, são utilizadas microestações meteorológicas compostas por um sistema embarcado de controle, que inclui um microcontrolador, um dispositivo de armazenamento, um *display* para exibição de informações ao usuário e diversos sensores utilizados para captar dados de interesse como temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento, umidade do solo, radiação solar, molhamento foliar, precipitação. Estes dados coletados podem ser transferidos para um computador comum ou portátil por meio das interfaces de comunicação disponibilizadas nas microestações, como *Universal Serial Bus* (Usb, 2009), *FireWire* (Atchison, 1999) e *Bluetooth* (Bluetooth, 2009). Os sensores utilizados impactam diretamente no custo final dessas microestações, uma vez que quanto maior a precisão necessária, maior é o custo do sensor.

As microestações podem ser empregadas para monitorar as mais variadas culturas, como uva, maracujá, laranja, soja, dentre outras. Cada cultura em questão necessita de dados específicos, como temperatura e umidade do solo. Pode ocorrer, por exemplo, que em determinada cultura o índice pluviométrico não seja importante, o que leva à redução do custo da microestação em função da não utilização do sensor relacionado a esse parâmetro.

Algumas microestações disponibilizam modelos de previsão de doenças, que podem auxiliar os produtores a agirem quando determinadas condições climáticas acontecem, como

por exemplo, temperatura abaixo de 15 graus por mais de 12 horas consecutivas. Este é apenas um exemplo, que pode ser determinante na cultura do maracujá, mais especificamente entre a floração e o surgimento dos frutos. Se essa condição for verificada, a floração será prejudicada e muitas flores cairão, não formando o fruto (Junqueira *et al.*, 1999).

Existem vários modelos de previsão de pragas e doenças, porém, não apresentam um bom nível de segurança para que ocorra ou não a intervenção na plantação. Isso possibilita a integração com *Data Warehouse* e *Data Mining* (Kimball, 2002), por meio da exploração de novos modelos de previsão, utilizando uma quantidade maior de dados, aproveitando o grande poder computacional e facilitando a localização de padrões que causam doenças, pragas e até níveis de produtividade em uma plantação.

Para melhoria desses modelos, é necessária a implantação de mais microestações de monitoramento e de forma integrada, pois aumentando a quantidade de dados analisados a precisão dos modelos pode ser melhorada. As RSSFs também são uma boa opção para coletar grandes quantidades de dados climáticos de forma integrada e praticamente sem a intervenção humana.

2.2. Viticultura

A videira é uma das principais fruteiras cultivadas no mundo, com produção anual aproximada em 69 milhões de toneladas, e contando com uma área cultivada de 7,1 milhões de hectares (Fao, 2009). No Brasil, a cultura da uva ocupa aproximadamente 77 mil hectares, tendo uma produção total de 1,2 milhões de toneladas (Ibravin, 2009).

No estado do Paraná, a cidade de Marialva se destaca pela produção de uvas tanto de mesa quanto para produção de vinhos. São aproximadamente 780 agricultores que contam com 1,5 mil hectares para produção, empregando em torno de dezesseis mil dos trinta e dois mil habitantes da cidade, e tendo esta atividade grande impacto na economia da cidade e também da região (Emater, 2010).

A produtividade e o custo de produção da uva sofrem influência direta da ocorrência de doenças fúngicas, como o míldio, causado pelo fungo *Plasmopara viticola*. Essas doenças são controladas em média com dezesseis pulverizações com fungicidas durante o ciclo da cultura (Pedro Júnior *et al.*, 1999).

Segundo GAVA *et al.* (2004), climas tropicais e subtropicais propiciam às plantas neles cultivados a ação dos agentes fitopatogênicos, que se estabelecerão se os fatores ambientais forem propícios. Entre os elementos meteorológicos que condicionam a infecção

causada por patógenos, pode-se citar a temperatura do ar, que dita a velocidade das reações metabólicas tanto do patógeno como do hospedeiro; a umidade do ar e o índice pluviométrico, que estão diretamente ligados à presença de água na forma líquida sobre as plantas (molhamento foliar), facilitando a penetração dos fungos nas plantas; e o vento, que é o maior responsável pela diminuição da quantidade de água nas folhas das plantas, e pelo transporte das doenças a outras plantações.

Os fatores climáticos além de influenciar no surgimento e disseminação de doenças, influenciam na qualidade e na produtividade das videiras. A radiação solar incidente nos cachos tem papel determinante na quantidade de açúcares nas uvas, o que é de suma importância principalmente na produção de vinho, pois quanto mais açúcar, melhor a qualidade do vinho produzido. A forma que os parreirais são plantados, com determinada largura e altura, também tem influência na quantidade final de açúcares das uvas, pois parreiras mais largas deixam passar maior quantidade de radiação solar aos cachos, e parreiras mais estreitas propiciam menor quantidade de radiação aos cachos. Em uma mesma parreira, a poda das folhas também causa diferenças na quantidade de açúcares das uvas, pois uma poda mais agressiva deixa mais luz solar incidir nos cachos (Czermainnski e Sonogo, 2004).

A temperatura e a quantidade de chuva são fatores que estão diretamente ligados a umidade do ar e do solo. Chuva em excesso no período final de maturação é uma das maiores causas na queda da produção e qualidade das uvas, propiciando grande umidade nos cachos, o que facilita o apodrecimento das uvas (Cardoso, 2008). A falta de chuva, porém, pode ser controlada utilizando técnicas de irrigação. Na fase final de maturação, o ideal é que se tenha baixo índice pluviométrico e grande quantidade de radiação solar incidente nos cachos. Essa combinação possibilita ao agricultor retardar a colheita para que as uvas acumulem uma quantidade maior de açúcares, agregando valor às mesmas (Chavarria, 2008).

Além da influência exercida pelos fatores climáticos durante a produção da uva, existe a influência quando a uva ainda não está formada, período conhecido como dormência, em que as videiras ficam em um estado de hibernação, mecanismo que elas utilizam para se defender de fatores climáticos não propícios ao seu desenvolvimento (Chavarria, 2008). Esse período que é caracterizado pela baixa atividade metabólica da videira, ocorre no inverno devido às baixas temperaturas.

Na primavera, quando as temperaturas amenas cessam, deve existir radiação solar abundante e constante para que as videiras saiam do estado de hibernação. A cada dia, uma quantidade de radiação é absorvida, até que seja atingido o limiar para que a videira comece a

brotar. Quando as temperaturas amenas se estendem até a primavera, podem ser utilizados produtos químicos específicos para quebra da dormência das videiras (Taiz; Zeiger, 2004).

Tendo conhecimento desses fatores climáticos que influenciam a cultura da uva, podem ser mapeados os principais sensores para monitoramento das videiras, que são: de temperatura do ar, pluviométrico, molhamento foliar, radiação solar, velocidade e direção do vento, umidade do ar e umidade do solo, tendo os dois últimos menor importância, pois as grandezas que eles medem podem ser estimadas com as grandezas medidas pelos sensores anteriores.

2.3. Redes de Sensores Sem Fio

A comunicação sem fio vem a cada dia trazendo mais comodidade e modernidade à vida das pessoas. Junto com essa tecnologia, surgem novos produtos mais modernos e baratos, como aparelhos celulares e computadores portáteis. Essa popularização das tecnologias sem fio possibilitou que com um aparelho celular ou um computador portátil possamos utilizar internet sem fio nos mais variados lugares, como aeroportos, rodoviárias, instituições de ensino e até mesmo em restaurantes e padarias.

Aproveitando essa tecnologia sem fio, foram desenvolvidas as redes de sensores sem fio (RSSF) (Pottie, 1998), que são capazes de monitorar ambientes e de encaminhar os dados coletados para um ponto de coleta, conhecido como *access point* (AP) ou ponto de acesso, para que estes possam ser visualizados por algum observador externo ao meio em que se encontra a rede.

Esta seção aborda os fundamentos das redes de sensores sem fio, incluindo os parâmetros de avaliação em uma RSSF.

2.3.1. Fundamentos de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF)

As RSSFs são consideradas uma subclasse das redes *ad-hoc* (Corson *et al.*, 1999). As redes *ad-hoc* caracterizam-se pela descentralização do envio e recepção de dados entre os componentes atuantes na rede pela ausência de um ponto de coleta que centraliza os dados. Nesse tipo de rede qualquer terminal pode realizar roteamento de dados, agindo de forma colaborativa com as solicitações de envio e recepção de terminais vizinhos.

Outra subclasse das redes *ad-hoc* são as redes *ad-hoc* móveis, conhecidas como MANET (*Mobile Ad-hoc Network*) (Corson e Maker, 1999). Nestas redes os dispositivos participantes podem se movimentar e criar novas topologias de rede, independente de

qualquer infra-estrutura de rede. Como os dispositivos das MANETs em geral têm pequeno alcance, se algum dado solicitado está presente em um dispositivo que não possui alcance direto com o solicitante, é necessária a utilização de múltiplos saltos (*hops*) para que o dado chegue até o dispositivo que o solicitou. Por esse motivo, as MANETs são também conhecidas como redes *multi-hop*. A Figura 2.1 mostra um exemplo de MANET com dispositivos diversos do dia-a-dia que poderiam trocar informações entre si.

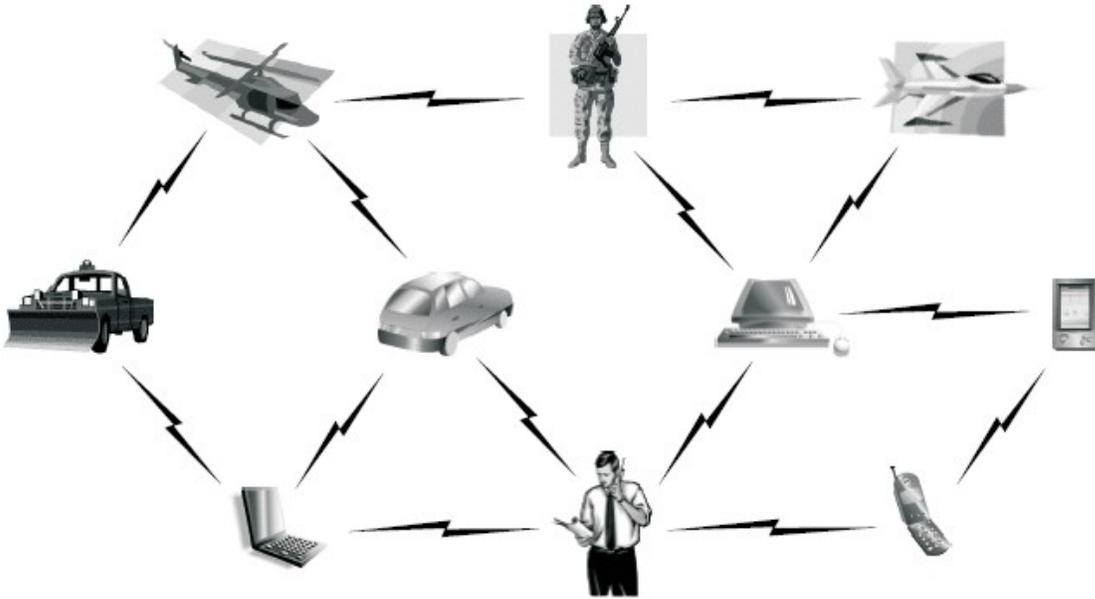


Figura 2.1. Exemplo de MANET

Apesar da comunicação sem fio ter avançado com o intuito de melhorar o dia a dia das pessoas, novas aplicações surgem com outros objetivos, como é o caso das RSSFs.

Uma RSSF é formada por uma grande quantidade de dispositivos chamados nós sensores. Estes dispositivos podem ser distribuídos nas mais variadas áreas, inclusive em áreas onde a intervenção humana para administração e reparos seja impraticável, como em um pântano, em uma mata fechada ou até mesmo em um território hostil devido à ocorrência de uma guerra (Ruiz *et al.*, 2004). A função básica do projeto de uma RSSF é coletar dados em um ambiente, executar ou não algum processamento sobre eles dependendo da política implementada nessa rede, e encaminhá-los a um ponto de acesso (AP) com o objetivo que um observador externo possa monitorar remotamente essa área de interesse. Existem diversas configurações possíveis em uma RSSF, cada uma projetada levando em consideração os parâmetros cruciais ao observador. Isso faz com que uma solução proposta para determinado caso seja inviável para outro, o que caracteriza as RSSFs como dependentes da aplicação. A

Figura 2.2 mostra uma área de interesse com duas configurações de RSSF, uma com organização plana e outra com organização hierárquica.

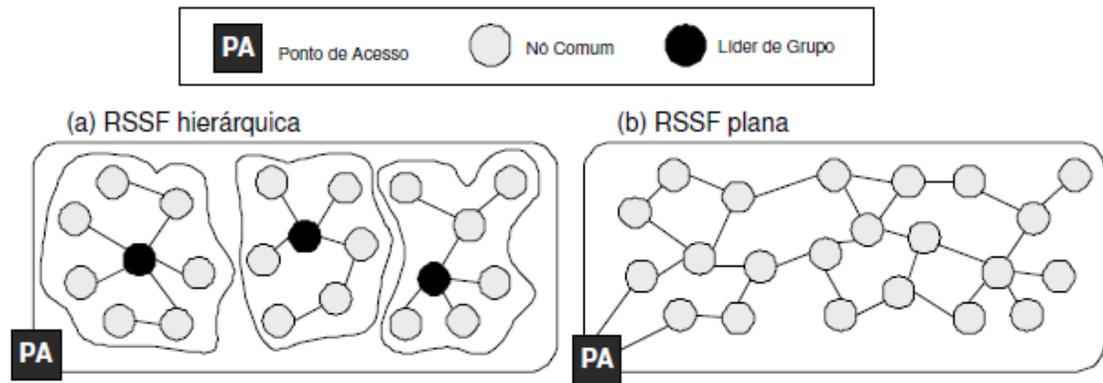


Figura 2.2. Redes de Sensores Sem Fio (Braga, 2006)

Na Figura 2.2 pode-se observar um dos primeiros parâmetros de interesse em uma RSSF, que é a sua organização (Ruiz, 2003; Braga, 2006). RSSFs planas são caracterizadas por dispositivos com a mesma prioridade, tendo qualquer deles acesso ao PA, desde que tenham alcance de transmissão para isso. Já as RSSFs hierárquicas caracterizam-se por dispositivos com diferentes prioridades, não sendo possível que qualquer dispositivo desta rede envie dados ao ponto de acesso. Nas hierárquicas alguns dispositivos são eleitos “chefes” de uma área. Com isso, se um dispositivo de determinada área tiver que enviar dados ao PA, ele deverá encaminhar o dado ao seu líder de grupo, e o seu líder de grupo o repassará ao PA. Em Ruiz, (2003) são descritas outras características de interesse nas RSSFs, expressas pela Tabela 2.1.

Tabela 2.1. *Configurações de RSSFs* (RUIZ, 2003)

Composição	Homogênea	Rede composta por dispositivos que apresentam a mesma capacidade de hardware. Eventualmente os nós podem executar software diferenciado.
	Heterogênea	Rede composta por nós com diferentes capacidades de hardware.
Mobilidade	Estacionária	Todos os dispositivos permanecem no local onde foram depositados durante todo o tempo de vida da rede.
	Móvel	Rede em que os dispositivos podem ser deslocados do local onde inicialmente foram depositados.
Densidade	Balanceda	Rede que apresenta uma concentração e distribuição de dispositivos por unidade de área considerada ideal para melhor funcionamento da rede.
	Densa	Rede que apresenta uma alta concentração de dispositivos por unidade de área.
	Esparsa	Rede que apresenta baixa concentração de dispositivos por unidade de área.
Distribuição	Irregular	Rede que apresenta uma distribuição não uniforme de nós sobre a área monitorada.
	Regular	Rede que apresenta uma distribuição uniforme de nós sobre a área monitorada.
Tamanho	Pequena	Rede composta de uma centena de elementos de rede.
	Média	Rede composta de centenas a mil elementos de rede.
	Grande	Rede composta por milhares de elementos de rede.

Dispositivos com hardware diferenciado podem atingir maiores distâncias na comunicação com outros dispositivos da rede ou mesmo com o AP e por isso são bons candidatos a líderes de grupo em redes hierárquicas, pois podem centralizar a coleta de dados de uma região e encaminhá-los diretamente ao AP sem a necessidade de encaminhamento dos dados a dispositivos intermediários, economizando energia e tempo na transmissão.

Outro fator que caracteriza uma RSSF refere-se ao modo de sensoriamento da rede. Na coleta dos dados, pode-se utilizar três modos diferentes, que são: coleta periódica, coleta contínua e coleta reativa. As características desses modos são:

- Coleta periódica – Os dispositivos da rede coletam os dados de interesse em intervalos regulares de tempo;
- Coleta contínua – Os dispositivos da rede coletam os dados continuamente;
- Coleta reativa – Os dispositivos da rede coletam dados somente quando ocorrem eventos de interesse do observador, ou quando o observador solicita a coleta.

Um exemplo de coleta periódica ocorre quando os dados coletados pela rede por um período de tempo não são de interesse ou são redundantes para o observador. Para que energia não seja gasta sem necessidade, a rede é configurada para coletar dados em intervalos de tempo, que podem ser, por exemplo, de 5 minutos, 50 minutos ou mesmo de 500 minutos, dependendo da aplicação. A coleta periódica é considerada intermediária entre as três no que diz respeito ao consumo de energia.

A coleta contínua monitora os fenômenos de interesse praticamente sem intervalos de tempo, obtendo uma quantidade maior de dados em um período de tempo com a desvantagem de consumir mais energia, diminuindo o tempo de vida da rede.

Na coleta reativa, os dados de interesse só serão captados se um evento predeterminado ocorrer, como por exemplo, um sensor de movimento ser ativado pela movimentação de algum objeto ou animal na área de interesse. Esse evento daria início à coleta de informações pela rede, podendo a rede também ser “desligada” pela falta desse evento por um intervalo de tempo também predeterminado.

As formas de comunicação (Ruiz *et al.*, 2004) também possuem alguns atributos que podem ser variados nas RSSFs, que são:

- Disseminação de dados:
 - Programada - se assemelha à coleta programada, enviando dados entre intervalos de tempo predeterminados;
 - Contínua - se assemelha à coleta contínua, enviando dados continuamente assim que são coletados;
 - Sob demanda (sob eventos) - se assemelha à coleta reativa, enviando dados somente quando solicitados pelo observador ou quando um evento predeterminado ocorre.
- Tipo de conexão:
 - Simétrica - todos os dispositivos pertencentes à rede possuem a mesma capacidade ou distância de transmissão, com exceção do A. P..

- Assimétrica - os dispositivos pertencentes à rede possuem diferentes capacidades ou distâncias de transmissão.
- Tipo de transmissão:
 - Simplex - os dispositivos da rede podem somente enviar dados, sem possibilidade de recepção. Isso faz com que as redes com esse enlace de comunicação não tenham capacidade de encaminhar dados de dispositivos vizinhos, pois não podem recebê-los;
 - Half-duplex - os dispositivos da rede podem enviar ou receber dados desde que em instantes diferentes. Em um mesmo instante os dispositivos só podem enviar ou só podem receber dados, tendo um dos dois eventos que esperar o outro terminar para que ele seja realizado. Isso possibilita que dados sejam encaminhados entre dispositivos da rede até a chegada ao AP, resolvendo o problema de envio de dados ao AP por um dispositivo que não tem alcance direto com o mesmo;
 - Full-duplex - os dispositivos da rede podem enviar e receber dados de forma simultânea, não sendo necessário aguardar o término de um dos eventos para o outro ocorrer. Isso melhora o desempenho da rede, reduzindo o atraso entre a coleta de um dado e sua chegada ao AP, principalmente em redes com grandes quantidades de dispositivos
- Fluxo de Informação:
 - Flooding (inundação) – neste tipo de rede, quando um dispositivo que não possui alcance direto com o AP vai enviar um dado, ele o repassa para todos os dispositivos que possuem alcance de transmissão. Esses dispositivos, por sua vez, o repassam para todos os dispositivos com os quais eles conseguem se comunicar, até que o dado chegue ao AP. Essa abordagem reage bem em redes com topologias dinâmicas, que sofrem alterações constantes, porém ocasiona sobrecarga na rede pelo excesso de encaminhamentos do dado, o que gera um consumo elevado de energia, reduzindo o tempo de vida da rede.
 - Unicast – neste tipo de rede, os dispositivos que não possuem alcance para comunicação direta com o AP encaminham o dado a apenas um dispositivo vizinho. Esse tipo de conexão também é conhecida como ponto a ponto. Essa forma de comunicação em geral é utilizada quando se conhece uma rota do dispositivo de origem até o AP, necessitando de uma pequena quantidade de encaminhamentos até a chegada do dado. Se não existisse informação sobre a

uma rota que liga o dispositivo que inicialmente encaminhou o dado e o AP, o dado poderia ser encaminhado para todos os dispositivos da rede antes de chegar ao AP, o que aumentaria o tempo para o observador utilizar o dado.

- o Multicast – este tipo de rede reúne características dos métodos *unicast* e *flooding*. Nele, os dispositivos enviam o dado a apenas um conjunto de vizinhos, e não a todos que possuem alcance. Esse conjunto de vizinhos que receberam o dado fica então responsável por enviá-lo ao AP ou aos seus vizinhos, até que o dado chegue ao AP. Esse método reduz a quantidade de dados trafegando pela rede, apresentando melhores resultados que o *flooding*.

A Figura 2.3 mostra as três principais formas possíveis de fluxo de informações em uma rede.

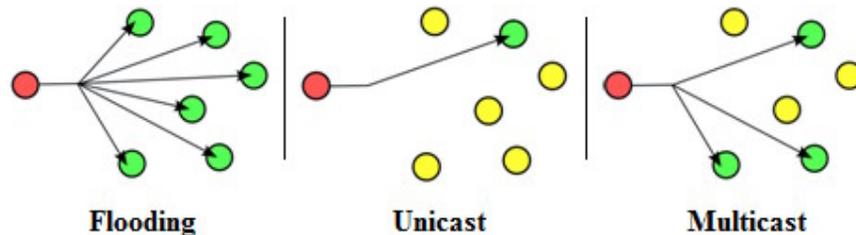


Figura 2.3. Fluxos de Informações em redes

Outra característica relacionada com a disseminação de dados em uma RSSF é a agregação, que possibilita que dados possam ser pré-processados e agregados a outros dados antes que sejam transmitidos, reduzindo a quantidade de elementos circulando pela rede.

Determinar para onde um dispositivo de uma RSSF deve enviar um dado até que ele chegue ao AP é uma tarefa que pode ter grande influência no consumo de energia, no atraso desde a coleta do dado até sua chegada ao AP, e no número de dados que vão se perder não chegando ao AP. Essa função é desempenhada nas redes *ad-hoc* pelos protocolos de roteamento, que são classificados como reativos, pró-ativos e híbridos (Abolhasan *et al.*, 2004; Rubinstein *et al.*, 2006).

Nos protocolos reativos, também conhecidos como protocolos sob demanda, as rotas são criadas no instante que existe algum dado a ser transmitido. Alguns exemplos de protocolos reativos são o AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*) (Perkins e Royer, 1999) e o DSR (*Dynamic Source Routing*) (Johnson e Maltz, 1996).

Os protocolos de roteamento pró-ativos são também conhecidos como orientados a tabela, pois mantêm uma tabela de rotas para todos os dispositivos da rede. Como exemplos

de protocolos de roteamento pró-ativos há o DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector*) (Perkins e Higly, 1994) e o OLSR (*Optimized Link State Routing*) (Clausen e Jacket, 2009).

O protocolo ZRP (*Zone Routing Protocol*) (Haas, 1997) reúne características dos protocolos reativos e pró-ativos, sendo por isso conhecido como híbrido.

Os protocolos AODV, DSR, DSDV, OLSR e ZRP foram criados com o intuito de atuar em redes *ad-hoc*, porém, também podem ser utilizados normalmente nas RSSFs. Para as RFFSs, existem protocolos de roteamento específicos, que se classificam em roteamento plano e roteamento hierárquico (Ruiz et al., 2004a).

Os protocolos de roteamento plano são caracterizados por não distinguirem os dispositivos da rede, mantendo a mesma prioridade entre todos na rede. Exemplos de protocolos de roteamento plano são o DD (*Directed Diffusion*) (Intanagonwiwat et al., 2000) e o SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*) (Heinzelman e Kulik, 1999).

Os protocolos de roteamento hierárquico caracterizam-se pela distinção entre dispositivos da rede, criando dispositivos líderes conhecidos como *cluster-heads*. Esses dispositivos líderes são responsáveis por coletar os dados de dispositivos de uma determinada área e enviá-los ao AP. Nessa configuração hierárquica, dispositivos comuns não podem se comunicar diretamente com o AP, sendo obrigatória a ação dos líderes. Os dispositivos líderes podem ainda realizar agregação de dados antes de encaminhá-los ao AP. Como exemplos de protocolos hierárquicos, têm-se o LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) e o TEEN (*Threshold Sensitive Energy Efficient*) (Ruiz et al., 2004a).

Uma característica das RSSFs, descrita também em Ruiz (2003) é o termo Qualidade de Serviço (QoS), que mede a qualidade do serviço prestado pela rede, seguindo parâmetros como sensoriamento e disseminação. No parâmetro sensoriamento são tratados assuntos relativos à forma como os dados são sensoriados, como a precisão dos sensores. Uma função importante que pode melhorar esse parâmetro é o controle de densidade das RSSFs, gerenciando o número de dispositivos em uma área monitorada, evitando que existam muitos dispositivos em uma mesma área, o que aumentaria a quantidade de dados trafegando, congestionando a rede e consumindo energia sem necessidade. Por outro lado, uma pequena quantidade de dispositivos em uma área de interesse pode não monitorar de forma satisfatória os fenômenos que nela ocorrerem.

No parâmetro disseminação, são tratados assuntos relacionados à comunicação e a capacidade da rede de enviar dados dos nós sensores até o AP.

Um exemplo do impacto desses parâmetros de QoS pode ser dado considerando o monitoramento contra incêndios. Se um incêndio ocorrer em uma determinada área e o

observador não for informado, os requisitos de QoS dessa rede não foram satisfeitos. Nesse exemplo, pode ter ocorrido que no local onde o fogo começou, não havia nenhum nó sensor para captar esse evento, que seria um problema relacionado ao parâmetro sensoriamento, pois a área sensoriada não está com uma boa distribuição ou a quantidade de nós sensores nela é insatisfatória para essa aplicação. Outro fator que pode ter impedido o observador de ser informado do fenômeno pode ter sido a perda do dado pela rede, pois o dado pode ter sido captado por um nó sensor, mas não chegou ao AP, o que está relacionado ao parâmetro disseminação.

2.4. Características de Funcionamento de Protocolos de Roteamento

Esta seção descreve as principais características de funcionamento dos protocolos AODV, DSDV e LEACH.

2.4.1. Protocolo de Roteamento AODV

Bansal *et al.* (2003) e Bai e Shingal (2006) fazem um estudo deste protocolo, caracterizado como reativo (sob demanda) utilizando uma tabela de roteamento em cada dispositivo da rede que conta com uma entrada para cada destino. Para criação dessa tabela, cada dispositivo tem que iniciar um processo chamado de descoberta de rota, que consiste em enviar uma mensagem a todos os dispositivos com os quais ele possui alcance de transmissão. Essa mensagem de solicitação é conhecida como RREQ (*Route Request*) ou solicitação de rota, e inicialmente contém apenas o identificador do dispositivo que enviou essa solicitação, sendo incrementada com o identificador de cada dispositivo por onde passa. Quando um dispositivo da rede recebe uma RREQ, ele atualiza sua tabela de rotas, verificando se a rota do dispositivo que originou a RREQ até ele é menor do que a rota anterior presente nessa mesma entrada da sua tabela de rotas. Se a entrada na tabela de rotas referente ao dispositivo que originou uma RREQ estiver vazia, a rota até esse dispositivo origem é inserida. Vale ressaltar que a rota contida na RREQ descreve o caminho percorrido de um dispositivo origem até o atual, sendo necessário que o atual inverta a ordem da rota para inserção na sua tabela de rotas. Além de inserir ou atualizar sua tabela de rotas mediante uma RREQ, o dispositivo que a recebeu deve inserir o seu identificador na mesma, e repassá-la a todos os seus dispositivos vizinhos. Outra tarefa do dispositivo que recebe a RREQ é a de enviar uma mensagem de volta, para que o nó origem possa atualizar a sua tabela de rotas. Essa mensagem de volta é

conhecida como RREP (*Route Reply*). Uma RREP também deve ser repassada para todos os dispositivos vizinhos ao dispositivo que recebeu a RREP, pois é nessa mensagem que o nó origem encontrará a rota dele até o nó que inicialmente ele solicitou. Esse processo de repasse de RREQs e RREPs termina quando o nó origem receber uma RREP que contém uma rota dele até o dispositivo para o qual ele deseja transmitir dados.

A Figura 2.4 exemplifica a descoberta de rotas pelo protocolo AODV. Nesse exemplo, o dispositivo 1 deseja transmitir dados para o dispositivo 6. Para isso ele inicia o processo de descoberta dessa rota, sendo que no instante 1, envia uma mensagem RREQ para todos os dispositivos com os quais possui alcance de transmissão (característica mostrada na Figura 2.4 por um círculo no instante 1). No instante 2, todos os dispositivos que receberam a mensagem de RREQ retornam para o dispositivo 1 uma mensagem de RREP, além de uma mensagem RREQ para todos os seus dispositivos vizinhos. No instante 3, apenas o dispositivo 6 atua, pois como recebeu uma mensagem RREQ do dispositivo 5 no instante anterior, retorna um RREP para ele. No instante 4, o dispositivo 5 envia a RREP recebida no instante anterior a todos os seus vizinhos. Como ele só possui alcance de transmissão com os dispositivos 6 (que acaba de lhe enviar a mensagem) e 1, ele só envia o RREP para o dispositivo 1. Com isso, o dispositivo 1 agora possui uma rota para transmitir dados para o dispositivo 6, e pode então começar a transmissão dos dados.

Com a Figura 2.4, pode ser observada a grande quantidade de dados que trafegam pela rede para descobrir a rota entre dois dispositivos, o que causa gasto de energia elevado e atraso no tempo de entrega dos dados da origem até o destino.

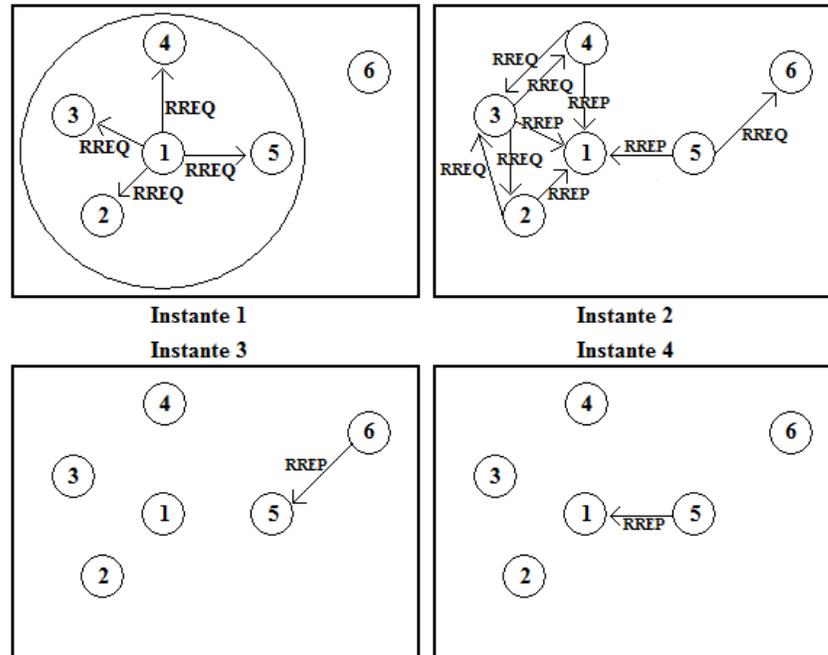


Figura 2.4. Descoberta de rota no protocolo AODV

Outra característica a ser observada na Figura 2.4, está no instante 2, em que os dispositivos 2, 3 e 4 enviam RREQs uns aos outros e RREP apenas ao dispositivo 1. Isso ocorre porque por meio de um número de sequência presente na RREQ, o dispositivo 3, por exemplo, identifica que foi o dispositivo 1 que a encaminhou, e então retorna apenas uma RREP para ele. Esse número de sequência existe para evitar que ocorram laços no envio de mensagens na rede, pois sem ele, no instante 2 os dispositivos 2, 3 e 4 enviariam RREQs para o dispositivo 1, e ele no próximo instante para o 2, 3 e 4, e assim sucessivamente.

Um terceiro tipo de mensagem na descoberta de rotas é a RERR (*Route Error*), disseminada pela rede quando um dispositivo verifica que determinada entrada da sua tabela de rotas é inválida, levando a perda dos dados enviados.

Como o protocolo AODV inicia o processo de descoberta de rotas apenas quando necessita transmitir dados, ele é considerado uma boa opção em redes dinâmicas, em que os dispositivos podem se movimentar, garantindo altas taxas de entrega de dados ao AP. Por outro lado, em redes com muitos dispositivos, o desempenho do AODV diminui, pois a grande quantidade de dados trafegando pela rede para descoberta de novas rotas pode congestioná-la, causando lentidão e até mesmo perda de dados. Uma restrição é encontrada no AODV quando utilizado em redes sem enlace bidirecional (*full-duplex*), pois os dispositivos

em um mesmo instante de tempo podem precisar enviar um RREQ para um dispositivo, e ainda receber um RREP de outro.

2.4.2. Protocolo de Roteamento DSDV

Segundo Garousi (2005) e Mahdupour *et al.* (2009) este protocolo também apresenta tabelas de roteamento individuais em cada dispositivo da rede, contendo informações de todas as rotas possíveis para cada dispositivo. Ele é um protocolo pró-ativo, que cria rotas entre os dispositivos mesmo sem dados para envio. Essas rotas são atualizadas em intervalos de tempo predeterminados, o que pode acarretar grande perda de dados em redes dinâmicas, pois a rede pode ter sofrido alguma alteração invalidando algumas rotas, e ainda assim, o protocolo continua a usar essa rota inválida perdendo dados até que o protocolo atualize as tabelas de roteamento dos dispositivos da rede, encontrando uma nova rota válida.

Em redes com muitos dispositivos que não sofrem alteração constante na topologia, o DSDV apresenta resultados satisfatórios se comparados ao protocolo AODV, pois gera menor sobrecarga de dados trafegando pela rede, visto que realiza o processo de atualização de rotas com menos frequência que o AODV.

2.4.3. Protocolo de Roteamento LEACH

Em Ruiz (2003) é feita uma descrição desse protocolo de roteamento criado para ser utilizado nas RSSFs. Neste protocolo ocorre na fase inicial uma eleição entre os dispositivos da rede que são organizados por grupos. Cada grupo fica responsável por eleger um dispositivo chefe, conhecido como *cluster-head*, e que será responsável por encaminhar ao AP todos os dados do seu grupo. Ainda em Ruiz (2003) são identificadas as características desejáveis em uma rede hierárquica, que são a criação de *cluster-heads* bem posicionados em relação ao grupo e ao AP, e a criação balanceada do número de dispositivos por grupo. Estas duas características desejáveis não são garantidas no LEACH, que pode criar grupos com mais de um *cluster-head* e ainda criar grupos com apenas dois dispositivos. Ruiz (2003) propõe também uma forma de reduzir esses problemas por meio da eleição de *cluster-heads* de forma indireta por uma função de gerência que possui uma visão global da rede. No LEACH, a comunicação entre os *cluster-heads* e o AP pode ser feita de forma direta. Nesse caso, os *cluster-heads* eleitos devem conseguir transferir dados diretamente ao AP. Para tanto, é necessário que possuam potência de transmissão maior do que os demais dispositivos comuns do seu grupo, o que causa maior consumo de energia, diminuindo o tempo de vida desse dispositivo. Para

resolver esse problema, novas eleições de *cluster-heads* podem ser realizadas, balanceando o gasto de energia entre os dispositivos dos grupos. O problema é que para se eleger um novo *cluster-head*, mensagens devem ser enviadas pela rede, o que também causa gasto de energia. Uma função que mede a energia remanescente no *cluster-head*, a energia remanescente nos dispositivos do grupo e o consumo médio de energia para eleição de um novo *cluster-head* pode ser criada para decidir quando realizar uma nova eleição nos grupos da rede.

2.5. Camadas de Rede de um Nó Sensor

A seção anterior abordou as principais características dos protocolos de roteamento de dados para as redes *ad-hoc* e para as RSSFs, incluindo exemplos com suas características de trabalho. Outra característica interessante a ser considerada nessas redes, é o estudo das camadas pelas quais os dados passam internamente ao nó sensor até que sejam enviados pela antena por meio das ondas eletromagnéticas. Podem ser encontrados detalhes da estrutura e interação entre essas camadas em Song e Hatzinakos (2007), Wei e Zang (2008) e em Bouam e Othman (2004). A Figura 2.5, por meio de um diagrama de blocos, ilustra essas camadas, que são descritas a seguir.

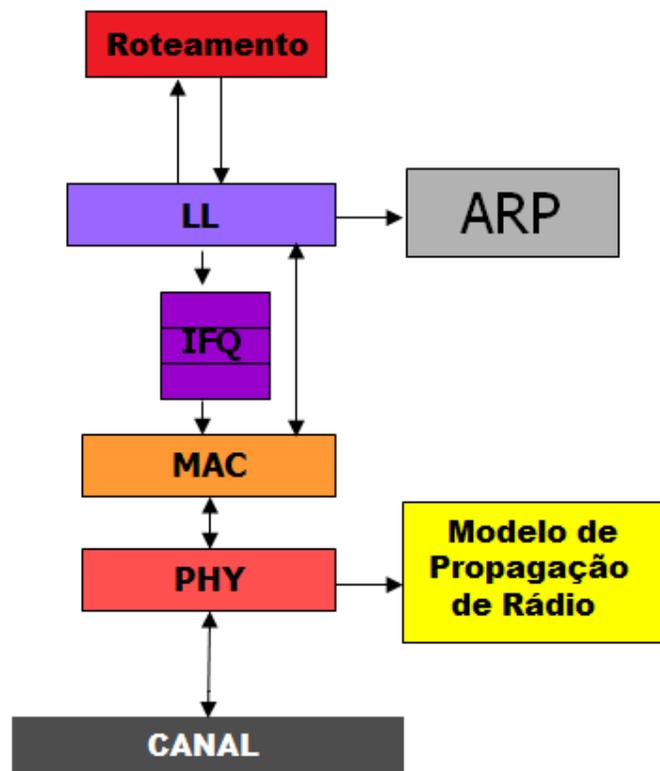


Figura 2.5. Camadas de rede de um nó sensor móvel

Todos os protocolos de roteamento descritos anteriormente se enquadram no bloco “ROTEAMENTO”, o qual é o responsável por encaminhar ao bloco “LL” o identificador do dispositivo ao qual o nó vai enviar dados, juntamente com a porta que será utilizada para esse envio. O bloco “LL” corresponde à camada de rede LL (*Link Layer*) ou camada de ligação. Essa camada é a responsável pela interface entre a camada de roteamento e a camada MAC (*Media Access Control*). A ligação entre as camadas é feita por meio da conversão do identificador do dispositivo passado pelo “ROTEAMENTO” para um endereço físico, utilizado pela camada MAC para encaminhar o dado ao destino. Para realização dessa conversão, a LL realiza uma consulta ao ARP (*Address Resolution Protocol*), o qual possui uma tabela que associa um identificador de dispositivo a um endereço físico da rede. Após receber o endereço físico do ARP, a camada LL pode encaminhá-lo diretamente, ou encaminhá-lo a uma fila para aguardar o seu atendimento pela camada MAC. Essa fila é representada pela IFq (Interface queue) (fila da interface). Caso a camada LL necessite enviar dados para a camada MAC e a IFq esteja cheia, os dados serão perdidos.

A camada MAC após receber um endereço físico, o repassa para a camada PHY (camada física), responsável pela interface de rede ou *network interface* (NetIF). Além da interface, a camada PHY contém modelos de propagação de rádio, como o *Friss-space*, utilizado para transmissão em pequenas distâncias, e o *Two-ray ground*, utilizado quando se necessita transmitir a maiores distâncias. O tipo de antena utilizado também se enquadra na camada PHY, como antena direcional ou omnidirecional (propagação em 360 graus). Por fim, o bloco “CANAL” representa os canais (frequências) nos quais a antena pode transmitir, como 915 MHz ou 2400 MHz.

2.6. Nós Sensores Sem Fio

Uma RSSF é composta por um conjunto de dispositivos chamados nós sensores. Esses nós sensores são compactos, e realizam sensoriamento de um ambiente, processamento e comunicação dos dados coletados. Os nós sensores são projetados para ter o menor tamanho possível atendendo as características da uma RSSF, o que faz com que eles tenham baixa capacidade de processamento, de armazenamento de dados, alcance de transmissão e energia disponível. Para otimização de uma RSSF, deve-se considerar tais restrições, o que possibilita menor consumo de recursos no funcionamento da rede.

Os nós sensores são formados por dispositivos de hardware que possibilitam a eles serem uma mini-unidade computacional, composta por microcontrolador, fonte de energia (bateria), unidade de transmissão de dados e sensores, que podem ser de temperatura e umidade do ar, pressão barométrica, de chuva, entre outros. Dentre esses dispositivos, o microcontrolador é responsável por integrar os demais dispositivos, pois conta com unidades de conversão analógico-digital (AD) e digital-analógica (DA), responsáveis pela interface de comunicação com os sensores, além de um microprocessador integrado a uma memória RAM (*Random Acces Memory*) e ROM (*Read Only Memory*) para armazenar e executar as instruções que ele recebe. O microcontrolador ainda armazena os dados recebidos dos sensores na memória de trabalho, e possibilita o envio desses dados por meio da unidade de transmissão, que também se comunica com o microcontrolador por meio das unidades de conversão AD e DA. Os transmissores presentes em nós sensores, na maioria dos casos, utilizam um dispositivo de rádio que envia ondas eletromagnéticas para transmissão de dados, com frequências que variam entre KHz e GHz.

A Figura 2.6 mostra por meio de um diagrama de blocos os componentes de hardware presentes em um nó sensor.

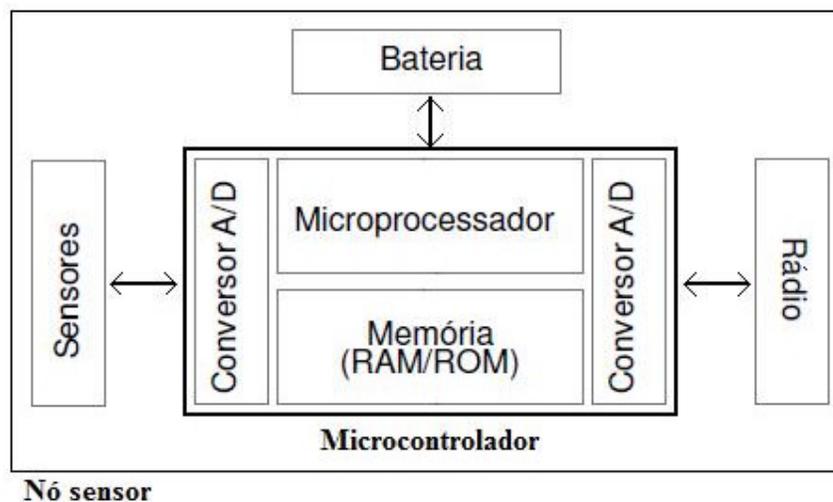


Figura 2.6. Dispositivos de Hardware de um nó sensor

Uma das maiores preocupações no projeto de um nó sensor está relacionada ao consumo de energia, pois esses dispositivos serão usados principalmente no monitoramento de áreas remotas, o que inviabiliza a troca de baterias. Uma opção que resolveria esse problema seria a inserção de placas solares integradas ao nó, porém, essas placas requerem grandes dimensões, o que fere os princípios de projeto dos nós sensores. Além disso, nós

sensores podem atuar em ambientes que não dispõem de luz solar, o que tornaria as placas solares inúteis.

Devido à grande restrição energética, os microcontroladores utilizados nos nós sensores possuem microprocessadores com baixas frequências, visando menor consumo de energia, pois quanto maior a frequência de trabalho, maior será o consumo de energia. A frequência com que são realizadas leitura e escrita de dados na memória do microcontrolador também possui grande influência no consumo de energia do nó sensor.

O consumo de energia impacta ainda na transmissão de dados em um nó sensor. Se fosse possível que todos os nós em uma rede possuíssem alcance suficiente para comunicação direta com o AP, não teria sentido o repasse de dados entre nós da rede antes da chegada ao AP, e algoritmos de roteamento não teriam utilidade. Os repasses de dados na rede acontecem então devido aos nós sensores possuírem pequeno alcance de transmissão, pois suas antenas possuem tamanho limitado. Mesmo com tamanho limitado, podem ser obtidas distâncias de transmissão variáveis aumentando ou diminuindo a potência (ganho) da antena, o que pode ser ajustado para cada aplicação, consumindo mais ou menos energia na transmissão de dados (Hill e Culler, 2002). Os eventos que mais influenciam no consumo de um nó sensor são o envio e a recepção de dados, sendo necessário mais energia para o envio do que para a recepção de dados.

O tipo e a quantidade de sensores presentes em um nó sensor também influenciam no seu consumo de energia, pois mais sensores consomem mais energia, mesmo esse consumo sendo considerado baixo em relação ao consumo para o envio e a recepção de dados. Um sensor é um dispositivo capaz de captar uma variável física e mensurá-la por meio de escalas e padrões determinados, como a escala de graus Celsius para temperatura. Existem sensores com interface analógica e sensores com interface digital (Wilson, 2005). Ainda segundo Wilson (2005), sensores analógicos e digitais utilizam na maioria dos casos um circuito que contém um capacitor ou um resistor que são sensíveis a mudanças como a temperatura e a umidade, o que faz com que os valores medidos de resistência ou de capacitância variem, o que possibilita associar cada valor de resistência ou capacitância com um valor de temperatura ou umidade, sendo possível após essa associação mostrar qual o valor de temperatura ou umidade para cada valor de resistência ou capacitância do sensor. Essa associação também pode ser feita utilizando uma função matemática que converte automaticamente um valor de resistência ou de tensão para um valor de temperatura em graus Celsius ou de umidade relativa em porcentagem.

Os sensores digitais coletam os dados de forma parecida com os analógicos, com o diferencial de que possuem um circuito integrado de controle para a interface entre o sensor e algum outro dispositivo, como um microcontrolador. Nos sensores digitais não é necessário o processo de calibragem, pois ele já acontece no próprio sensor por meio da conversão dos sinais analógicos (valores de resistência, capacitância ou mesmo tensão) para sinais digitais. Para padronizar a comunicação desses sensores com outros dispositivos, foram criados alguns padrões de comunicação, como o SPI, I2C e 2-wire, que definem como os dados devem ser transmitidos e em que instante.

Uma vantagem encontrada nos sensores analógicos é o seu funcionamento contínuo sem intervalos para o envio de um valor de resistência ou de capacitância. Já os sensores digitais, por serem mais complexos e necessitarem de conversão interna AD antes do envio do dado, não conseguem medir uma grandeza continuamente, e sim em intervalos de tempo, que atualmente são tão pequenos que não causam problemas no uso desses sensores.

A seguir são apresentados alguns exemplos de sensores disponíveis no mercado, e que podem ser utilizados pelos nós sensores:

- Sensirion SHT1x (SHT10, SHT11 e SHT15) (Sht1, 2009) – Sensores digitais integrados que medem a temperatura e a umidade relativa do ar. Possuem conversores AD integrados com resolução de 12 bits no sensor de umidade relativa e 14 bits no sensor de temperatura, valores que podem ser alterados modificando um registrador interno no sensor. Conta também com um circuito que controla a interface de comunicação, sendo compatível com a interface serial 2-wire. O sensor SHT10 possui uma precisão no sensor de temperatura de +/- 0,5°C e de +/- 4,5% no de umidade relativa. O SHT11 possui no de temperatura +/- 0,4°C e no de umidade relativa +/- 3% enquanto que o SHT15 possui +/- 0,3°C no de temperatura e +/- 2% no de umidade relativa. A tensão de trabalho dos três modelos de sensores varia entre 2,4 e 5,5 Volts, sendo mais recomendada a tensão de 3,3 Volts. A faixa de operação dos três é a mesma, sendo entre -40 °C e +123,8 °C para a temperatura e entre 0% e 100% para umidade relativa. A corrente de consumo dos três também é a mesma, sendo de 0,55mA utilizando alimentação de 3,3 Volts e 1mA utilizando 5,5 Volts.
- Microchip MCP9804 (Mcp, 2009) – Sensor digital de temperatura do ar com precisão de +/- 0,25 °C e faixa de medida entre -40 e +125 °C. Possui interface de comunicação I2C e corrente de consumo de 200µA.
- Davis 6450 (DAVIS, 2009) – Sensor analógico para monitoramento de radiação solar global. Atua medindo ondas magnéticas com comprimento entre 400 e 1100

nanômetros com precisão de +/- 2%. Possui tensão de trabalho de +3 Volts com tolerância de +/- 10% e corrente de consumo de 1mA.

Nós sensores podem realizar processamento dos dados coletados antes de disseminá-los pela rede, pois o consumo com processamento é menor do que o consumo com transmissão. Para isso deve ser implementada uma política para coletar vários dados antes do envio, possibilitando a comparação entre eles para verificar se são iguais, necessitando que apenas um deles seja enviado pela rede, economizando assim energia.

Existem nós sensores com fins comerciais, como os produzidos pela empresa *Crossbow Technology, Inc.* (Crossbow, 2009) e nós sensores com fins de pesquisa, como o Smart Dust (Smart, 2009) da Universidade da Califórnia, campus Berkeley, e o JPL Sensor Webs (Jpl, 2009) desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).

A Figura 2.7 mostra os nós sensores disponibilizados pela Crossbow, o Mica2 (Mica2, 2009) e o Micaz (Micaz, 2009). Essa mesma figura possibilita a observação de que a maior dimensão nesses nós sensores está na parte inferior, onde está o reservatório para as pilhas, que fornecem energia.

A Tabela 2.2 cita os principais componentes de hardware presentes no nó sensor Mica2.



Figura 2.7. Nós sensores da Crossbow

Tabela 2.2. Características de hardware do nó sensor Mica2

Transmissor	Rádio transmissor CC1000 (CHIPCON, 2009) pertencente à linha Chipcon de produtos da empresa Texas Instruments (TEXAS, 2009). Opera com frequências de 868/915MHz, atingindo taxa máxima de transmissão de 38,4 Kbps, com alcance variável entre 5 e 91 metros, mudando a potência de transmissão entre 0,01mW e 3,16mW. Consumo menor que 1 μ A no modo sleep, 10 mA para recepção e 27 mA para envio com máxima potência. Utiliza camada de acesso ao meio (MAC) padrão IEEE 802.11.
Processador	Microcontrolador Atmel ATmega 128L, que trabalha com clock base de 4MHz, obtendo baixo consumo de energia. Consome 8mA quando ativo, e 15 μ A no modo sleep.
Sensores	Placas expansoras, como a MTS300 (MTS, 2009), disponibilizam sensores de temperatura e umidade do ar, pressão barométrica, acelerômetro, magnetômetro, de ruído, de luminosidade e GPS (Global Positioning System).
Baterias	Duas baterias AA com tensão de operação 2,7-3,3V.
Memória	Memória de programa do tipo FLASH contendo 128Kbytes e memória não volátil do tipo EEPROM contendo 512Kbytes, além de 4Kbytes de memória RAM.
Interface	Possui 51 pinos para expansão, conta com um conversor AD de 10 bits e ainda dá suporte para as interfaces de comunicação digitais I2C, SPI e UART.

O nó sensor Micaz apresenta as mesmas características de hardware do nó Mica2 apresentadas na Tabela 2.2, com exceção da unidade de transmissão. No Micaz a unidade de transmissão é a CC2420 (Chipcon, 2009a), fabricada também pela Texas Instruments, trabalhando com uma frequência mais elevada, que varia entre 2400 e 2483MHz, conseguindo uma taxa de transmissão de até 250Kbps, com alcance que varia entre 75 e 100

metros em área aberta, e entre 20 e 30 metros em área fechada. A camada de acesso ao meio utilizada é a IEEE 802.15, desenvolvida especialmente para aplicações com severas restrições de energia. A corrente de consumo para recepção de dados é de 19,7 mA e de 17,4 mA para transmissão com máxima potência.

Os dois nós sensores descritos utilizam o Sistema Operacional (SO) TinyOS (Tinyos, 2009), o qual foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Berkeley. Consiste de um SO open-source (código aberto), projetado para ser utilizado em nós sensores nas RSSFs.

No Brasil, existe um projeto chamado BEAN (*Brazilian Energy-Efficient Architectural Node*) desenvolvido por pesquisadores do Departamento de Ciência da Computação (DCC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e que tem o objetivo de desenvolver um nó sensor utilizando componentes comercialmente disponíveis. O microcontrolador utilizado é da família MPS430 (MPS, 2009) é produzido pela Texas Instruments. Ele utiliza uma arquitetura RISC de 16 bits e vem equipado com um conjunto de conversores AD e DA facilitando a integração de sensores. A unidade de transmissão será a mesma do nó sensor Mica2, a CC1000 e o SO será o YATOS (*Yet Another Tiny Operating System*) que está sendo desenvolvido também por pesquisadores da UFMG.

Ferramentas de Simulação e Trabalhos Relacionados

A simulação de sistemas reais por meio de ferramentas computacionais possibilita analisar pontos negativos de um produto ou sistema antes de sua comercialização, como a falha de um projeto aerodinâmico em um avião, ou do sistema de freios de um automóvel. Neste trabalho é proposta uma análise por meio de simulações de RSSFs objetivando prever quais características simuladas se adequam mais ao monitoramento da viticultura. A seguir são descritas algumas ferramentas para simulação e análise de dados das RSSFs.

3.1. Network Simulator 2 (NS-2)

O NS-2 é uma ferramenta de software robusta desenvolvida por pesquisadores da Universidade de Berkeley com o objetivo de realizar simulações de redes de computadores. É disponibilizada gratuitamente para uso, incluindo o seu código fonte, o que possibilitou que seu desenvolvimento se estendesse às mais variadas instituições de ensino, por meio da criação de novos módulos e funcionalidades, o que a tornou uma ferramenta colaborativa.

NS-2 é essencialmente um simulador de eventos discretos, ou seja, é um sistema de simulação dinâmico que sofre alterações pela ocorrência de eventos, como o envio de um dado pela rede (Maia *et. al.*, 2005). Conta com um relógio virtual que norteia os eventos

discretos que ocorrem na simulação. Por meio dos vários módulos disponibilizados para essa ferramenta, ela se tornou uma das principais ferramentas na simulação de redes no meio acadêmico, auxiliando o ensino e a pesquisa na área de redes de computadores. Para instalação e correto funcionamento o simulador NS-2, são necessários alguns componentes de software, como o Tcl (*Tool Command Language*) e Tk (*ToolKit graphical user interface*) (Tcltk, 2009), o OTcl (Tcl orientada a objetos) (Otbl, 2009) e o TclCl (*Tool Command Language with Classes*) (Tclcl, 2009). Na Figura 3.1 pode ser observada a organização dos módulos de software que compõem o NS-2.

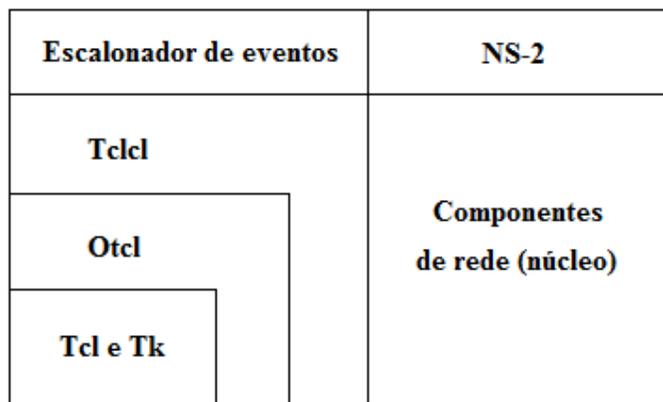


Figura 3.1. Componentes de software da ferramenta NS-2

Os componentes de rede que são considerados o núcleo do simulador são escritos em linguagem C++ e OTcl. OTcl é uma extensão de software feita em linguagem C que possibilita programar orientado a objetos na linguagem Tcl. Para realização de simulações no NS-2, cria-se um script em linguagem OTcl contendo as configurações e parâmetros da simulação, como o protocolo de roteamento, o número de dispositivos na rede, o tempo de simulação, entre outros. Esse script é então interpretado pelo NS-2 para que a simulação seja realizada, seguindo a descrição do script. O NS-2 pode então ser considerado um interpretador de linguagem OTcl que possui um simulador de eventos discretos e bibliotecas com componentes escritos na linguagem C++ para simulação da rede e dos eventos.

O Tk é um componente de software para desenvolvimento de interface gráfica que possibilita a criação de interfaces baseadas na linguagem Tcl para visualização dos eventos ocorridos nas simulações. O componente Tclcl fornece uma interface entre o NS-2 e o OTcl, provendo links (ligações) entre objetos e as variáveis das duas linguagens.

As funcionalidades do NS-2 podem ser estendidas de duas formas: adição de módulos com códigos escritos em C++ (requer recompilação de todo o código C++ do simulador) e

adição de módulos com códigos escritos em OTcl (requer compilação apenas da extensão OTcl).

Com o objetivo de facilitar o entendimento de uma simulação, a ferramenta NS-2 integra módulos de visualização como o NAM (*Network Animator*) (Nam, 2009) e o XGRAPH (Xgraph, 2009). O NAM é capaz de desenhar os dispositivos da rede simulada utilizando um arquivo gerado pelo NS-2 com extensão “.nam”. Pela leitura desse arquivo, o NAM é capaz de mostrar quais eventos ocorreram e em que instantes, como o envio de um dado de um dispositivo para outro no instante 5 segundos. O NAM possibilita ainda criar configurações de rede de forma gráfica, inserindo dispositivos e as ligações entre eles.

A ferramenta XGRAPH possibilita a análise dos dados relativos a determinada simulação por meio da análise do arquivo com extensão “.tr” gerado pelo NS-2 que contém informações sobre quais eventos ocorreram, e em que instantes de tempo, como dados enviados e dados perdidos por determinado dispositivo. A partir desse arquivo de simulação, conhecido como *trace*, o XGRAPH pode desenhar gráficos referentes à simulação em análise. O NS-2 possui alguns formatos padrões de *trace* como o *wired*, o *satellite*, e o *newtrace*, o que facilita a criação de programas próprios para análise dos dados. Para as RSSFs o formato de *trace* padrão é o *newtrace*, e pode ser observado na Figura 3.2.

```
s -t 0.267662078 -Hs 0 -Hd -1 -Ni 0 -Nx 5.00 -Ny 2.00 -Nz 0.00  
-Ne -1.000000 -Nl RTR -Nw --- -Ma 0 -Md 0 -Ms 0 -Mt 0 -Is 0.255  
-Id -1.255 -It message -Il 32 -If 0 -Ii 0 -Iv 32
```

Figura 3.2. Exemplo do formato *newtrace*

Alguns dos campos presentes na Figura 3.2 são chaves para a análise de uma simulação, como o “s”, que significa send (envio) de um dado, o “-t” que indica o instante que o dado foi enviado. Variáveis que começam com “-H” trazem informações da simulação de um próximo salto de um dado, como o “-Hs” que identifica o dispositivo atual e o “-Hd” que indica o dispositivo de destino do próximo salto. Variáveis que começam com “-N” trazem informações sobre os nós, como o identificador (“-Ni”), as coordenada x, y e z no espaço em que se encontra o nó (“-Nx”, “-Ny”, “-Nz”) e a quantidade de energia restante do nó sensor (“-Ne”) . Variáveis iniciadas com “-I” trazem informações sobre os pacotes (dados) no nível IP (Internet Protocol), como o identificador do dispositivo coletor (AP) juntamente com a porta utilizada (“-Is”), o identificador do dispositivo do próximo salto (“-Id”), e o tipo e o

tamanho do pacote enviado (“-It” e “-Il”). Já variáveis começadas com “-M” trazem informações do pacote no nível da camada MAC.

3.2. TraceGraph

TraceGraph (Lukoit *et al.*, 2009) é uma ferramenta para análise de arquivos de trace dos tipos *wired*, *satellite* e *newtrace* gerados pela ferramenta NS-2 que funciona tanto em plataforma Windows como em Linux e possui como pré-requisito para instalação a ferramenta Matlab (Matlab, 2009).

O TraceGraph disponibiliza 238 tipos diferentes de gráficos em duas dimensões (2D) e 12 tipos de gráficos em três dimensões (3D) compreendendo modelos pré-estabelecidos para análise de simulações, como estatísticas de atraso médio de envio de dados, número total de pacotes enviados na rede, número total de pacotes encaminhados, número total de pacotes perdidos, entre outras. Os gráficos gerados podem ser armazenados em arquivos com os formatos de imagem *jpeg* e *tiff*. A Figura 3.3 apresenta um exemplo de gráfico gerado por essa ferramenta, que mostra o número total de pacotes enviados pelos dispositivos da rede.

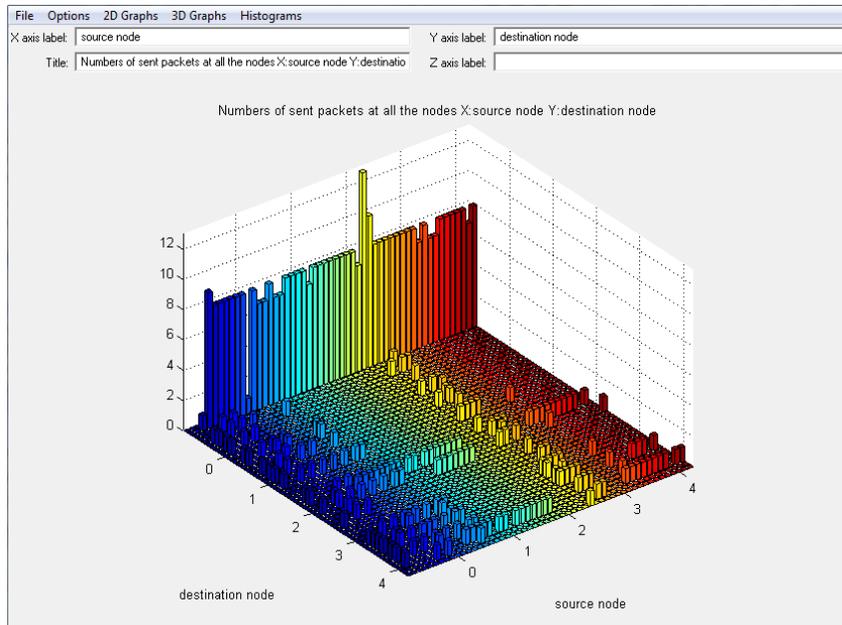


Figura 3.3. Ferramenta de geração de gráficos TraceGraph

Pela Figura 3.3 conclui-se que o dispositivo receptor (AP) também conhecido como dispositivo sorvedouro encontra-se na coluna com maior tamanho, e possivelmente é o dispositivo (nó sensor) com identificador “0”.

3.3. MannaSim

O MannaSim (Mannasim, 2009) é um módulo de software que foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Minas Gerais durante o desenvolvimento da tese proposta por Ruiz (2003) para ser integrado a ferramenta de simulação de redes NS-2 com o objetivo de suprir a falta de funcionalidades e parâmetros para simulação das RSSFs, integrando, por exemplo, novos protocolos, como o LEACH.

O MannaSim compreende um conjunto de classes que podem ser utilizadas pelos pesquisadores na simulação das RSSFs, sendo estas classes as responsáveis por estender as funções da ferramenta NS-2 para as RSSFs.

A seguir são descritas as principais funcionalidades implementadas pelo MannaSim (Ruiz *et al.*, 2003; Ruiz, 2003).

- Tipo de sensor e faixa de operação - Por meio de um gerador de dados aleatórios, possibilita a simulação de diferentes tipos de sensores como de temperatura e umidade, além da faixa de operação desejada para cada um.
- Coleta de dados contínua, periódica e sob demanda - Por meio de um temporizador, permite a coleta de dados programada e contínua. A coleta sob demanda ocorre mediante requisição.
- Disseminação de dados contínua, programada, e sob demanda - Por meio de um temporizador variável, permite utilização da disseminação programada. Para disseminação sob demanda, possui um gerador de solicitações, que possibilita informar ainda o tipo de dado solicitado. A disseminação contínua ocorre logo após a coleta do dado.
- Redes planas e hierárquicas - Por meio da criação de diferentes modelos de comportamento dos nós sensores, é possível a criação de nós sensores comuns e de nós sensores líderes.
- Redes com mais de um AP - Criação de uma aplicação que possibilita a comunicação dos dispositivos da RSSF com um observador externo.

- Redes homogêneas e heterogêneas - Possibilidade de configurar características diferenciadas aos nós sensores, como frequência do processador e alcance da antena transmissora.
- Diferentes modelos de perda de energia - Possibilidade de modificação do modelo de energia padrão, criando novos modelos de perda de energia.
- Diferentes tipos de processamento de dados - Permite a criação de modelos que processam os dados antes da disseminação, como realização de agregação ou fusão dos dados.
- Diferentes protocolos de roteamento - Criação de protocolos de roteamento na camada de aplicação, como o LEACH e o DD.

3.4. Trabalhos Relacionados

Esta seção descreve alguns trabalhos relacionados com a aplicação das redes de sensores sem fio no monitoramento agrícola e ambiental.

Em Chiti *et al.*, (2007) é realizado um estudo sobre o consumo de energia nas RSSFs, Por meio da criação de uma nova camada de transporte, denominada STAR MAC, foram realizados teste de consumo de energia e de qualidade de serviço da rede (QoS), objetivando validar o modelo proposto.

Em Galmes (2006) por meio de modelos matemáticos baseados em amostragem aleatória (estocástica) foram feitos estudos objetivando minimizar o consumo de energia das RSSFs. Para criação do modelo matemático, os autores se basearam em dados coletados no monitoramento de um vinhedo. Nas estimativas, foi considerada uma área de 360 x 240 metros, dispoendo os nós sensores em forma de *grid* com intervalos de 15 metros.

Em Pierce e Elliott (2008) são descritos componentes de hardware e software de tecnologias desenvolvidas para monitoramento de algumas áreas no estado americano de Washington. Para o monitoramento foram utilizadas 21 microestações meteorológicas que possuem capacidade de se comunicarem e enviarem dados a um ponto de coleta. Esses dados são utilizados para monitoramento agrícola e da ocorrência de geadas.

Beckwith *et al.*, (2004) descreve os resultados de um experimento realizado no monitoramento de um vinhedo utilizando 65 nós sensores Mica2 da Xbow. Esse estudo teve o objetivo de descobrir possíveis maneiras de uma propriedade rural encontrar retorno econômico com a implantação de uma RSSF.

Em Wang *et al.*, (2006) são analisados aspectos das RSSFs na melhoria da produção

agrícola e de alimentos. É feito ainda uma previsão sobre a evolução das RSSFs no monitoramento agrícola.

Wark *et al.*, (2007) apresentou o projeto de uma fazenda inteligente que deverá ser toda controlada por uma RSSF, automatizando por exemplo, a abertura de portões e a liberação de água para os animais. Para a implantação dessa ideia os pesquisadores desenvolveram três nós sensores baseados no projeto do mote original desenvolvido pela Universidade de Berkeley, e que foram denominados Fleck-1, Fleck-2 e Fleck-3.

Das *et al.*, (1998) realizou um estudo comparativo sobre o desempenho entre alguns protocolos de roteamento atuando em redes *ad-hoc*. Foram utilizados os protocolos AODV, DSDV, DSR e TORA e para a análise comparativa foram considerados a porcentagem de pacotes entregues e o atraso médio no envio dos pacotes (*delay*). Além de esses experimentos terem sido realizados considerando as redes *ad-hoc*, não foi considerado o consumo de energia dos dispositivos, o que é de suma importância nas RSSFs.

Camilo *et al.*, (2006) utilizando o simulador NS-2 realizou estudos comparativos entre os protocolos de roteamento AODV e DSDV considerando uma rede estática e uma rede dinâmica. Para a análise comparativa foi considerado o número de pacotes perdidos e a energia restante. Nessas simulações foi observado que os parâmetros de configuração utilizados, como o consumo para envio e para recepção dos dados, não tem relação com os valores de um nó sensor real, portanto, não descreve o comportamento de nenhuma plataforma de hardware existente no mercado.

Becker *et al.*, (2007) utilizou 8 nós sensores reais chamados *cricket* motes, desenvolvidos pela Universidade de Berkeley para monitoramento do ambiente interno de uma casa. Foram variados os protocolos de roteamento (AODV, DSDV) e comparadas às diferenças no desempenho entre eles, como o atraso médio na entrega dos pacotes (*delay*) e o número de pacotes perdidos. Além do número de nós sensores utilizados para realização das análises ser pequeno, foram realizadas médias de apenas 3 simulações, o que não garante um resultado que seja confiável.

Foi observado que os trabalhos relacionados não consideraram a localização do Access Point, a organização plana e hierárquica da rede e o consumo de energia dos dispositivos da rede, o que é de suma importância para a comparação dos protocolos de roteamento aplicados às RSSFs.

Parâmetros de Avaliação

Neste capítulo são descritos os parâmetros utilizados para realização das simulações, como o consumo para o envio e para a recepção de um nó sensor. Além dos parâmetros de configuração, são exibidas as topologias das redes utilizadas nas simulações, mostrando a localização de cada nó sensor por área simulada. Para a realização das simulações das RSSFs, foi utilizada a ferramenta de simulação NS-2 na versão 2.29 juntamente com o framework MannaSim. Os pacotes auxiliares utilizados para instalação foram o tcl8.4.11, tk8.4.11, otcl-1.11, tclcl-1.17 e o gcc4.3.2. O SO utilizado foi o Ubuntu 8.10 na versão de 32 bits, e a configuração de hardware da máquina utilizada contou com: processador Intel Core2Duo trabalhando a uma frequência de 2.0 GHz, Front Side Bus (FSB) de 1066 MHz e memória cache nível 2 (L2) com 3Mbytes; memória RAM (*Random Access Memory*) do tipo DDR2 com frequência de 800MHz, capacidade de armazenamento de 4Gbytes e modo *dual channel* (canal duplo) ativo; Disco rígido com capacidade de armazenamento de 320Gbytes trabalhando a 5400 RPM (Rotações por minuto).

4.1. Parâmetros das Simulações

A seguir são enunciados os valores e os parâmetros considerados para realização das simulações e análises:

- Tamanho da área de simulação - O tamanho da área de monitoramento deve refletir o tamanho médio de uma área utilizada para plantação de uvas, que é a cultura de interesse deste trabalho. Para definição desse parâmetro foi realizada uma consulta aos proprietários e agrônomos da região de Marialva, local onde se pretende futuramente instalar uma RSSF real. Com essa pesquisa, constatou-se que a área média utilizada pelos agricultores é de 1 hectare (10000 metros quadrados), o que corresponde a uma área de 100 metros de largura por 100 metros de extensão, sendo esse o tamanho da área considerado para realização das simulações.
- Quantidade de nós sensores presentes na área de monitoramento – Quanto maior o número de nós sensores presentes em uma área, melhor seria a cobertura da coleta dos dados. Porém, uma quantidade muito grande de dispositivos em uma área pequena poderia causar congestionamento na rede, o que poderia levar a perda de dados. Verificar qual seria a melhor densidade de elementos na RSSF para essa área é um dos objetivos deste trabalho, e para tanto foram consideradas três quantidades de nós sensores na mesma área: 48 nós sensores na primeira configuração; 80 nós sensores na segunda; 168 nós sensores na terceira. Essa quantidade de nós sensores foi obtida com os espaçamentos a seguir.
- Distribuição dos nós sensores pela área de monitoramento – a distribuição foi realizada em forma de *grid*, com três espaçamentos diferentes entre os nós sensores: 7 em 7 metros; 10 em 10 metros; 12,5 em 12,5 metros.
- Rede plana – foi utilizado apenas um AP em todas as configurações de simulação de rede plana, com duas localizações: no centro (coordenadas 50 na largura e 50 no comprimento); no canto, com localização nas coordenadas 8 x 8, 10 x 10 e 12,5 x 12,5.
- Rede hierárquica - foi utilizado um AP ao centro da área de simulação (coordenadas 50 x 50) e quatro nós sensores líderes (*cluster-heads*) com variação da localização nas três áreas com quantidade diferente de nós sensores. Na primeira configuração, que possui 48 nós sensores, os *cluster-heads* 1, 2, 3 e 4 foram posicionados, respectivamente, nas coordenadas 25 x 25, 75 x 25, 25 x 75 e 75 x 75. Na segunda configuração, que possui 80 nós sensores, os *cluster-heads* 1, 2, 3 e 4 foram posicionados, respectivamente, nas coordenadas 30 x 30, 70 x 30, 30 x 70 e 70 x 70. Na terceira configuração, que possui 168 nós sensores, os *cluster-heads* 1, 2, 3 e 4 foram posicionados, respectivamente, nas coordenadas 29 x 29, 71 x 29, 29 x 71 e 71

x 71. A variação das coordenadas dos *cluster-heads* se deu para manter a compatibilidade com a área de simulação da rede plana. Cada *cluster-head* da rede hierárquica é responsável por receber os dados dos nós sensores comuns de uma área predeterminada (mostrada nas Figuras 4.3, 4.6 e 4.9) e encaminhá-los ao AP. Foi assumido ainda que os *cluster-heads* possuem a mesma configuração de hardware dos nós sensores comuns. As Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 ilustram as configurações citadas nos itens anteriores.

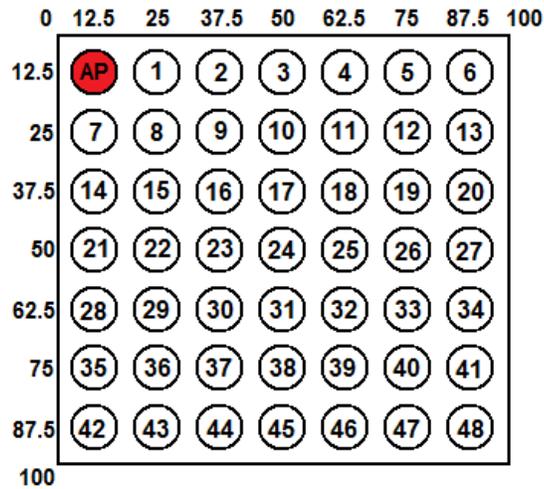


Figura 4.1. Área de simulação da rede plana com 48 nós sensores e AP no canto

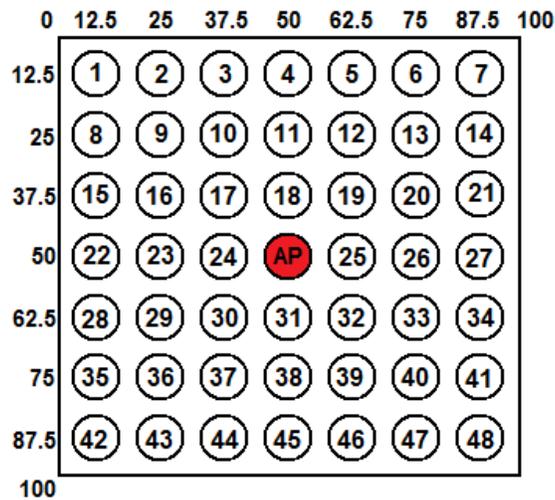


Figura 4.2. Área de simulação da rede plana com 48 nós sensores e AP no centro

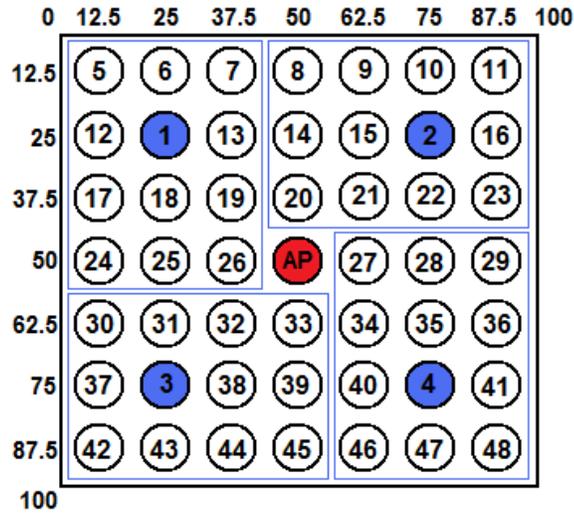


Figura 4.3. Área de simulação da rede hierárquica com 44 nós sensores comuns, 4 cluster-heads e AP no centro

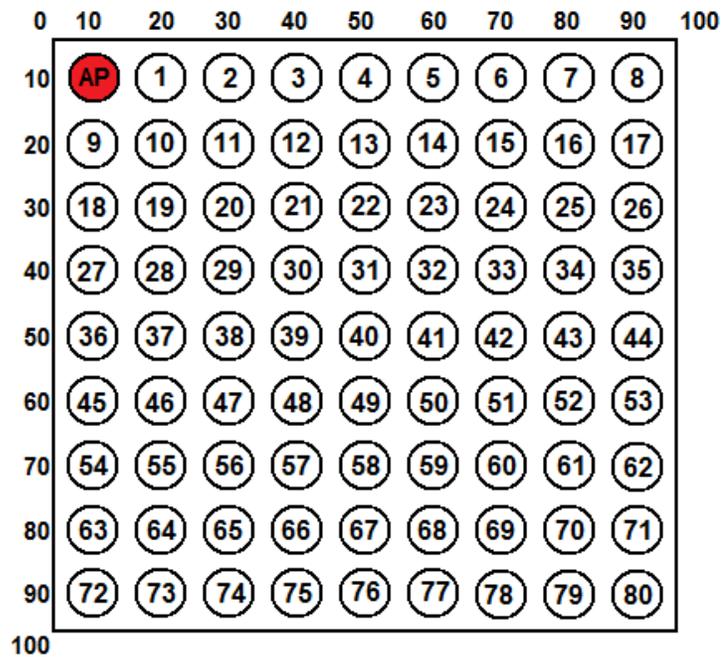


Figura 4.4. Área de simulação da rede plana com 80 nós sensores e AP no canto

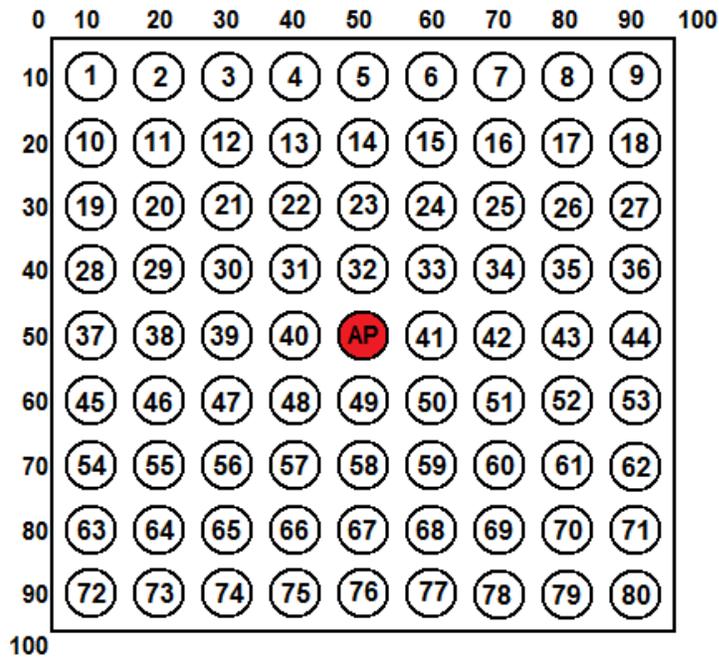


Figura 4.5. Área de simulação da rede plana com 80 nós sensores e AP no centro

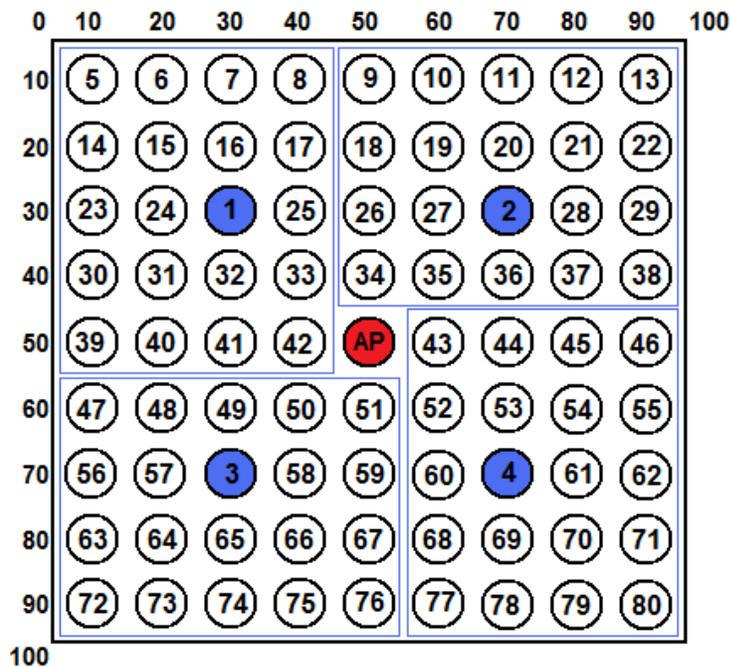


Figura 4.6. Área de simulação da rede hierárquica com 76 nós sensores comuns, 4 cluster-heads e AP no centro

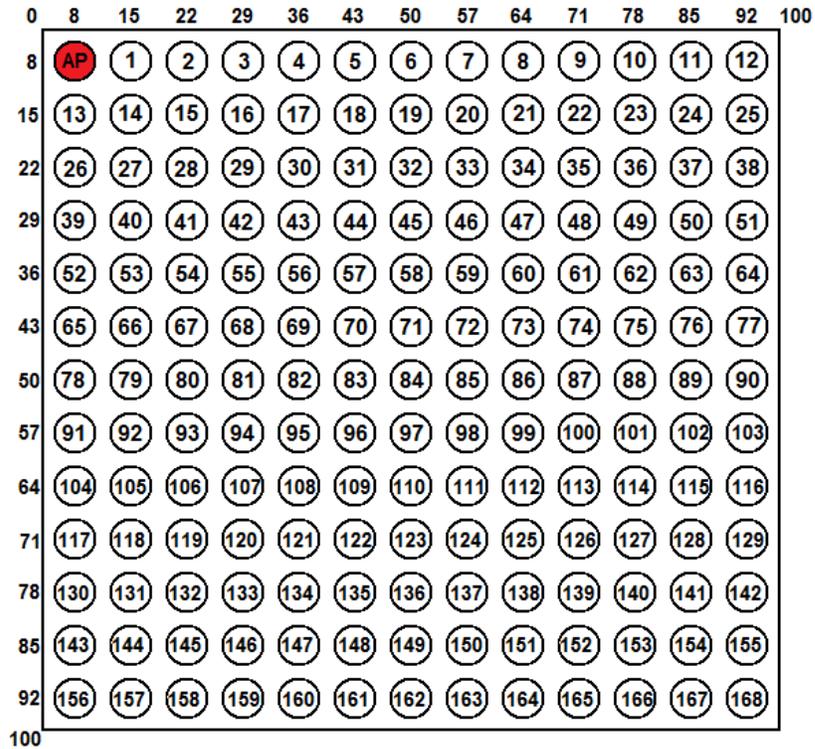


Figura 4.7. Área de simulação da rede plana com 168 nós sensores e AP no canto

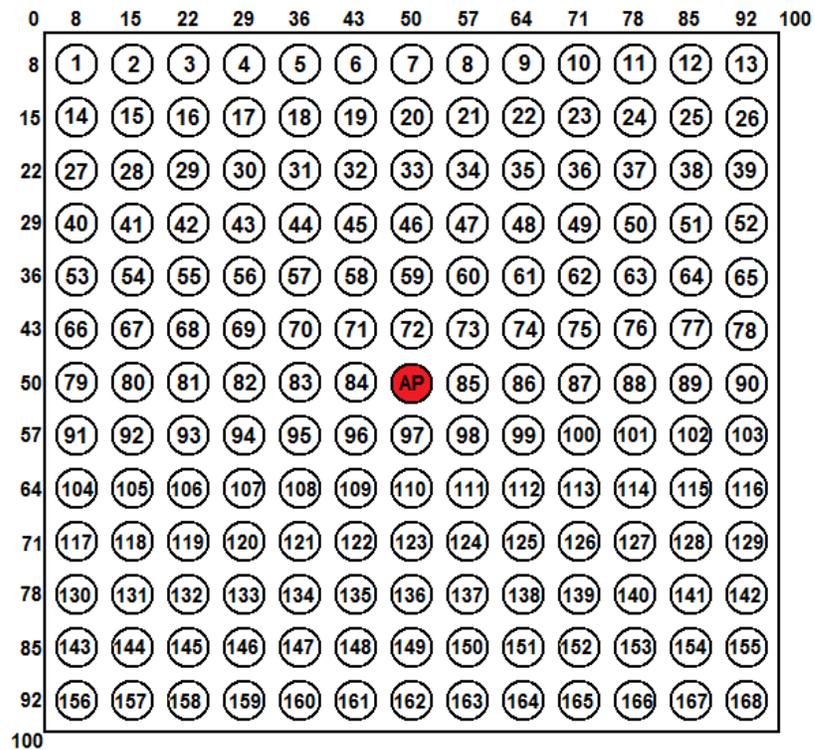


Figura 4.8. Área de simulação da rede plana com 168 nós sensores e AP no centro

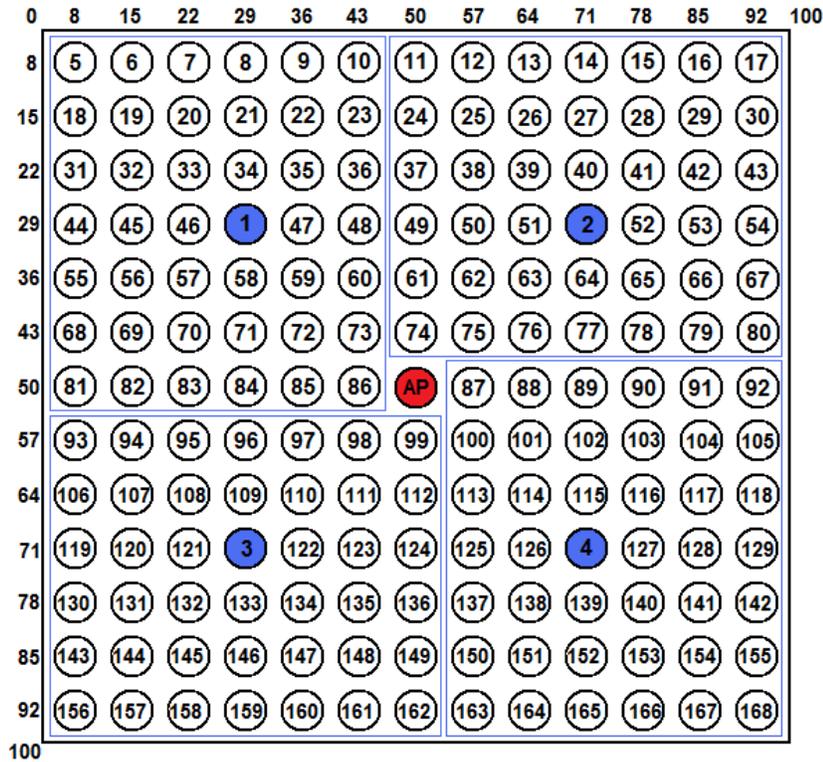


Figura 4.9. Área de simulação da rede hierárquica com 164 nós sensores comuns, 4 cluster-heads e AP no centro

O consumo de energia nas simulações é descrito pela potência consumida pelos dispositivos, que pode ser calculada pela fórmula $P = i \times V$ (Halliday *et al.*, 2007), na qual P é a potência consumida expressa em Watts, i é a corrente consumida expressa em Amperes e V é a tensão de trabalho expressa em Volts. O valor da potência calculado é então convertido em Joules, pois é essa a medida de energia utilizada como parâmetro. A relação entre Potência e Joule pode ser encontrada em Lux (2003), onde 1 Watt equivale a 1 Joule por segundo. Portanto, um dispositivo com potência de 5 Watts, consome 5 Joules por segundo de trabalho.

As configurações de hardware dos nós sensores comuns, dos *cluster-heads* e do AP foram baseadas nos valores do nó sensor Mica2 e são:

- Tensão de trabalho de 3Volts;
- Utilização de 6 sensores por nó sensor. Com uma média de corrente de 1mA para cada sensor, temos uma corrente de consumo total no sensoriamento de 6mA (miliampéres), o que gera a uma potência consumida de 18mW (miliwatts) ($P = i \times V \Rightarrow P = 6mA \times 3V = 18mW$ ou 0.018 Watts, o que equivale a um consumo de 0.018 Joules por segundo).

- Corrente de consumo no processamento de 8mA, o que equivale a uma potência consumida de 24mW (8mA x 3V) ou 0.024 Joules por segundo;
- Frequência de operação de 4MHz;
- Bateria contendo inicialmente 2J (Joules) para os nós sensores comuns e *cluster-heads* e 10J (Joules) para o AP.
- A unidade de rádiotransmissão utiliza corrente de consumo de 27mA para transmissão e 10mA para recepção, equivalendo as potências consumidas de 81mW (27mA x 3V) e 30mW (10mA x 3V) respectivamente. A largura de banda utilizada foi de 28.8 Kbps, o alcance de transmissão de 50 metros e o método de propagação *TwoRayGround*;
- Camada de acesso ao meio padrão IEEE 802.11;
- Protocolos de roteamento AODV e DSDV;
- A coleta de dados realizada pelos nós sensores foi periódica, com intervalos entre coletas de 5 segundos;
- A disseminação dos dados realizada pelos nós sensores foi periódica, disseminando dados a cada 5 segundos;
- As simulações tiveram início no instante 15 segundos, e terminaram no instante 100 segundos.

Análise dos Resultados

A seguir serão apresentados os gráficos que comparam o desempenho das diversas configurações de RSSFs simuladas neste trabalho. Essas figuras apresentam o principal resultado deste trabalho, pois por meio delas pôde-se determinar qual a melhor configuração de uma RSSF para aplicação na viticultura. Os parâmetros analisados foram o tempo médio de atraso entre o envio de um dado por um nó sensor até a recepção pelo AP, a energia média restante em cada nó sensor da rede e o número médio de pacotes perdidos nos nós sensores da rede.

Inicialmente foram realizadas comparações entre as variações de redes planas simuladas. Comparou-se as áreas com o mesmo número de dispositivos e o mesmo protocolo de roteamento, variando apenas a localização do AP. Essas comparações serviram para mostrar qual a melhor localização para o AP, visando menor atraso e perda no envio de dados e menor consumo de energia dos nós sensores. Em seguida foram analisadas as redes hierárquicas simuladas, comparando as áreas com o mesmo número de dispositivos e AP no centro e utilizando os protocolos AODV e DSDV. A localização do AP apenas no centro foi adotada para que os *cluster-heads* ficassem equidistantes do mesmo. Por fim, foram comparadas as redes planas com as redes hierárquicas com o mesmo número de dispositivos na área de simulação.

Com o objetivo de dar validade aos dados simulados e torná-los mais próximos de uma situação real, todas as simulações foram executadas 33 vezes, como descrito em Jeruchim et al. (2000), Zeigler et al. (2000) e Banks et al. (2009), e ao final foram feitas as médias para criação dos gráficos para análise. Foram desenvolvidos vários algoritmos na linguagem Python (Python, 2009) para leitura dos traces e extração das informações de interesse para a criação dos gráficos. Todos os gráficos de análise gerados neste trabalho foram feitos pela ferramenta Gnuplot (Gnuplot, 2009). Foram gerados gráficos que descrevem a energia restante dos nós sensores, o atraso médio de cada nó sensor e o número de pacotes perdidos por cada nó sensor. Em todos os gráficos, o eixo x corresponde aos identificadores dos nós sensores, e possui valores entre: 0 a 48; 0 a 80; 0 a 168. O eixo y corresponde aos parâmetros: atraso médio, expresso em segundos; energia restante, expresso em Joules; número de pacotes perdidos. Como todos os valores expressos nos gráficos são médias, podem ocorrer valores não inteiros, como por exemplo, 0.5 pacotes perdidos, situação que em uma rede real é impossível de ocorrer.

5.1. Análise dos Resultados da Rede Plana

Os resultados a seguir estão divididos em seções individuais objetivando facilitar a análise do atraso médio, da energia restante e do número de pacotes perdidos de cada nó sensor, em função da posição do AP, do protocolo de roteamento e do número de nós sensores de cada cenário simulado.

5.1.1. Atraso Médio

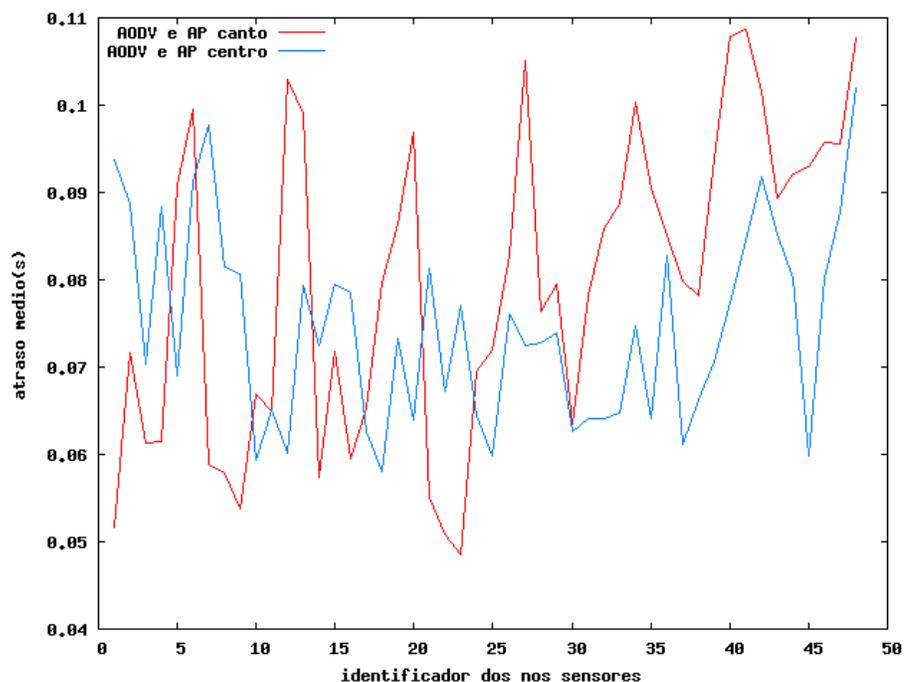


Figura 5.1. Atraso médio da rede plana com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro

A Figura 5.1 por meio da linha vermelha subindo do lado direito mostra que o AP no canto provoca um atraso desigual entre os nós sensores da rede, o que ocorre devido ao aumento da distância dos nós sensores até o AP. Com o AP ao centro, o atraso médio foi menor e mais uniforme, aumentando dos lados direito e esquerdo da Figura (aumento da distância do AP) e ficando mais uniforme ao centro (menor distância do AP). Outra observação importante na Figura 5.1 é a ocorrência de picos e vales. Isso pode ser explicado pela forma com que os nós sensores foram distribuídos pela área de simulação. Como exemplo com o AP no canto, os nós sensores vão sendo inseridos na mesma coordenada do plano cartesiano y do AP, variando apenas sua coordenada no plano cartesiano x , o que vai aumentando a distância ao AP a cada nova inserção. No instante que a coordenada de um nó sensor ultrapassa o tamanho considerado no plano cartesiano x da área de simulação, ele recebe incremento na sua coordenada y e volta à coordenada inicial do plano cartesiano x , ficando novamente próximo ao AP. A Figura 5.2 mostra um exemplo onde os nós sensores

com identificador 6 e identificador 7 possuem grande diferença de distância em relação ao AP, o que causaria um pico de atraso no 6 e um vale de atraso no 7.

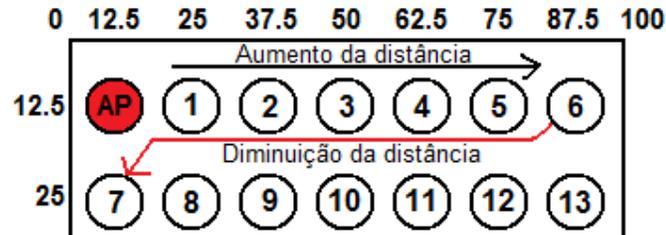


Figura 5.2. Aumento e diminuição da distância dos nós sensores em relação ao AP – Pico de atraso no dispositivo 6 e vale de atraso no dispositivo 7

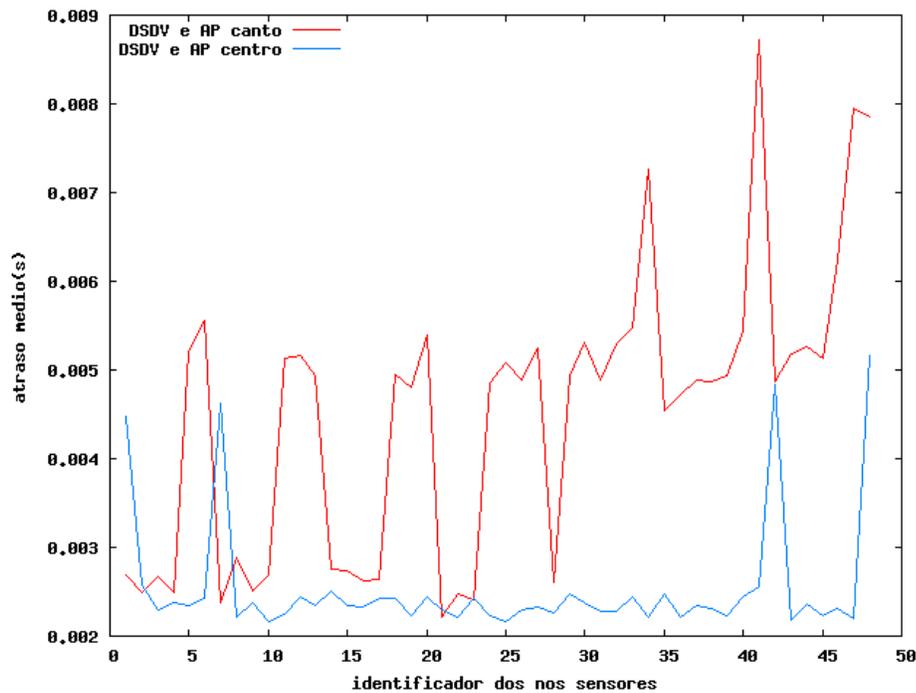


Figura 5.3. Atraso médio da rede plana com 48 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro

Nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 observa-se também o desequilíbrio no atraso médio com o AP no canto, observado pela maior altura da linha vermelha do lado direito dos gráficos (nós mais distantes do AP). Com o AP no centro (linha azul), o atraso novamente é menor e mais uniforme, sofrendo pequena variação no centro (nós sensores mais próximos ao AP) e maior variação dos lados direito e esquerdo (nós sensores mais distantes do AP).

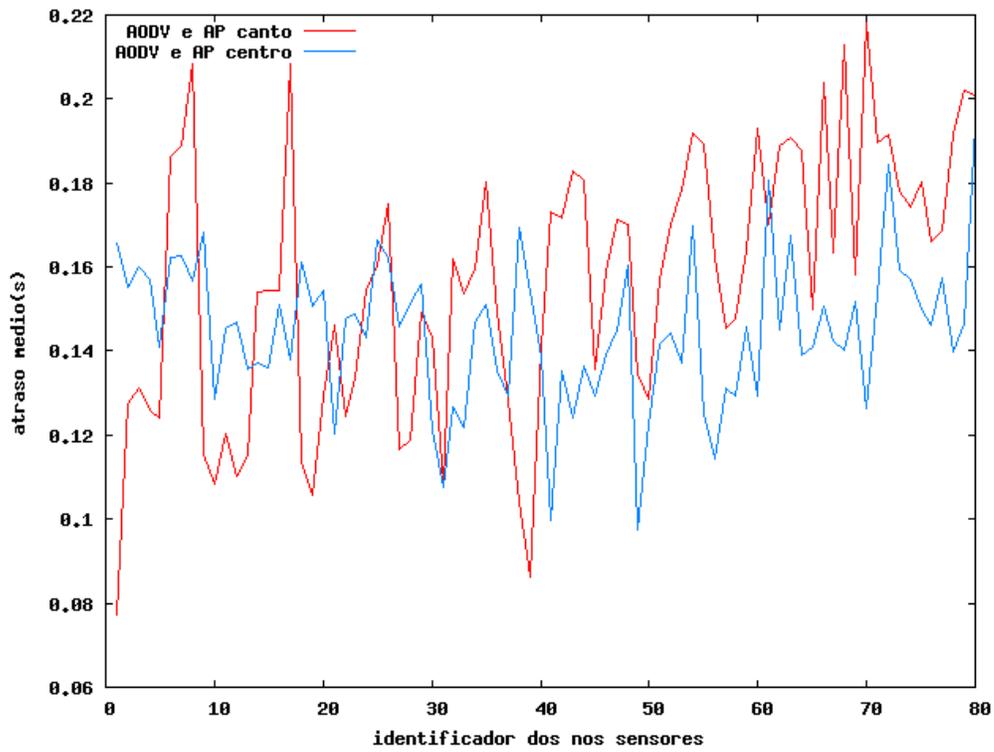


Figura 5.4. Atraso médio da rede plana com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro

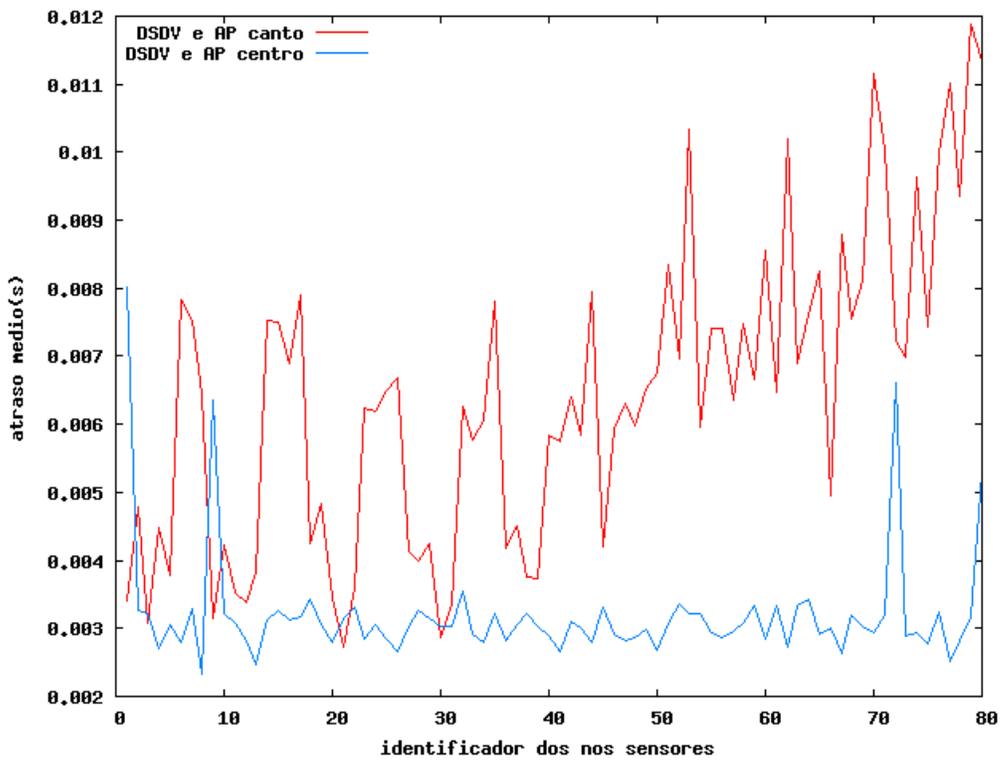


Figura 5.5. Atraso médio da rede plana com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro

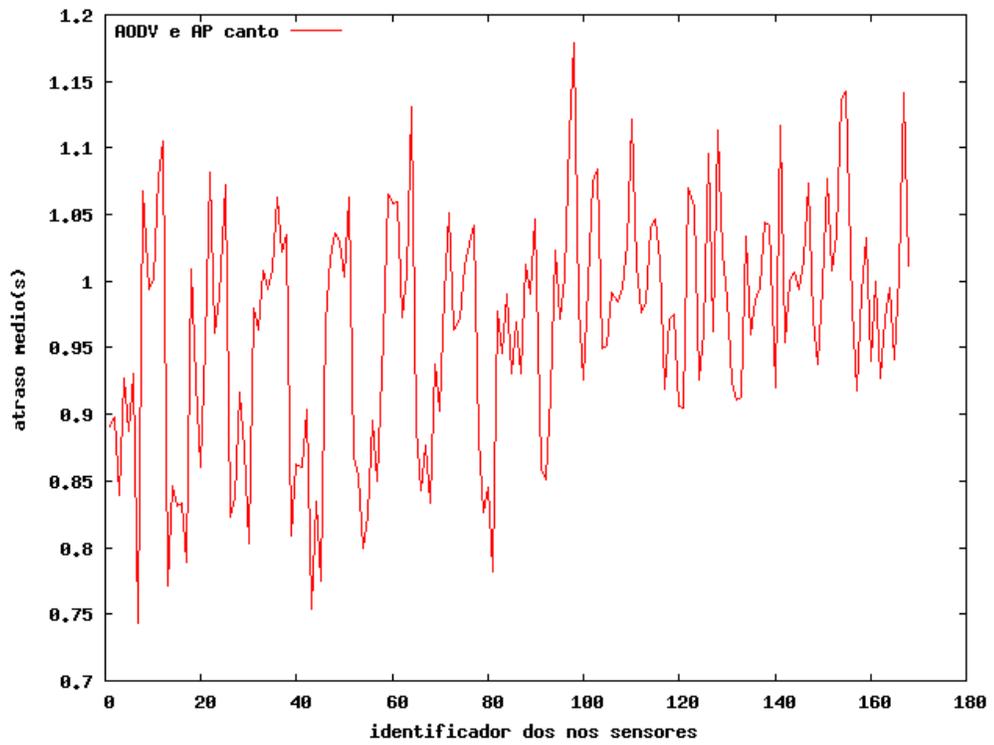


Figura 5.6. Atraso médio da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto

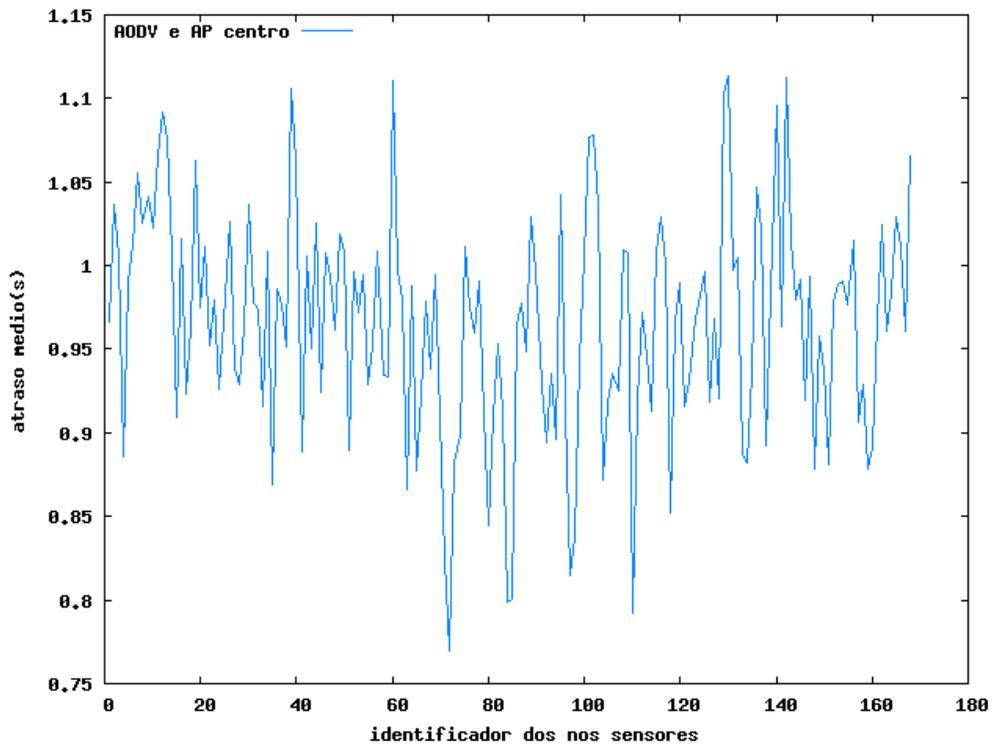


Figura 5.7. Atraso médio da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro

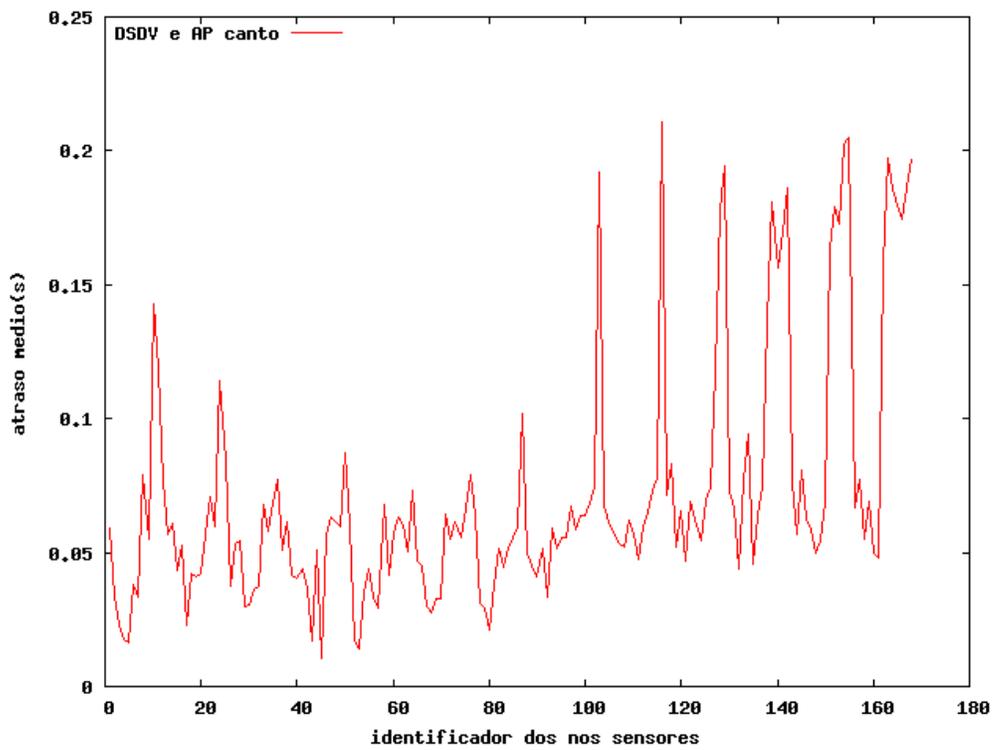


Figura 5.8. Atraso médio da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto

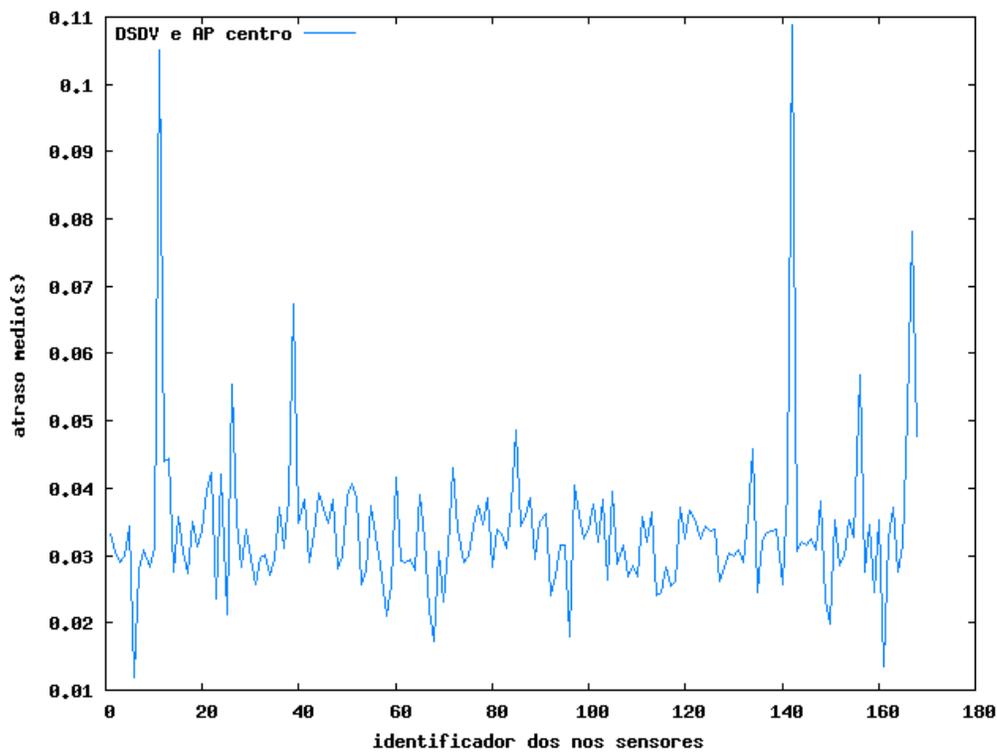


Figura 5.9. Atraso médio da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro

5.1.2. Consumo de Energia

Na Figura 5.10 observa-se que o consumo de energia com o AP ao centro foi menor e mais uniforme. Já com o AP no canto, o consumo foi maior e desequilibrado, o que é constatado pela linha vermelha superior do lado direito do gráfico (nós sensores mais distantes do AP). Esse gasto desigual é indesejável nas RSSFs, pois pode ocasionar precocemente o fim da energia dos elementos de uma região de interesse, o que impossibilitaria o monitoramento dessa área. Ainda com relação ao consumo de energia, observando as Figuras 5.10 e 5.11, o protocolo de roteamento AODV obteve consumo superior com o AP no canto e no centro em relação ao protocolo DSDV. Com o AP no canto, e usando o protocolo AODV, os nós sensores contavam ao final da simulação com uma média de 1.83 Joules de energia, enquanto que utilizando o DSDV a média foi de 1.86 Joules. Com o AP no centro, a média de energia restante por nó sensor utilizando o protocolo AODV foi de 1.85 Joules, enquanto que com o DSDV a quantidade média de energia foi de 1.895 Joules.

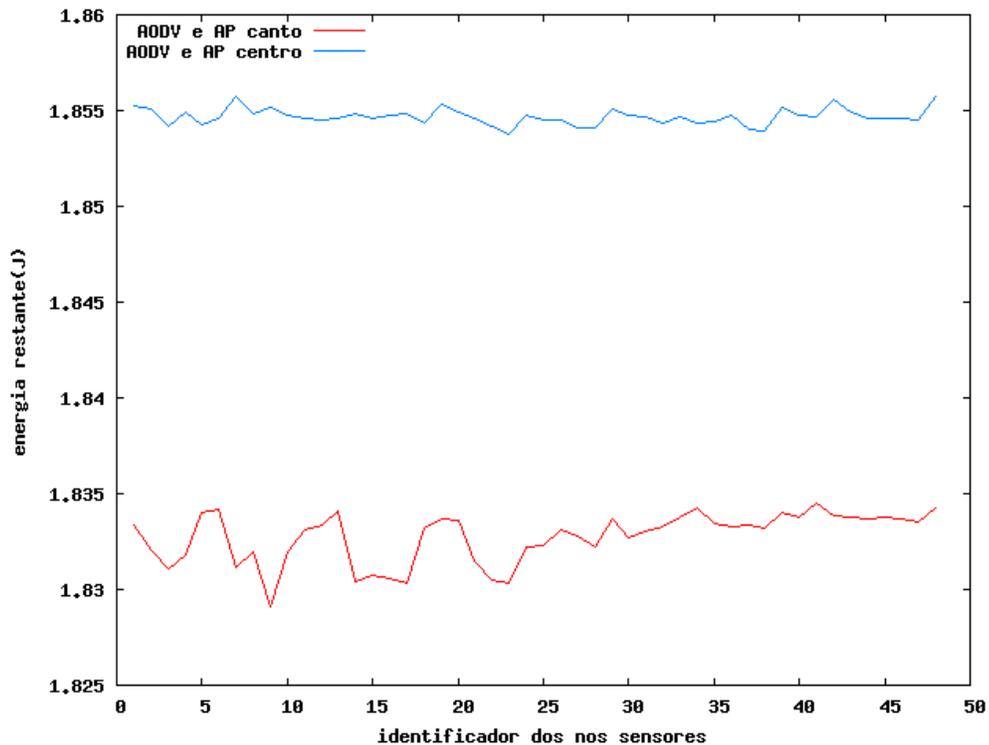


Figura 5.10. Energia restante da rede plana com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro

As Figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 também mostram o maior e mais desequilibrado consumo de energia com o AP no canto da área de simulação, e o menor e

mais equilibrado consumo de energia com o AP no centro da área de simulação. A linha vermelha superior ao lado direito e inferior ao lado esquerdo do gráfico mostra que o consumo dos dispositivos mais próximos ao AP foi maior, o que pode ser explicado pela necessidade dos nós sensores que estão mais próximos ao AP além de enviar seus próprios dados, encaminhar ainda os dados dos nós sensores mais distantes. Observando as Figuras 5.14 e 5.16, pode-se notar que o consumo de energia dos nós sensores com os protocolos AODV e DSDV em uma mesma configuração (rede plana com 168 nós sensores e AP no canto) possui grande variação, restando uma média de 0.97 Joules por nó sensor no AODV e 1.33 Joules no DSDV. Esse menor consumo de energia pelo protocolo DSDV pode ser observado em todas as configurações de rede plana, e uma possível explicação para esse fato é que o protocolo DSDV realiza o processo de descoberta de rotas em períodos determinados, que são maiores que o período de atualização do protocolo AODV, minimizando o número de pacotes trafegando pela rede e assim economizando energia

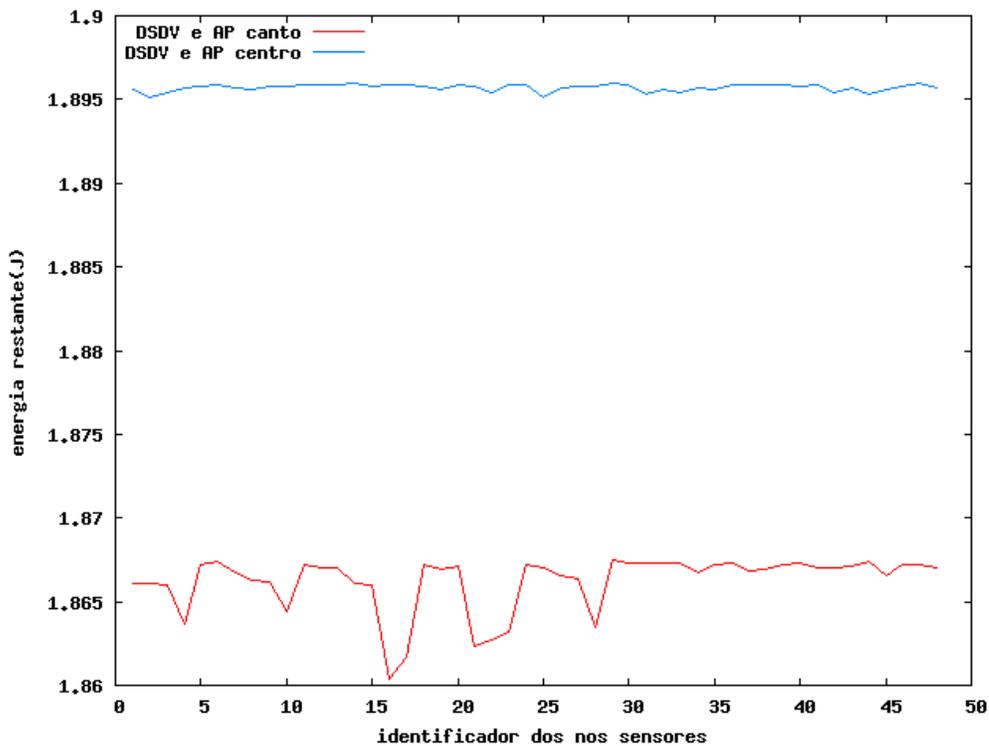


Figura 5.11. Energia restante da rede plana com 48 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro

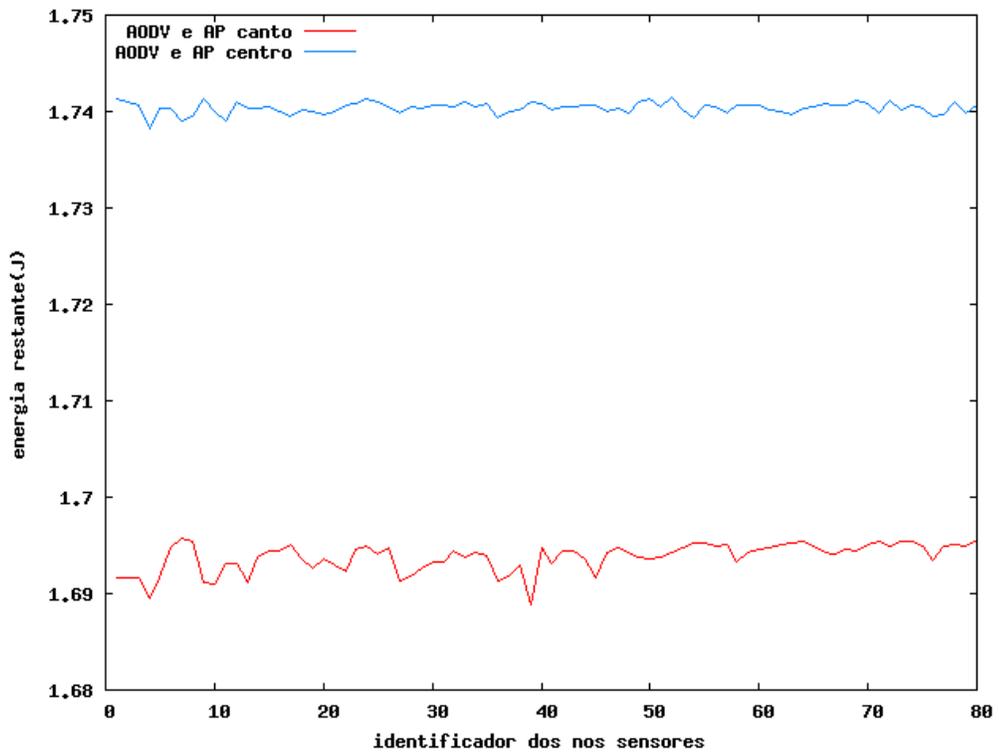


Figura 5.12. Energia restante da rede plana com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro

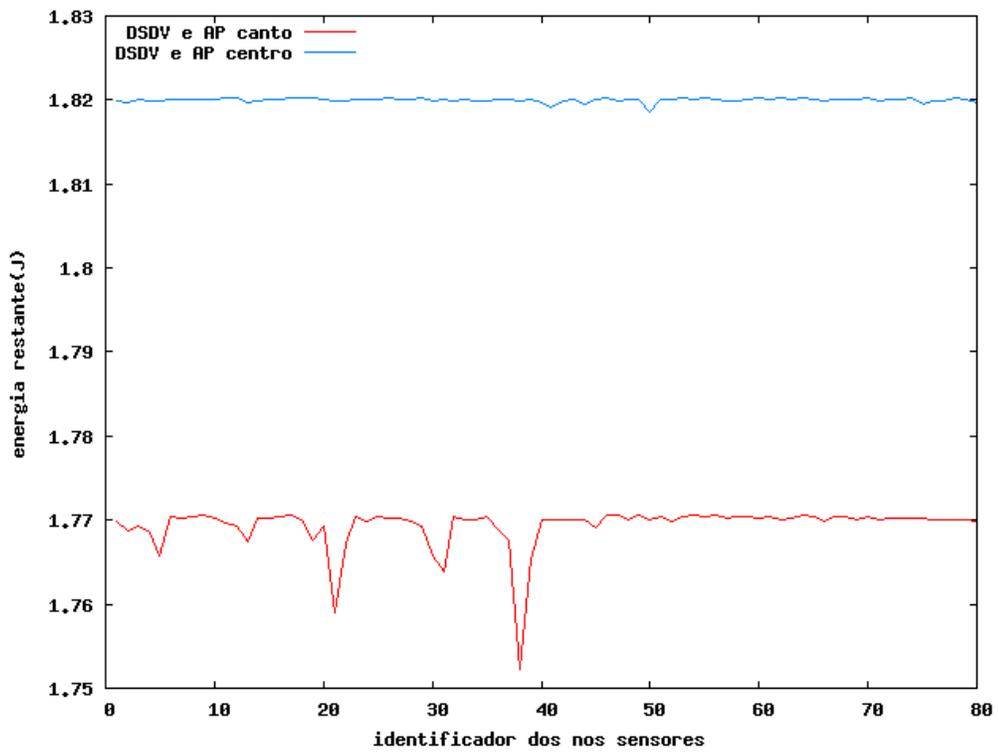


Figura 5.13. Energia restante da rede plana com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro

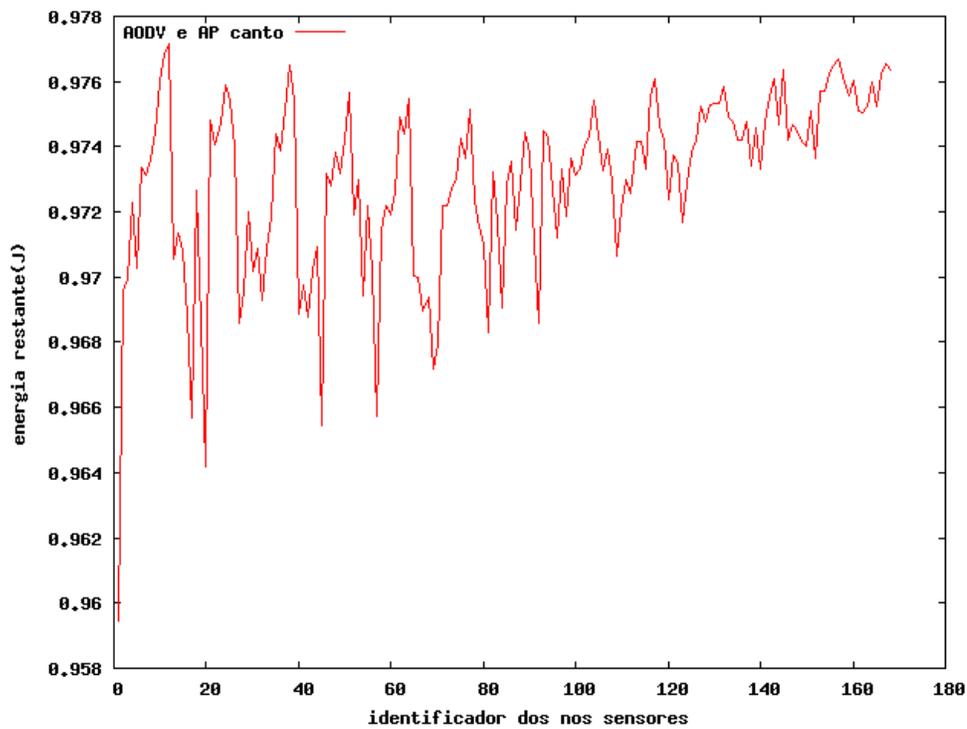


Figura 5.14. Energia restante da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto – Consumo desequilibrado de energia sendo maior do lado esquerdo do gráfico (nós sensores mais próximos ao AP)

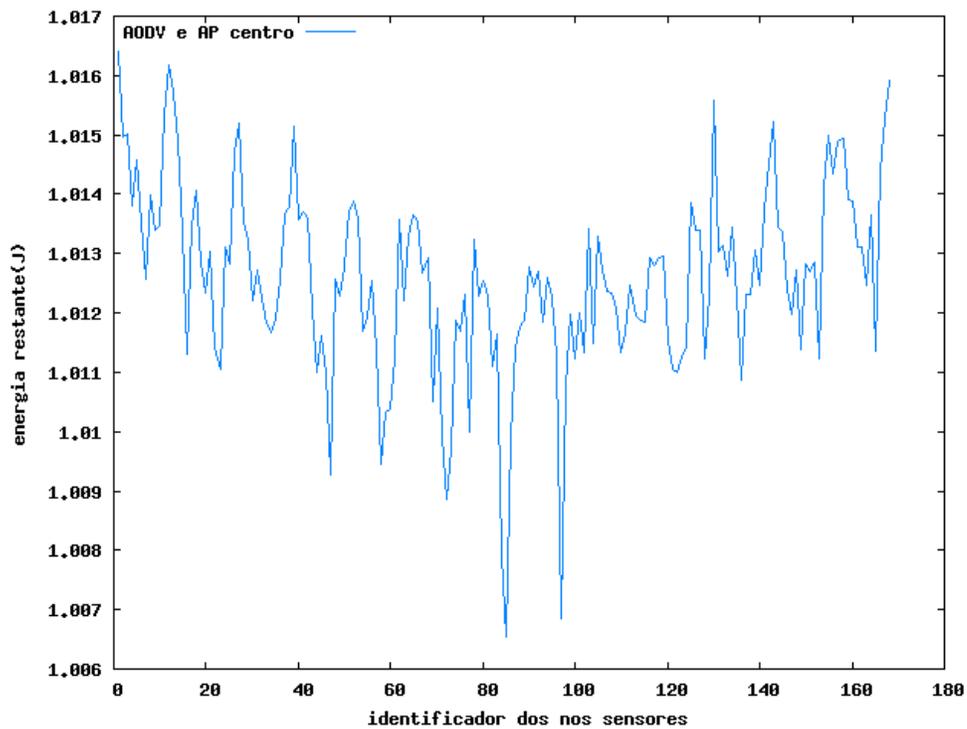


Figura 5.15. Energia restante da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro

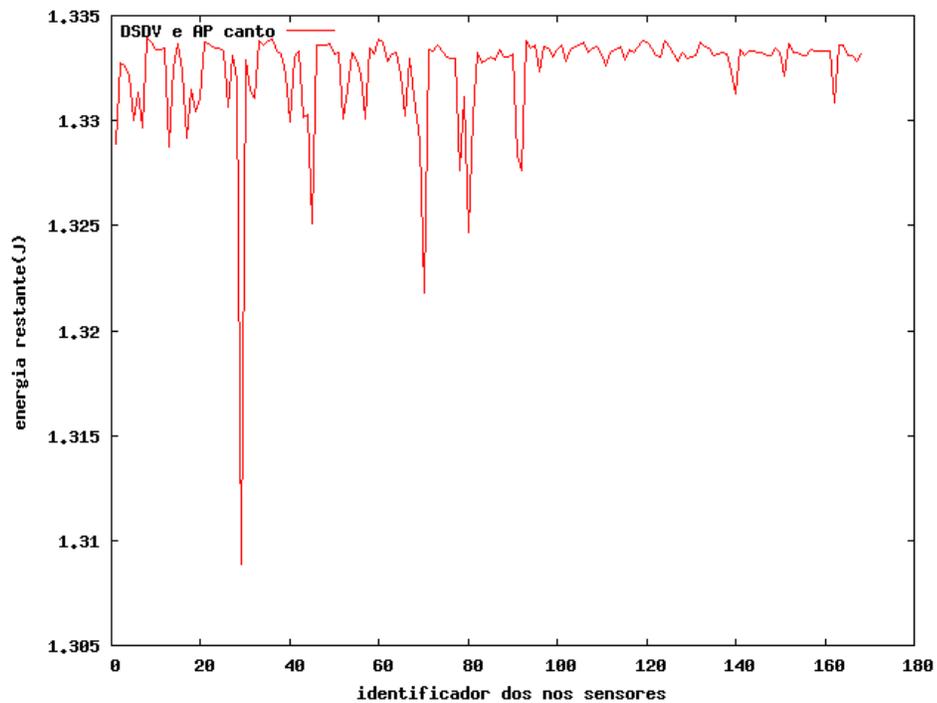


Figura 5.16. Energia restante da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto – Dispositivos do lado esquerdo do gráfico consumiram mais energia

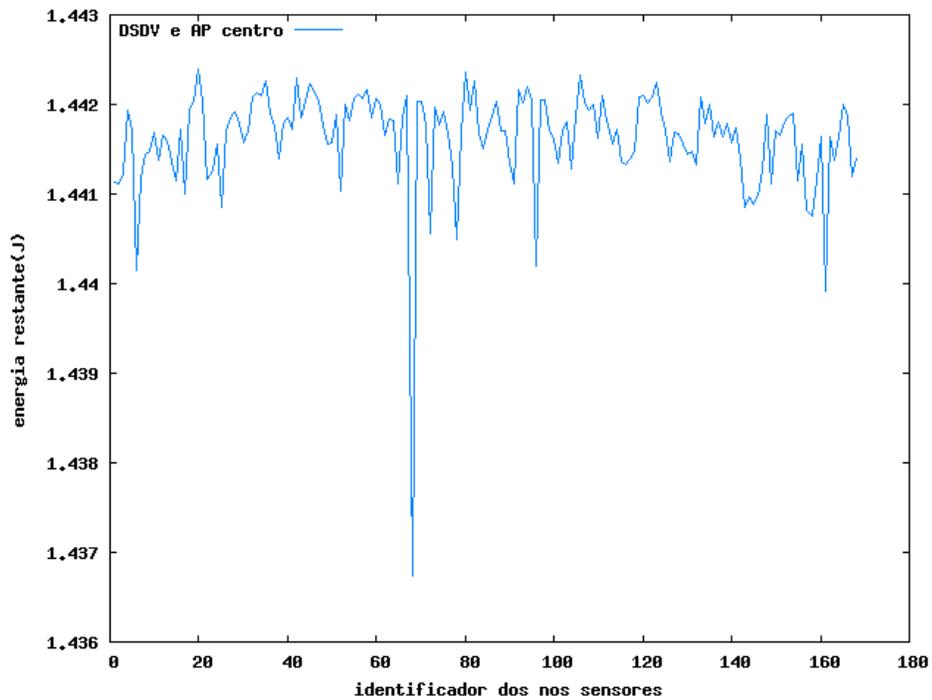


Figura 5.17. Energia restante da rede plana com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro – Consumo balanceado de energia com alguns vales ao centro (dispositivos mais próximos ao AP)

5.1.3. Número de Pacotes Perdidos

Como pode ser observado pelas Figuras 5.18 até 5.25, o número de pacotes perdidos com o AP no canto foi desequilibrado e maior. Isso pode ser explicado devido ao maior encaminhamento de dados entre nós sensores intermediários para alcançar o AP, o que é causado pelo aumento da distância máxima entre os nós sensores e o AP. Como os nós mais distantes dependem de nós sensores intermediários para o envio dos dados, a chance desse dado se perder aumenta se comparado a um nó sensor que se comunica diretamente com o AP. Com o AP ao centro o número de pacotes perdidos foi menor, pois a distância máxima entre os nós sensores e o AP é minimizada, diminuindo a necessidade de encaminhamento de pacotes por nós sensores intermediários.

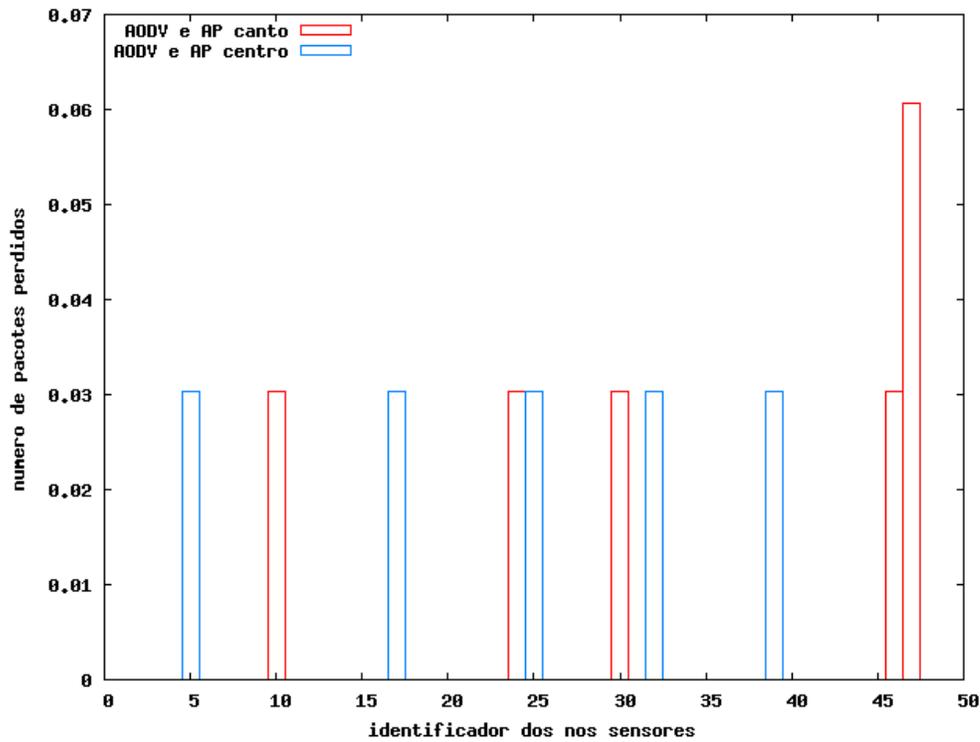


Figura 5.18. Número de pacotes perdidos na área com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro

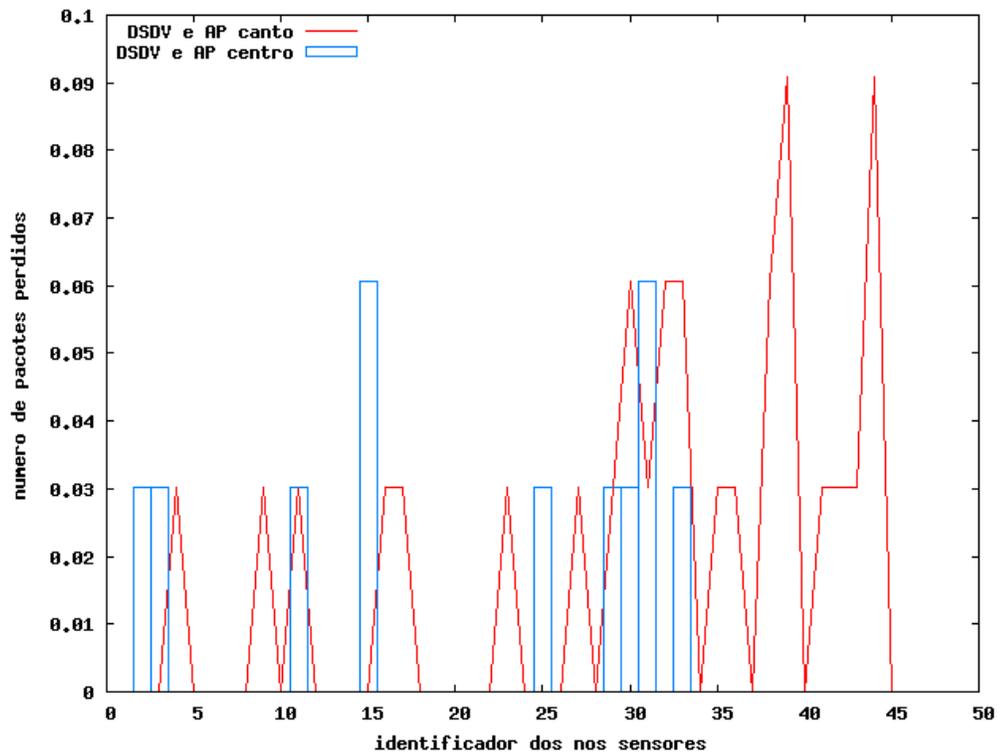


Figura 5.19. Número de pacotes perdidos na área com 48 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro

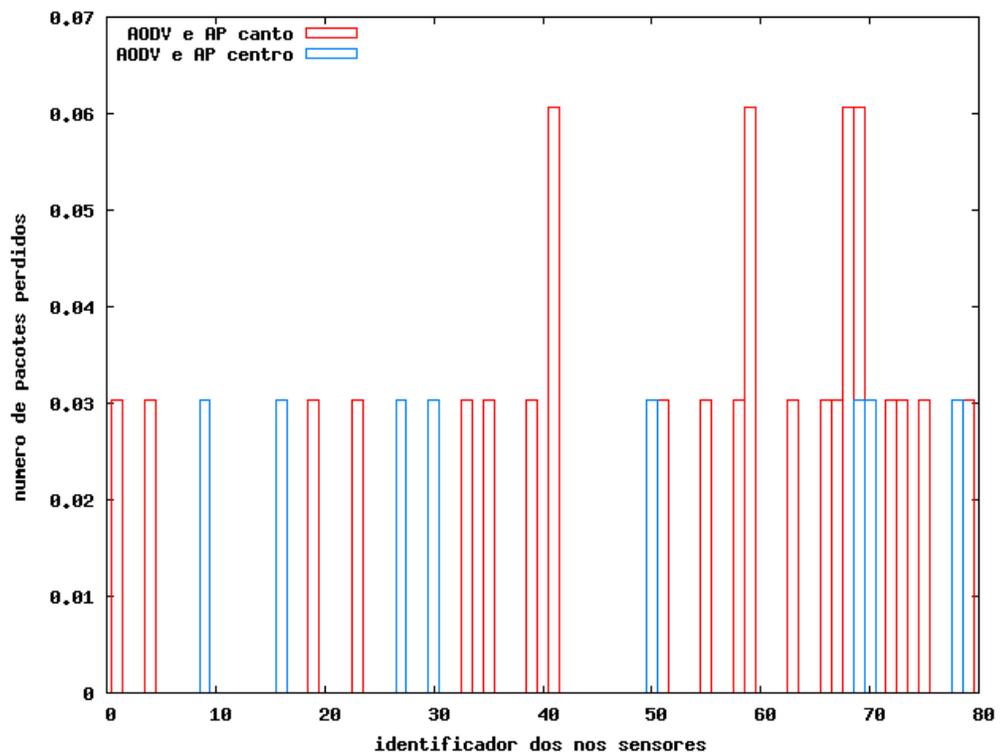


Figura 5.20. Número de pacotes perdidos na área com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto e no centro

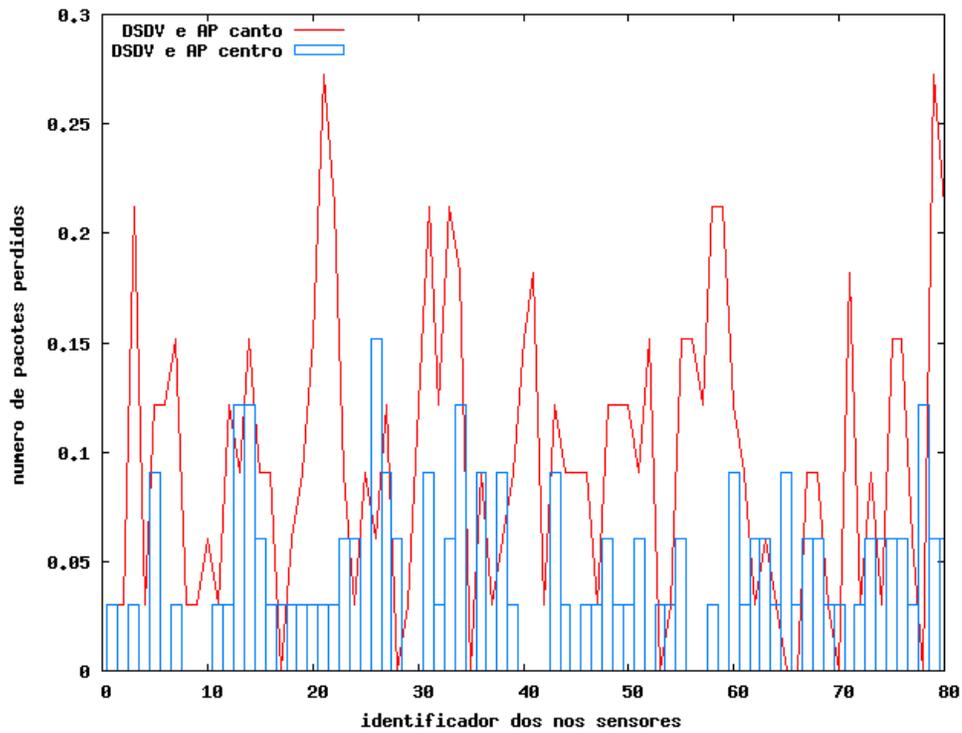


Figura 5.21. Número de pacotes perdidos na área com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto e no centro – AP no canto causou maior perda de pacotes

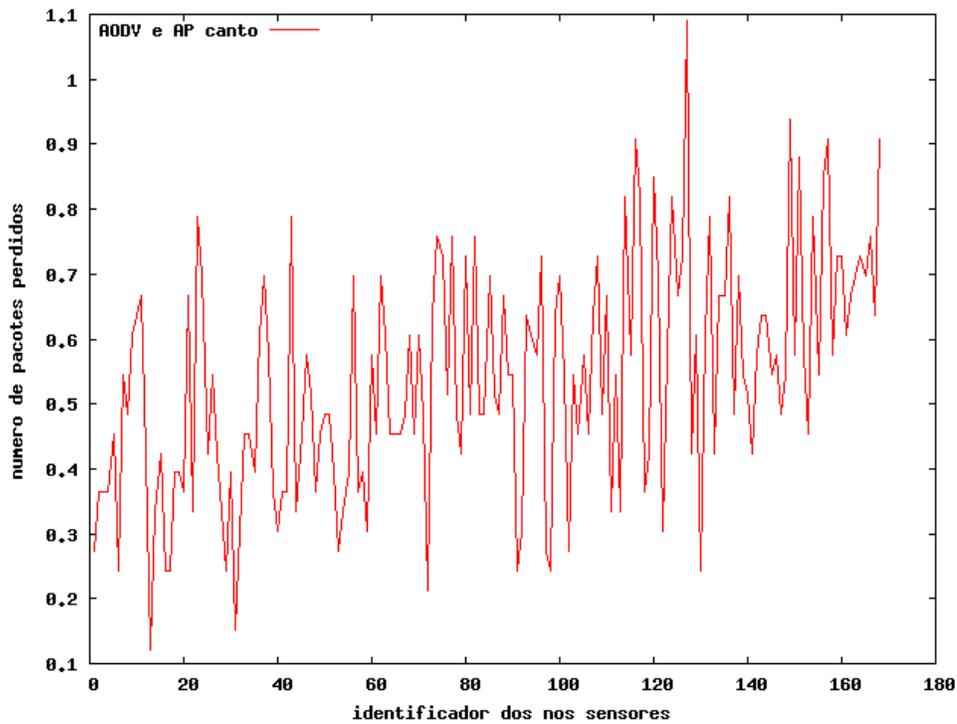


Figura 5.22. Número de pacotes perdidos na área com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no canto – Nós sensores mais distantes do AP tiveram maior perda de pacotes

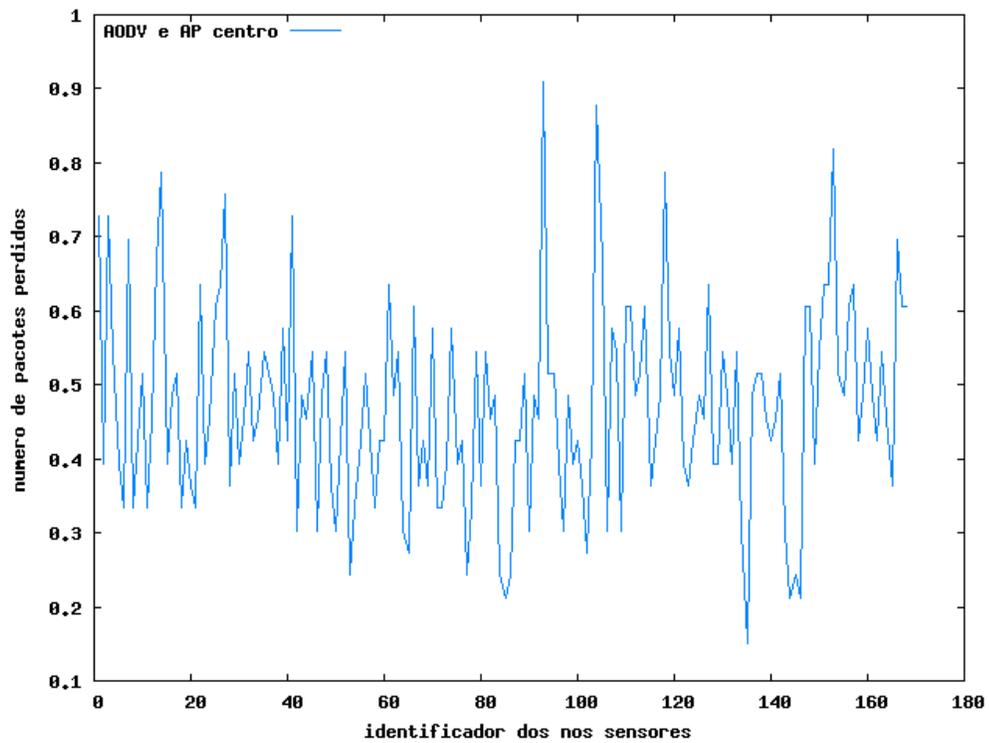


Figura 5.23. Número de pacotes perdidos na área com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro

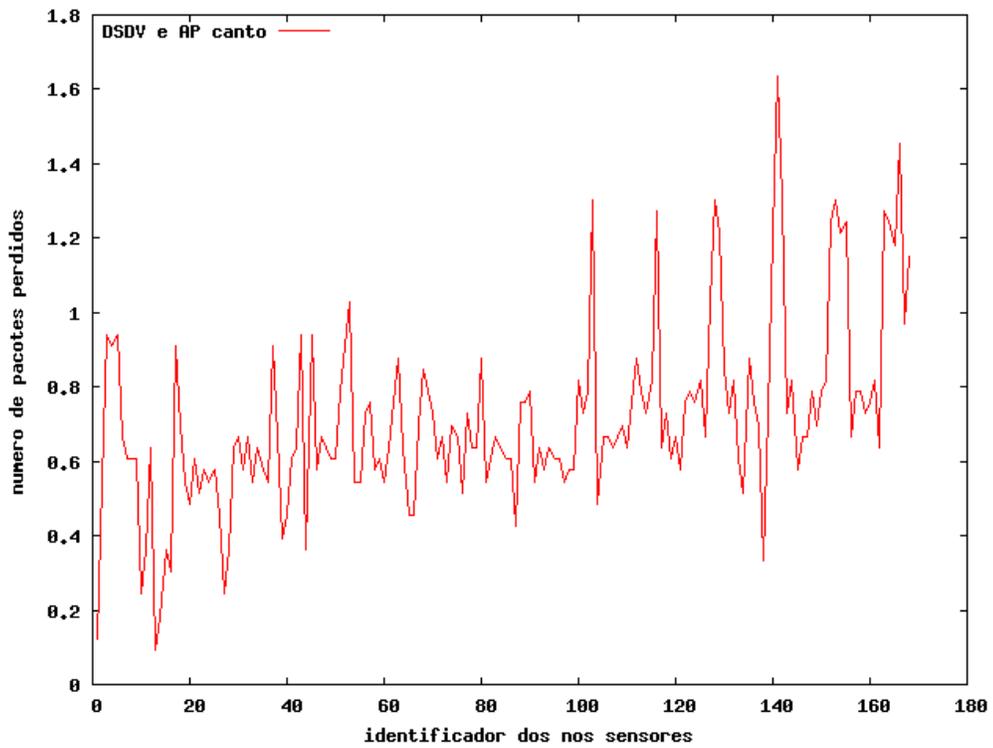


Figura 5.24. Número de pacotes perdidos na área com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no canto

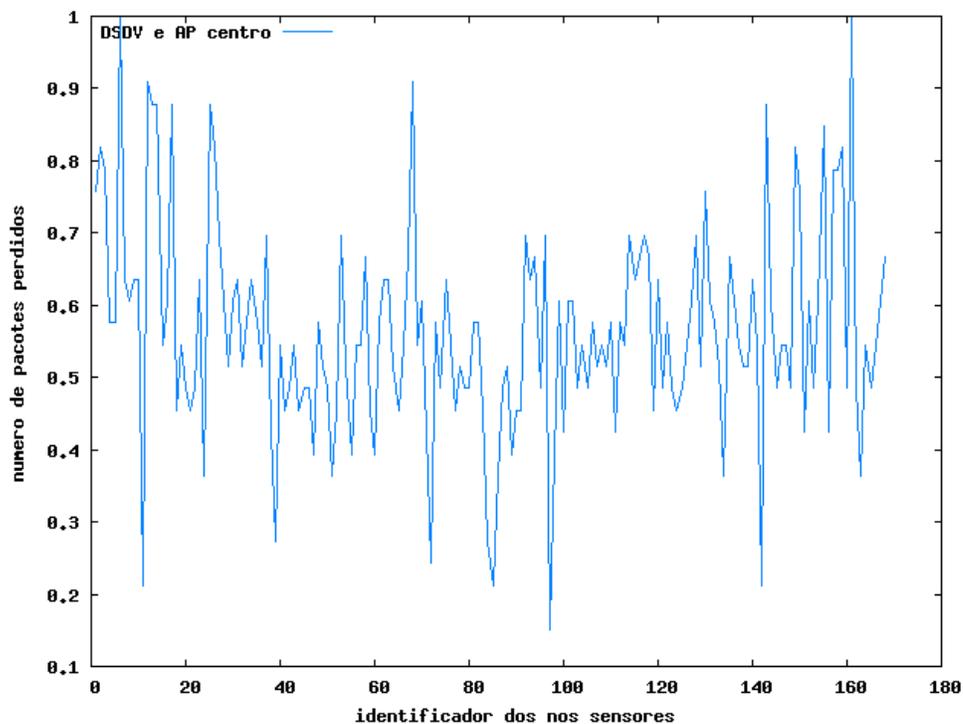


Figura 5.25. Número de pacotes perdidos na área com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro

Em todas as configurações de redes planas mostradas pelas Figuras 5.1 até 5.25 (exceto 5.2), observou-se que os nós sensores que se encontram mais próximos ao AP possuem maior consumo de energia, menor atraso na entrega e menor perda dos dados. O maior consumo desses nós sensores próximos ao AP pode ser explicado pela necessidade deles encaminharem os pacotes dos dispositivos que estão mais distantes e que não conseguem transmitir dados diretamente ao AP. O menor atraso dos nós sensores próximos ao AP se explica pela menor distância entre eles, obtendo uma transmissão mais rápida. O menor número de pacotes perdidos pelos nós sensores próximos ao AP também pode ser explicado pela menor distância a ser percorrida na transmissão, dispensando o encaminhamento dos dados a nós sensores intermediários.

Nas Figuras 5.1 até 5.25 (exceto 5.2) observa-se também que o protocolo de roteamento DSDV obteve melhor desempenho na maior parte das configurações de redes simuladas, consumindo menor quantidade de energia e obtendo menores tempos de atraso, perdendo para o AODV apenas na quantidade de pacotes perdidos. O fato do protocolo de roteamento DSDV ter obtido melhor desempenho que o protocolo de roteamento AODV nas análises de energia consumida e atraso médio pode ser explicado pelo fato das redes

simuladas serem estáticas (nós sensores não mudam de localização durante a simulação), o que dá vantagem aos protocolos pró-ativos, que encontram uma rota e a utilizam por mais tempo do que os reativos. Como os protocolos reativos realizam descoberta de rotas com mais frequência, consomem mais energia com a vantagem de suas rotas serem mais atualizadas e a quantidade de dados perdidos serem menor do que os pró-ativos.

Uma última observação nas Figuras 5.1 até 5.25 (exceto 5.2) é que em todas as configurações de redes simuladas, o AP no centro da área de simulação obteve melhores resultados do que no canto, com um consumo menor e mais balanceado de energia. Uma explicação para isso é que ao centro a distância máxima entre todos os dispositivos da rede até o AP é menor. Com o AP no canto, a distância máxima entre ele e alguns dispositivos da rede aumenta, o que aumenta o consumo de energia dos nós sensores intermediários (devido ao encaminhamento dos dados dos nós sensores mais distantes), aumenta o tempo de entrega dos dados, pois não podem ser transmitidos diretamente e aumenta também o número de pacotes perdidos, pois dependem de nós sensores intermediários para a entrega dos dados ao AP.

Com relação à densidade da rede, observou-se que o número de dispositivos impacta diretamente no atraso médio, no consumo de energia e no número de pacotes perdidos pela rede. Em todos os cenários de redes planas simulados com as mesmas configurações, o desempenho foi inferior nos com maior número de nós sensores. Isso se dá devido ao aumento de pacotes repassados entre os nós sensores da rede, o que está diretamente relacionado ao número de dispositivos que estão enviando dados pela rede.

5.2. Análise dos Resultados da Rede Hierárquica

As Figuras 5.26 até 5.33 mostram os resultados das várias configurações de redes hierárquicas simuladas por meio dos gráficos de atraso médio, energia restante e número de pacotes perdidos pela rede.

5.2.1. Atraso Médio

Na Figura 5.26 observa-se que a rede hierárquica configurada com o protocolo de roteamento AODV obteve atraso maior do que o da rede configurada com o protocolo de roteamento DSDV.

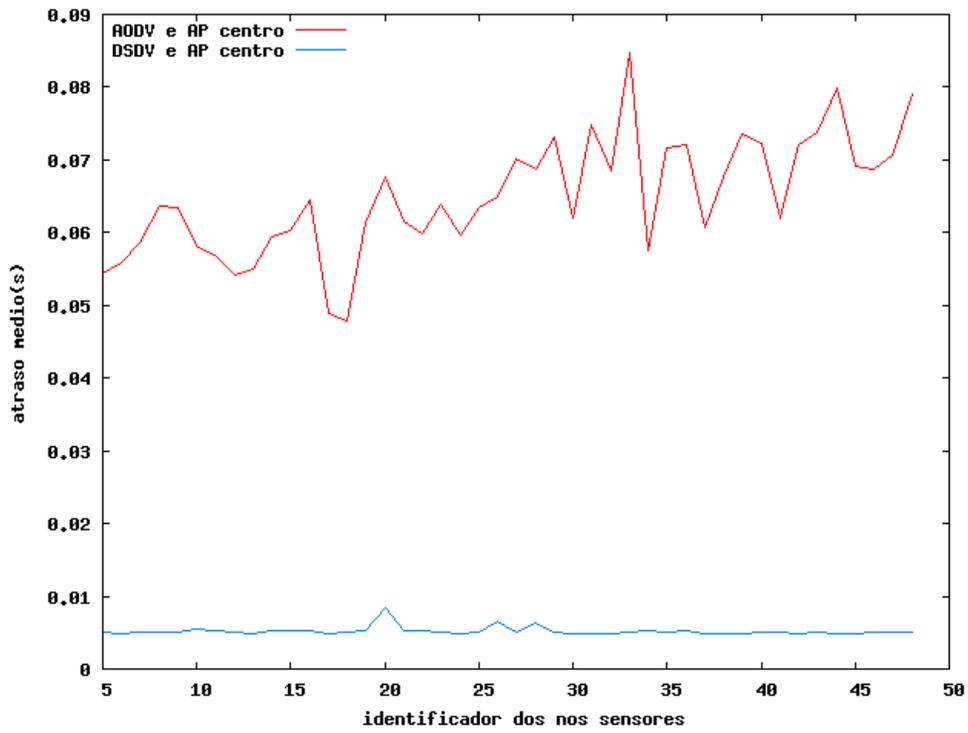


Figura 5.26. Atraso médio da rede hierárquica com 44 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro

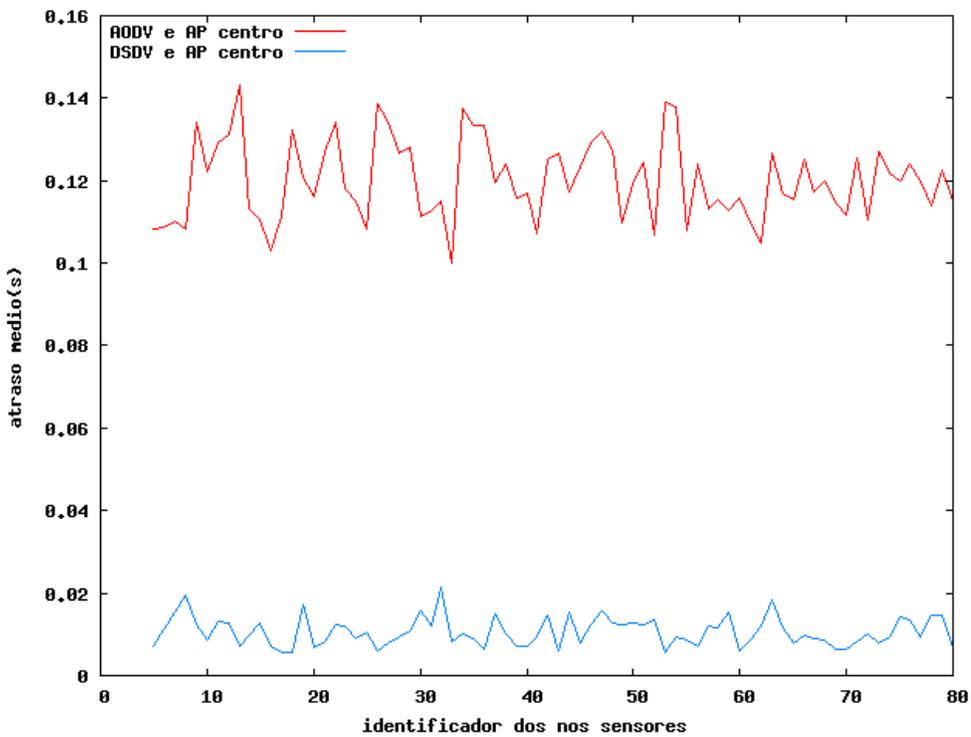


Figura 5.27. Atraso médio da rede hierárquica com 76 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro

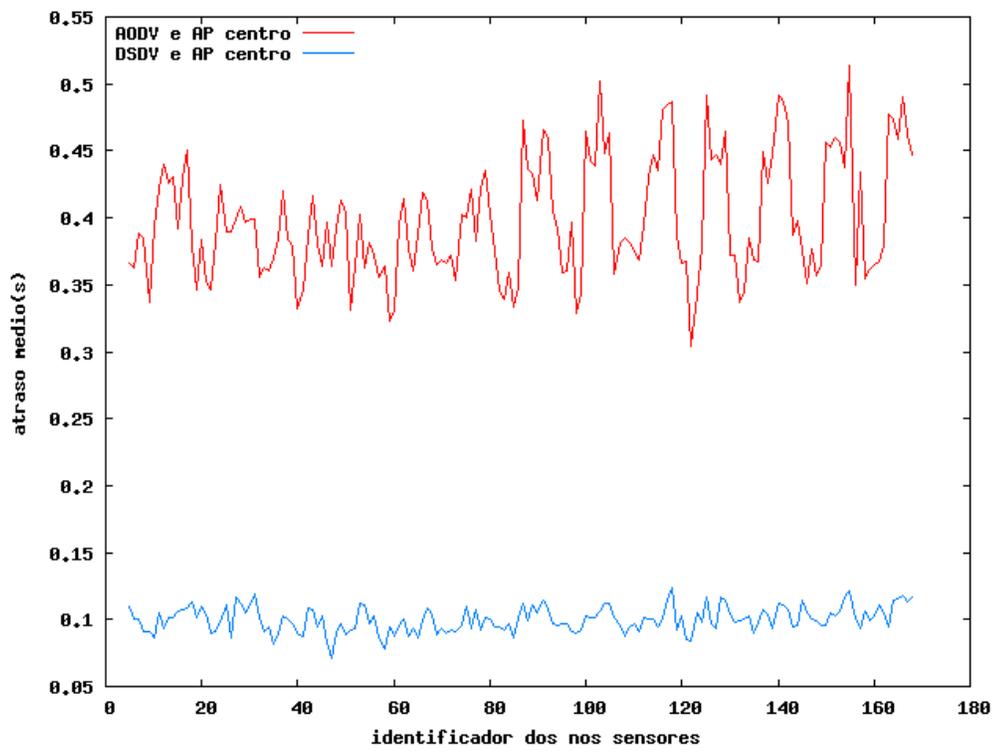


Figura 5.28. Atraso médio da rede hierárquica com 164 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro

5.2.2. Consumo de Energia

A Figura 5.29 mostra o maior consumo de energia dos nós sensores de uma rede com organização hierárquica utilizando o protocolo de roteamento DSDV.

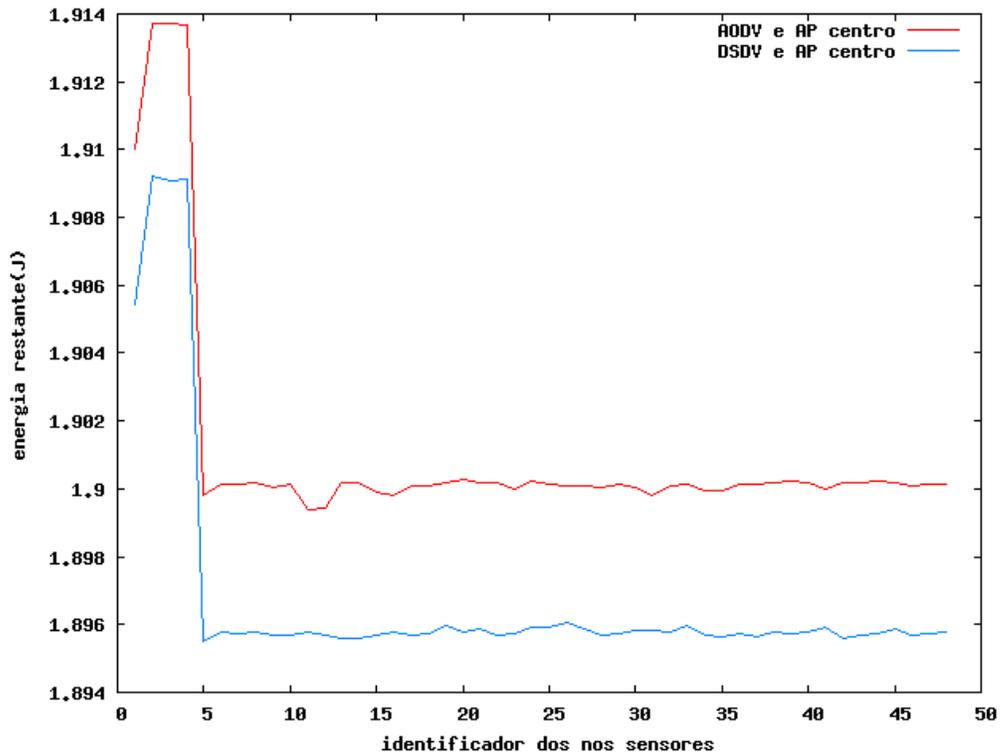


Figura 5.29. Energia restante da rede hierárquica com 44 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro

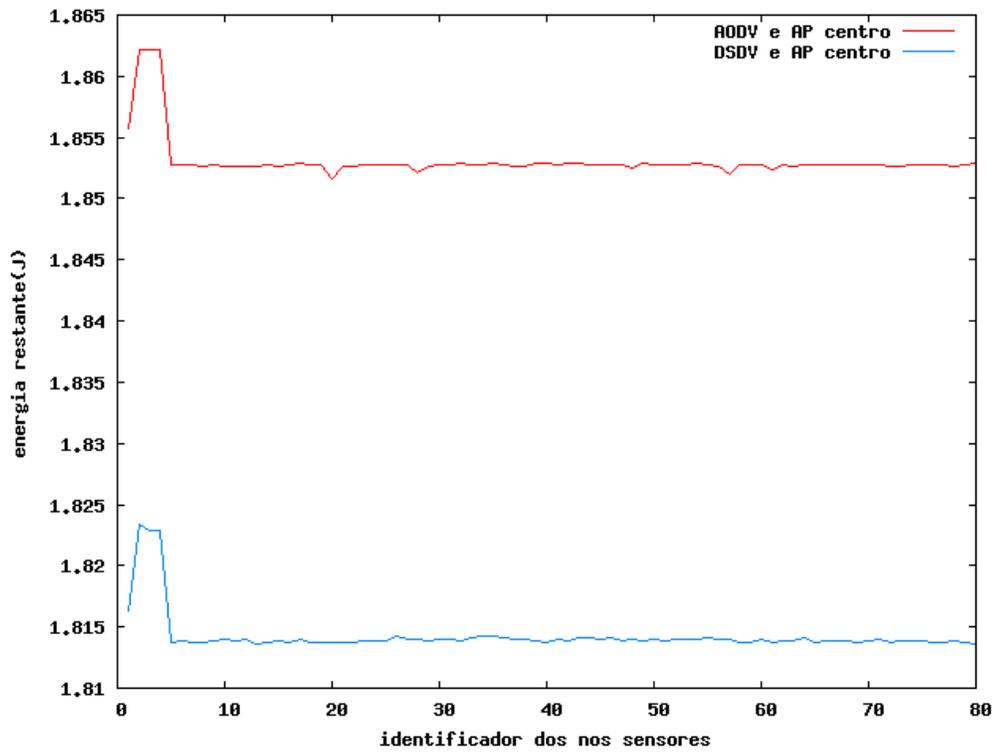


Figura 5.30. Energia restante da rede hierárquica com 76 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro

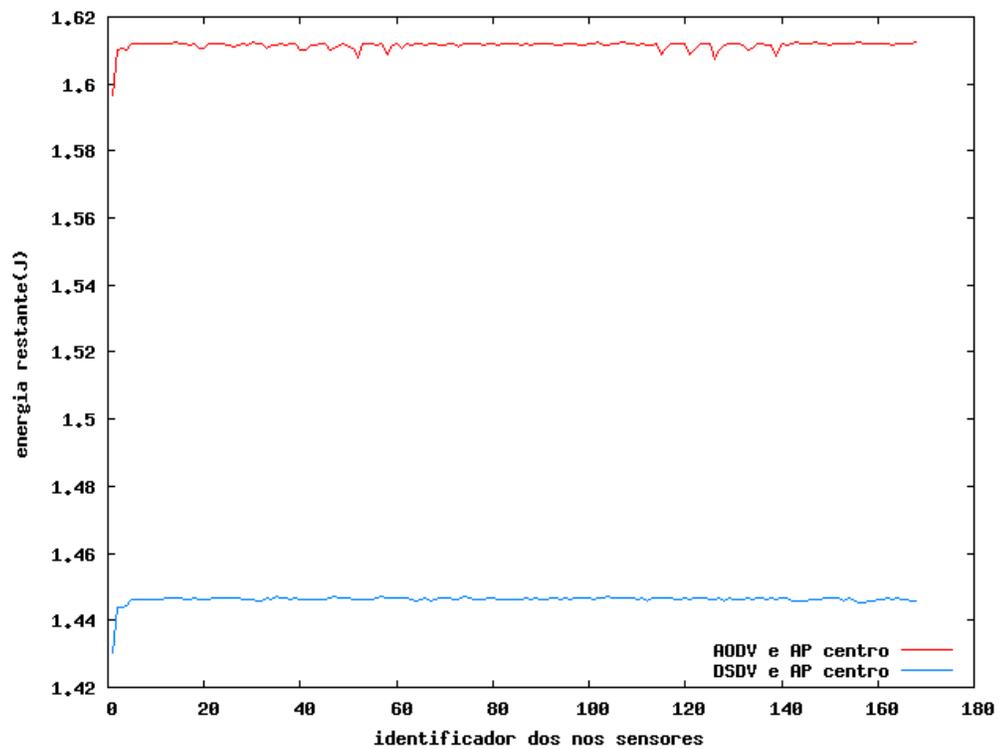


Figura 5.31. Energia restante da rede hierárquica com 164 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro

5.2.3. Número de Pacotes Perdidos

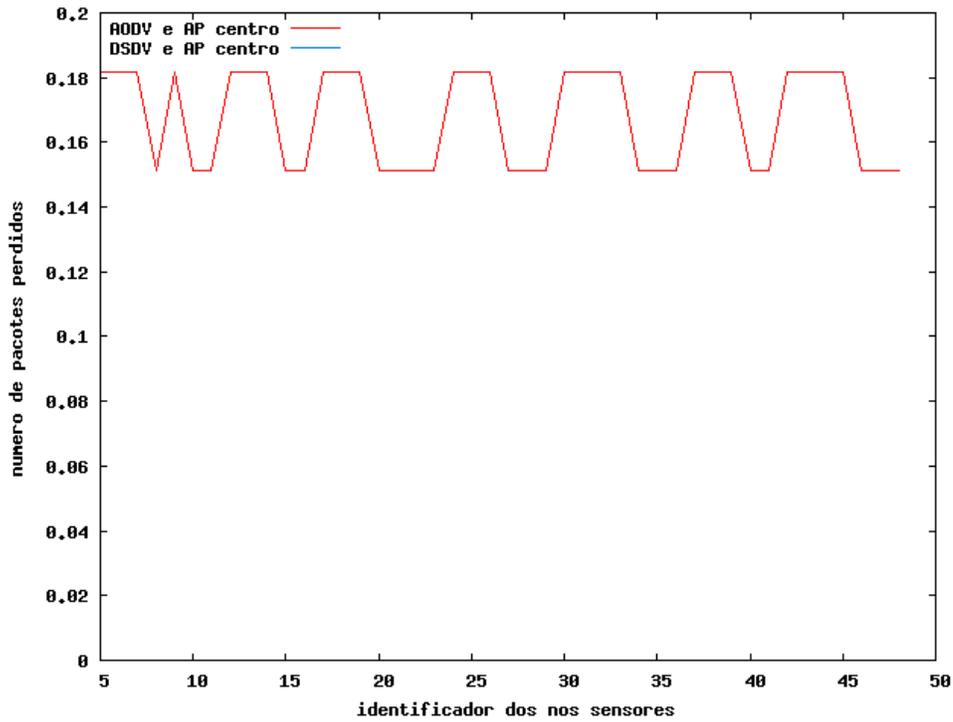


Figura 5.32. Número de pacotes perdidos da rede hierárquica com 44 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro

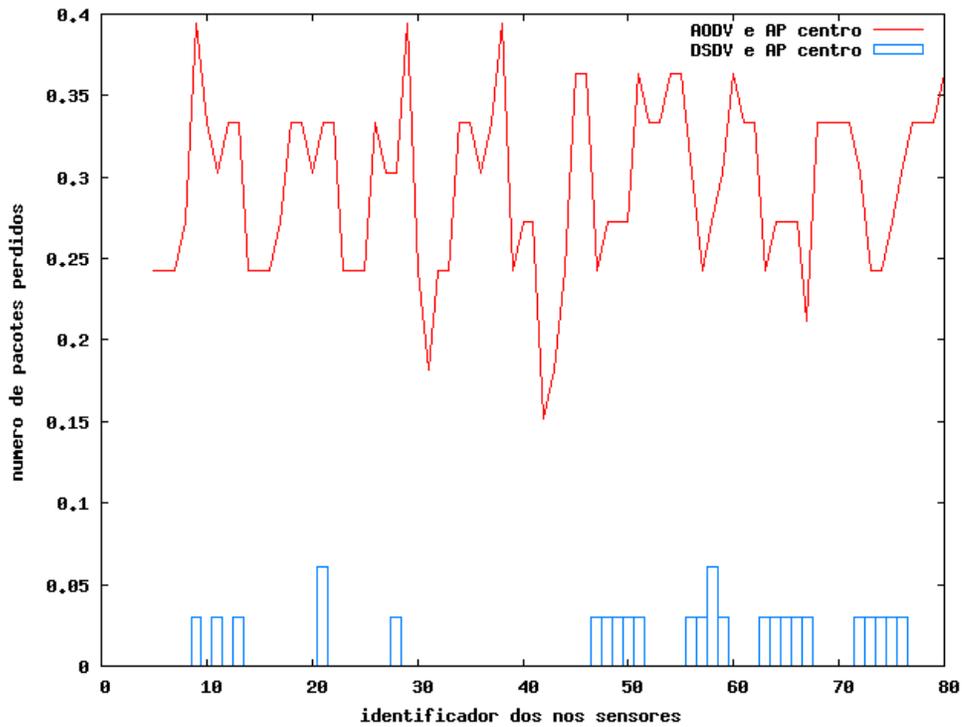


Figura 5.33. Número de pacotes perdidos da rede hierárquica com 76 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro

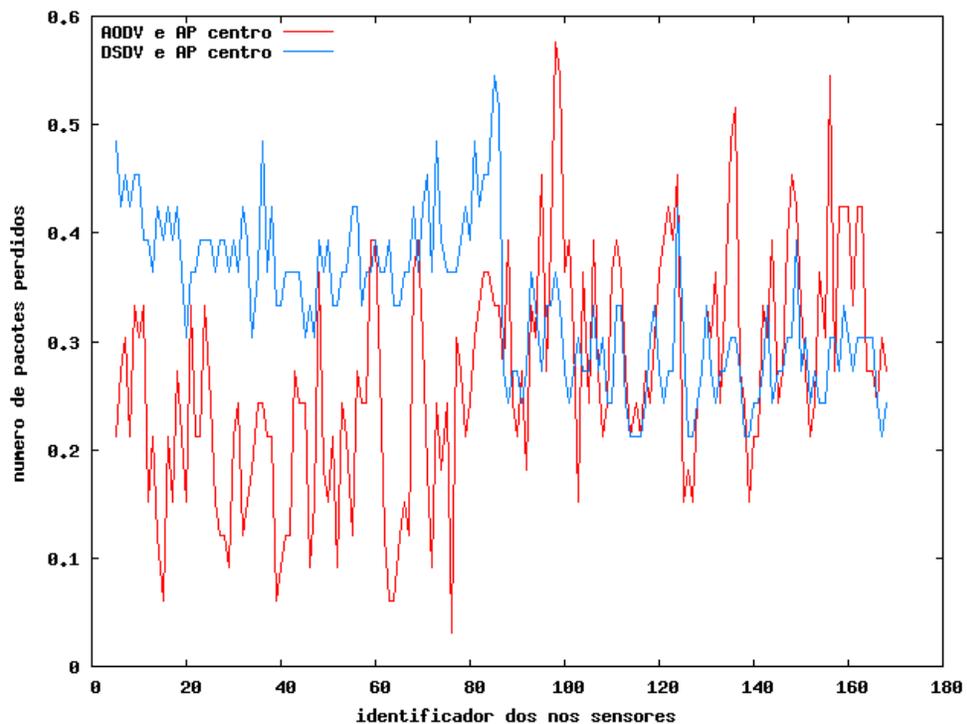


Figura 5.34. Número de pacotes perdidos da rede plana com 164 nós sensores comuns, 4 cluster-heads, protocolos de roteamento AODV e DSDV e AP no centro – Maior número de pacotes perdidos utilizando o protocolo de roteamento DSDV

As Figuras 5.26 até 5.34 mostram o comportamento das redes hierárquicas nas várias configurações simuladas. Pela análise dessas Figuras observou-se que o protocolo de roteamento DSDV obteve melhor desempenho no tempo de entrega e na quantidade de dados perdidos, e foi inferior ao protocolo de roteamento AODV no consumo de energia em todos os cenários propostos.

Outra análise observada nas Figuras é que os *cluster-heads* (dispositivos com identificadores 1, 2, 3 e 4) consumiram menor quantidade de energia do que os demais dispositivos da rede com densidades menores (rede com 44 nós sensores comuns e 76 nós sensores comuns) e consumiram maior quantidade de energia com densidade maior (164 nós sensores).

Com relação à perda de pacotes, o protocolo de roteamento DSDV obteve desempenho inferior ao AODV apenas na área de simulação com 168 nós sensores. Uma possível explicação para esse fato é que com uma maior quantidade de dispositivos, o protocolo AODV que realiza descoberta de rotas com maior frequência que o DSDV consegue rotas mais atualizadas, perdendo menor quantidade de dados.

5.3. Análise dos Resultados da Rede Plana com os Resultados da Rede Hierárquica

As Figuras 5.35 até 5.57 realizam uma comparação das redes planas com as redes hierárquicas nas áreas com a mesma quantidade de nós sensores e protocolo de roteamento. Essa comparação serviu para mostrar se é mais viável o uso de uma rede plana ou hierárquica com as mesmas configurações.

5.3.1. Atraso Médio

Na Figura 5.35, utilizando o protocolo de roteamento AODV, a rede hierárquica obteve menor atraso médio do que a rede plana. Uma explicação para esse comportamento é que a densidade da rede hierárquica é menor, diminuindo a sobrecarga de dados da rede e melhorando o tempo de entrega de pacotes.

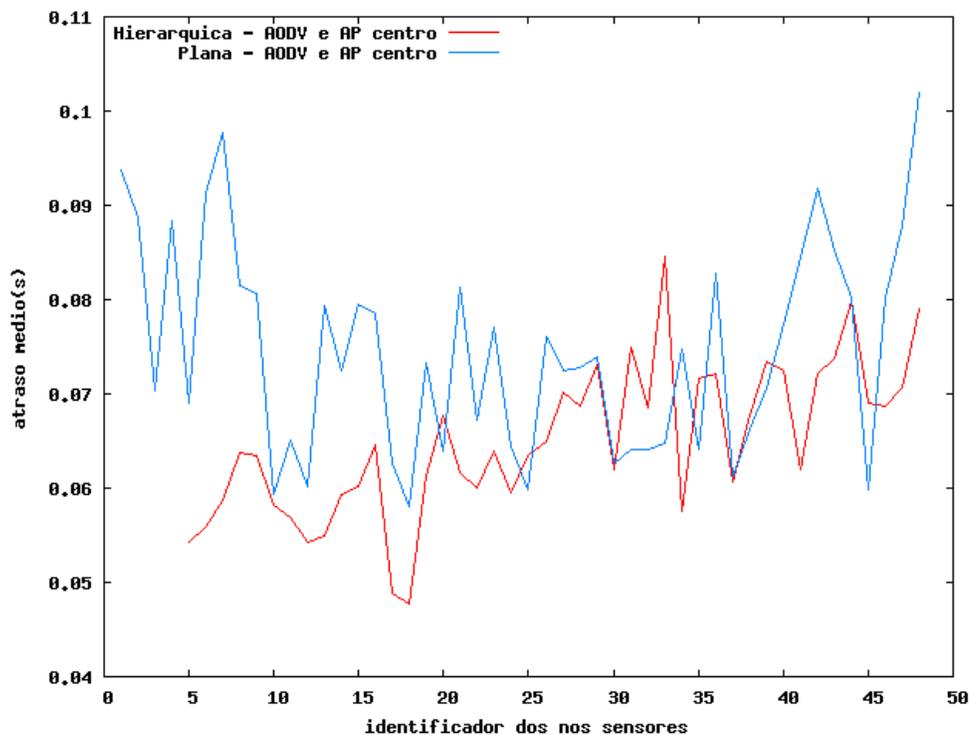


Figura 5.35. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro

Na Figura 5.36, utilizando o protocolo de roteamento DSDV, observa-se que o desempenho da rede hierárquica foi menor do que o da rede plana. Isso pode ser explicado pelo comportamento do protocolo DSDV, que sofre menor influência com o aumento da densidade da rede, pois realiza descoberta de rotas com menor frequência, minimizando o número de dados trafegando pela rede, e melhorando o desempenho da entrega de dados.

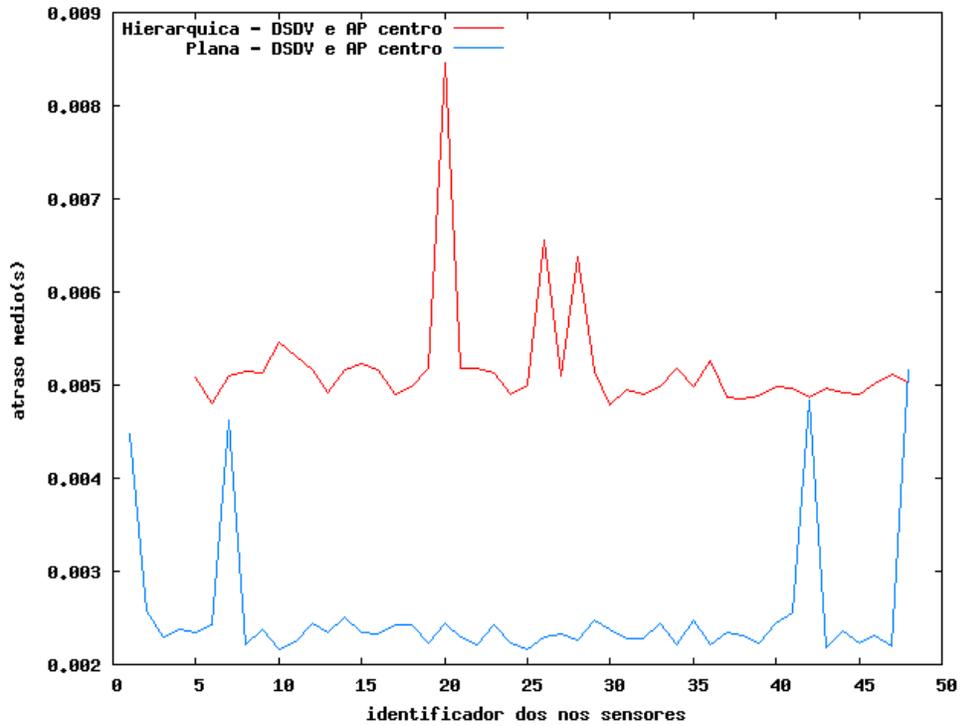


Figura 5.36. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro

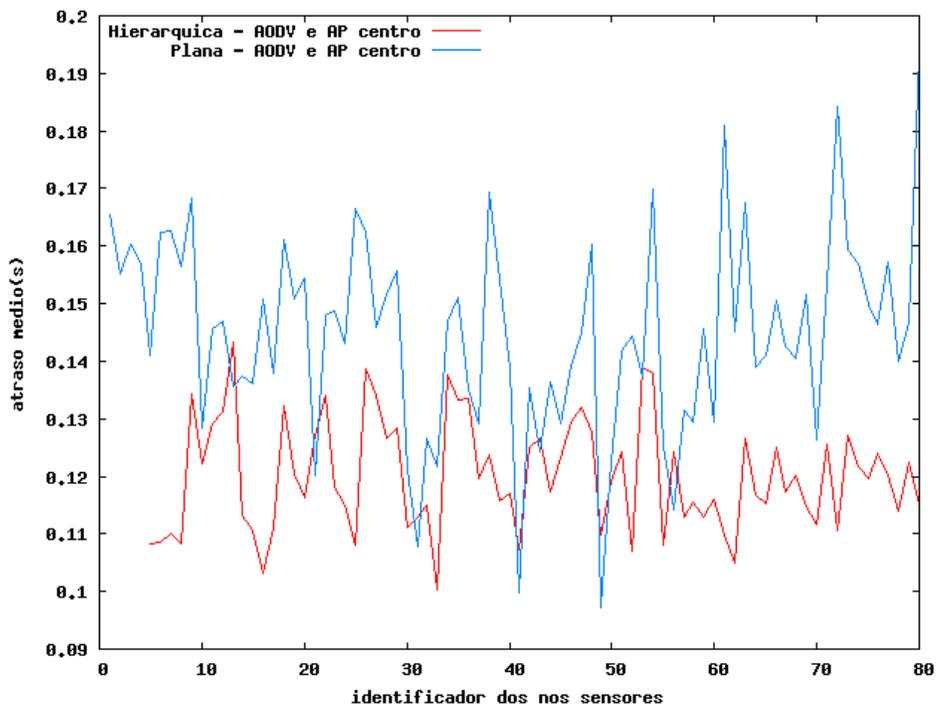


Figura 5.37. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro – Protocolo AODV possibilitou menor atraso na rede hierárquica (desempenho melhor com menores densidades)

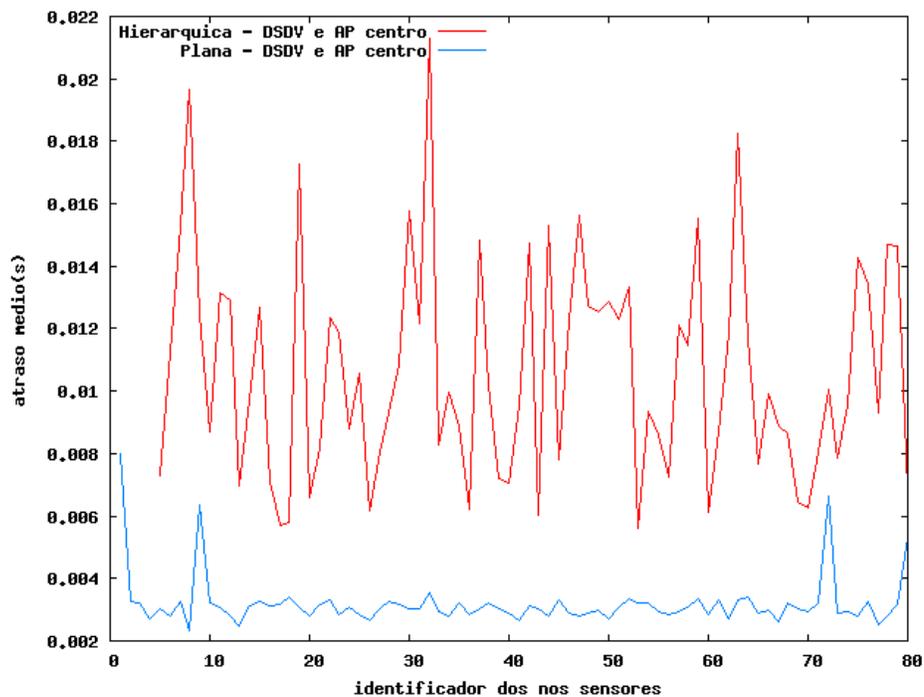


Figura 5.38. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro – Protocolo DSDV obteve melhor desempenho na rede plana

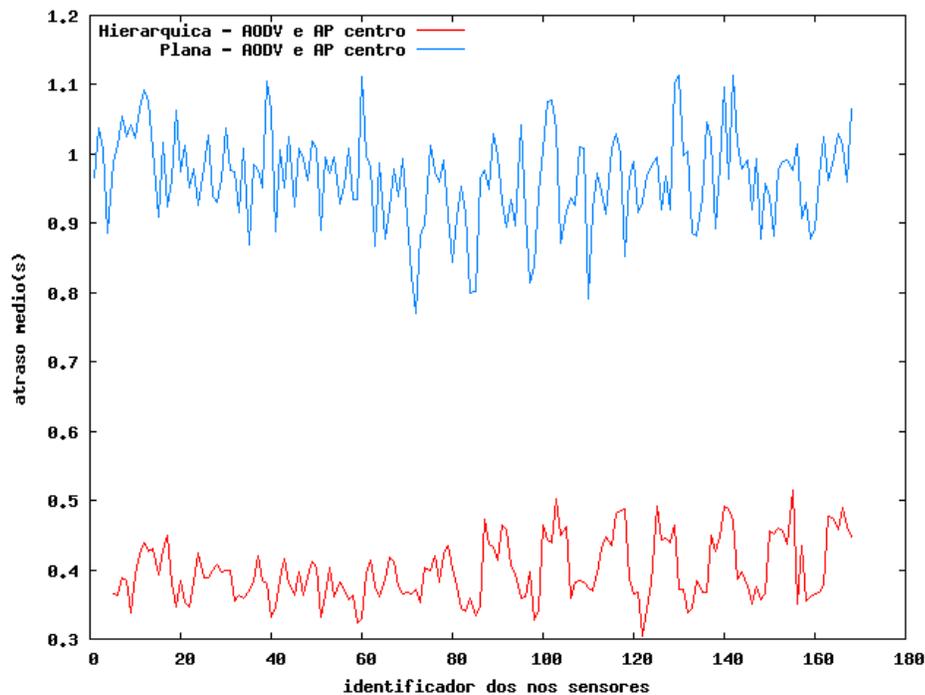


Figura 5.39. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro – Melhor resultado com o protocolo AODV na rede hierárquica

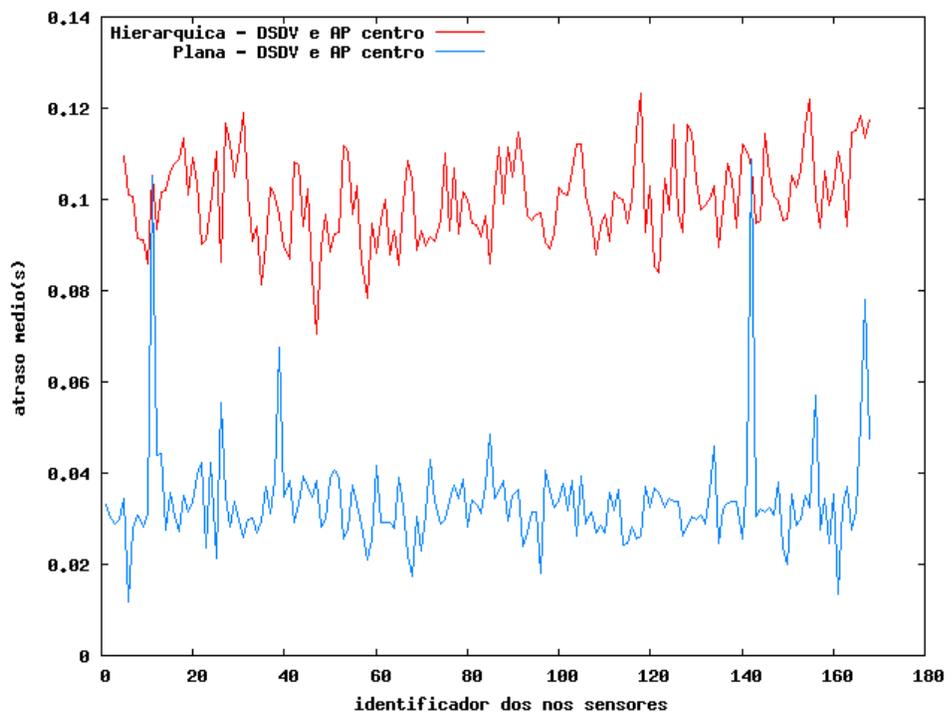


Figura 5.40. Atraso médio da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro – Rede plana obteve vantagem sobre a rede hierárquica utilizando o protocolo DSDV

5.3.2. Consumo de Energia

Esta seção apresenta os gráficos comparativos do consumo de energia das redes planas e das redes hierárquicas utilizando o mesmo protocolo de roteamento. A Figura 5.41 mostra o maior consumo de energia da rede plana em relação à hierárquica.

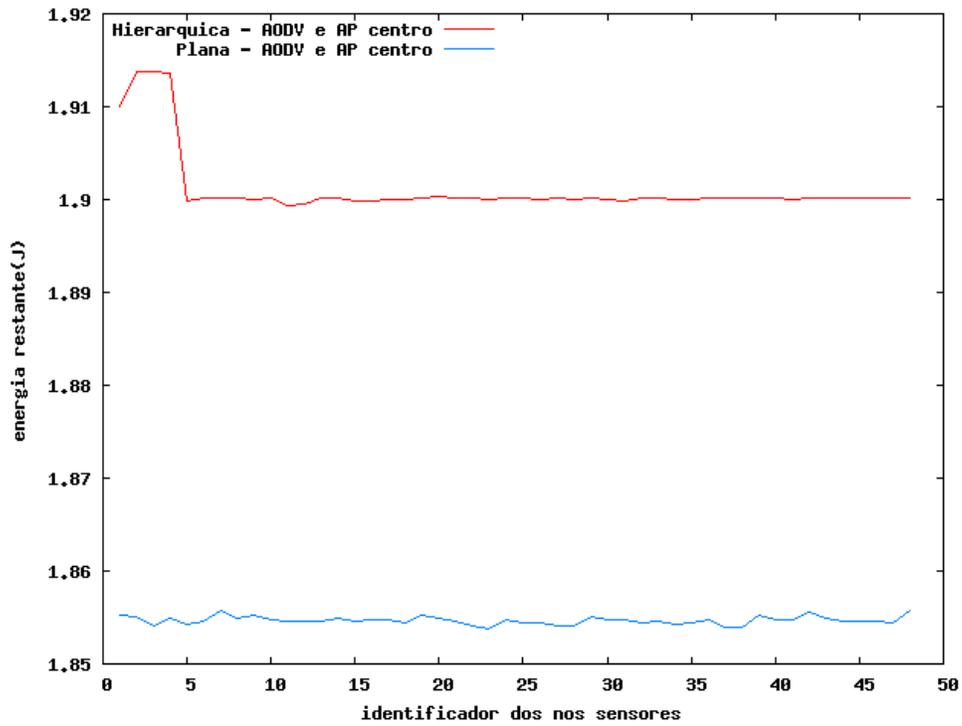


Figura 5.41. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro – Melhor resultado na rede hierárquica

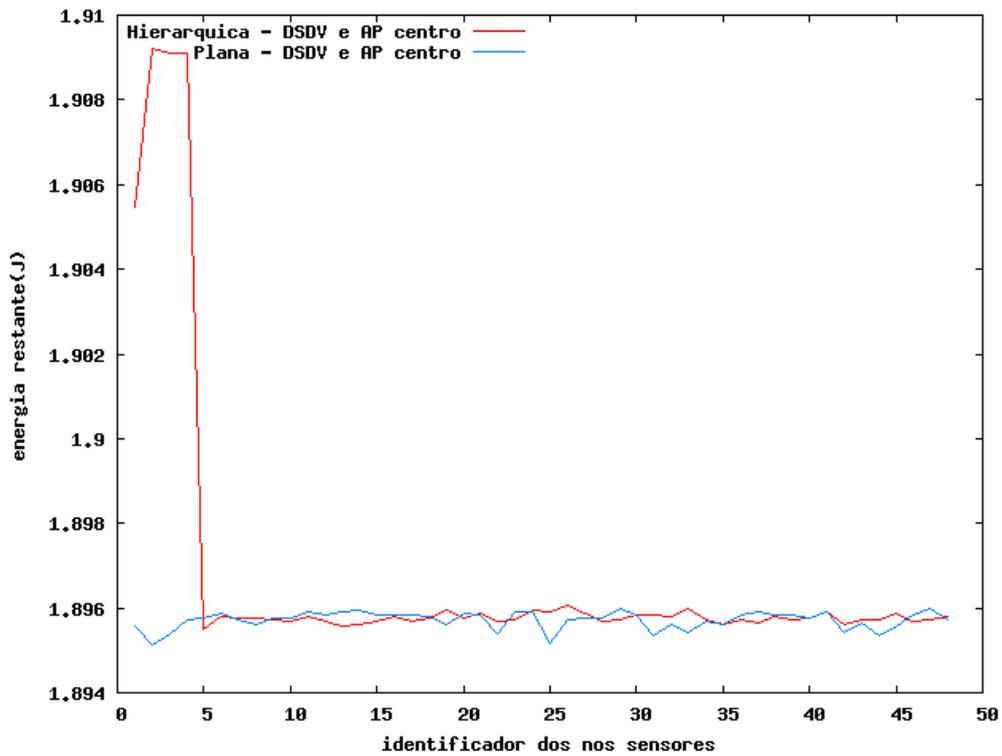


Figura 5.42. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro – Desempenho semelhante das redes

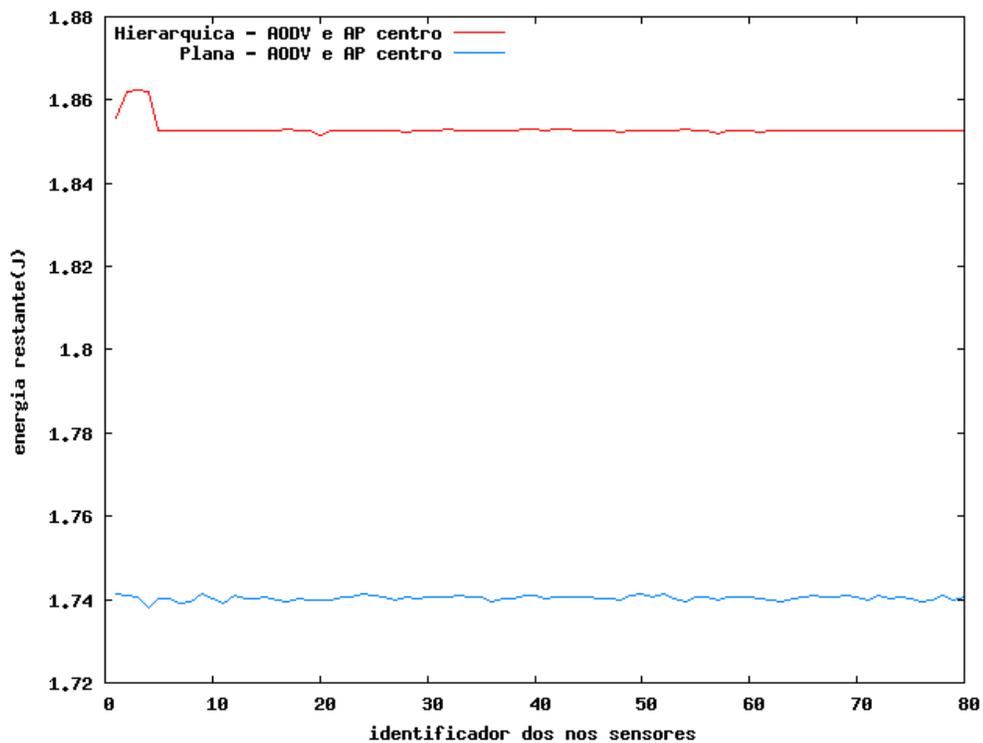


Figura 5.43. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro – Vantagem para a rede hierárquica

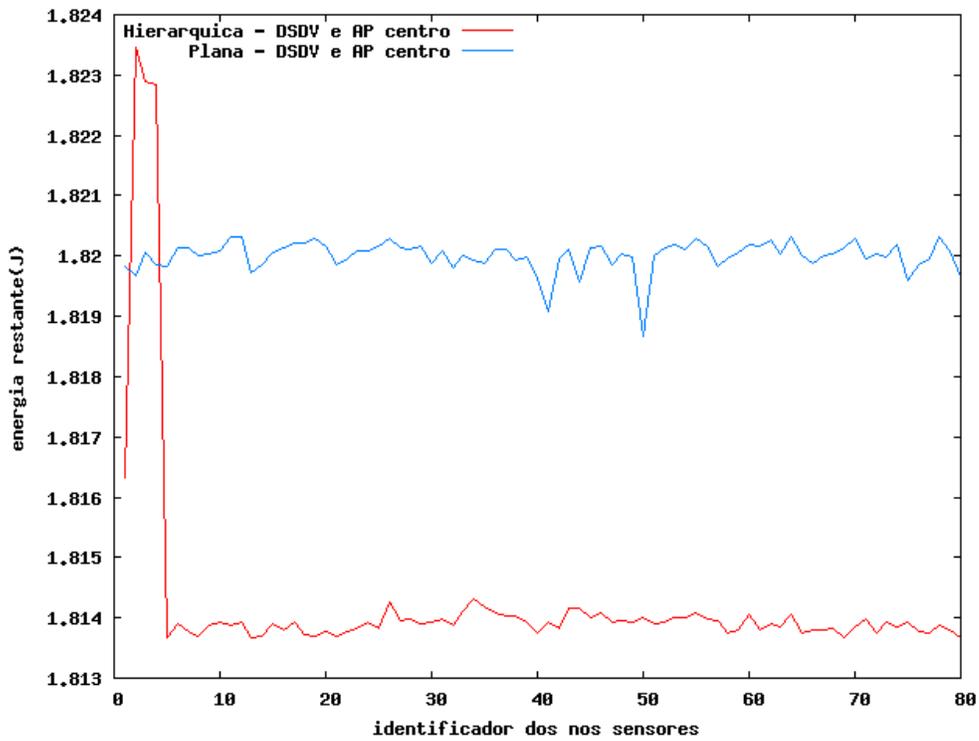


Figura 5.44. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro – Rede plana obteve melhor desempenho

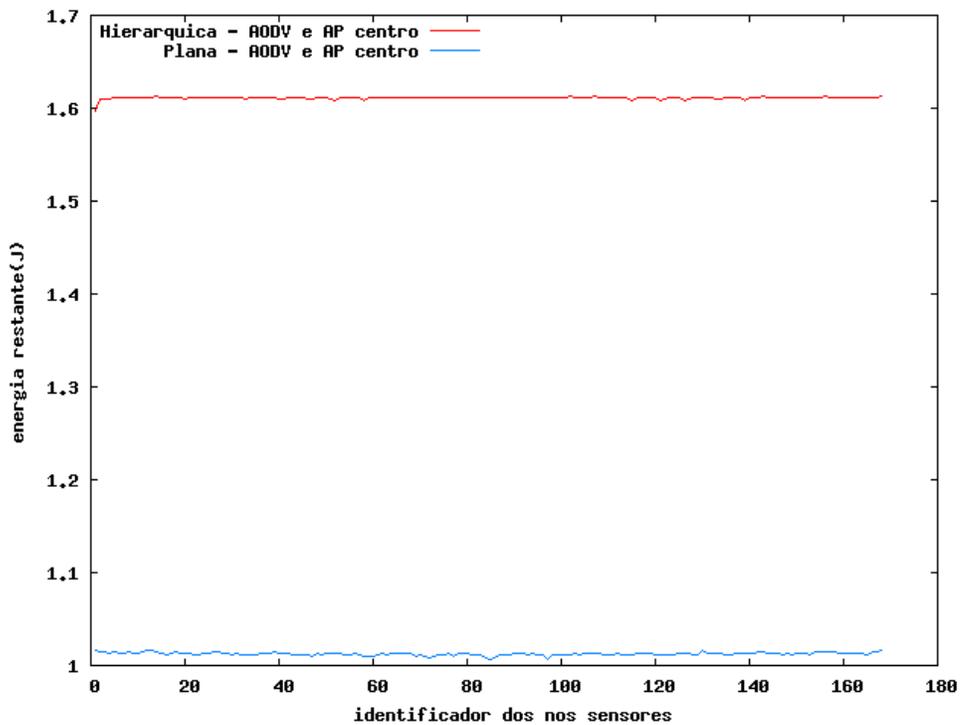


Figura 5.45. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro – Vantagem para a rede hierárquica

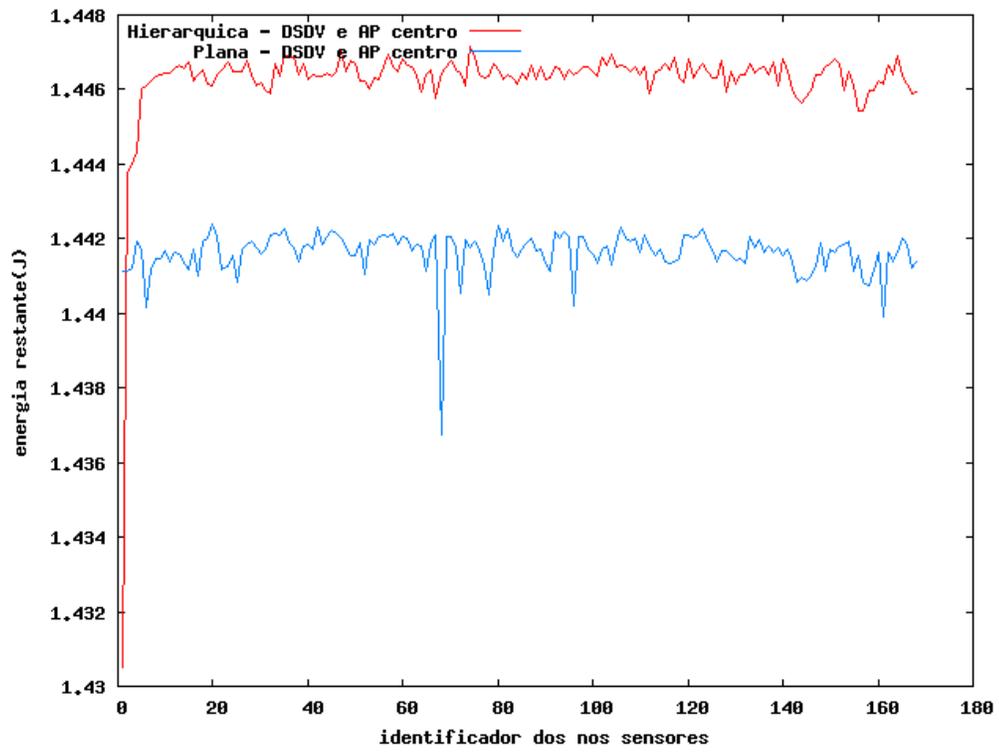


Figura 5.46. Energia restante da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro – Rede plana foi inferior

5.3.3. Número de Pacotes Perdidos

Esta seção realiza comparação entre o número de pacotes perdidos nas redes planas e nas redes hierárquicas utilizando o mesmo protocolo de roteamento.

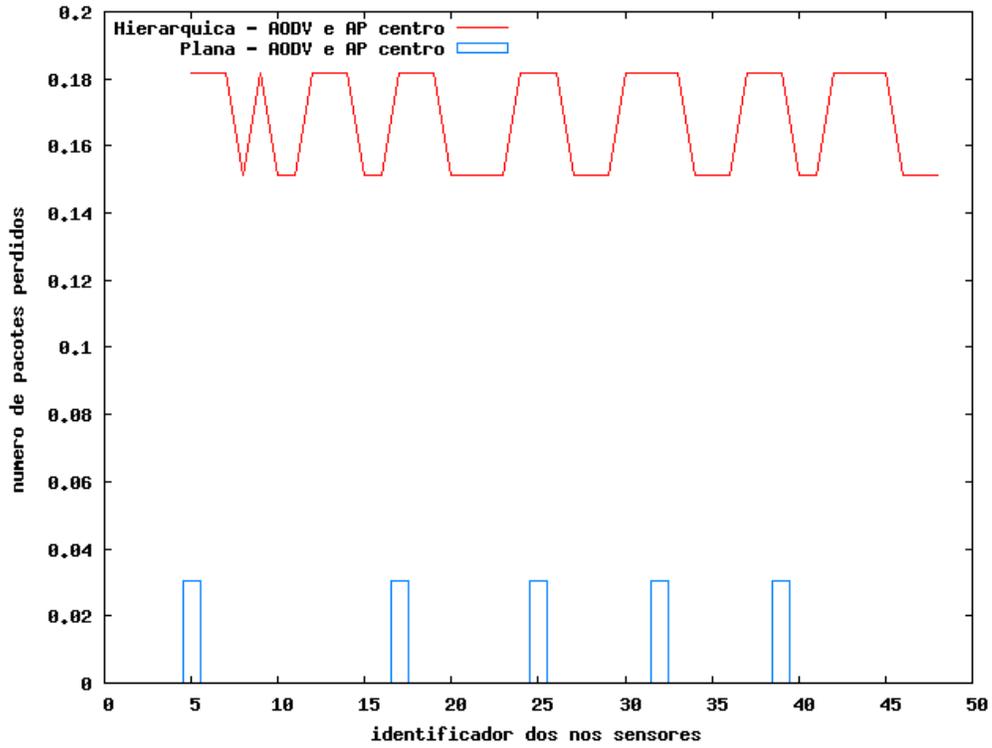


Figura 5.47. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro – Rede plana foi superior

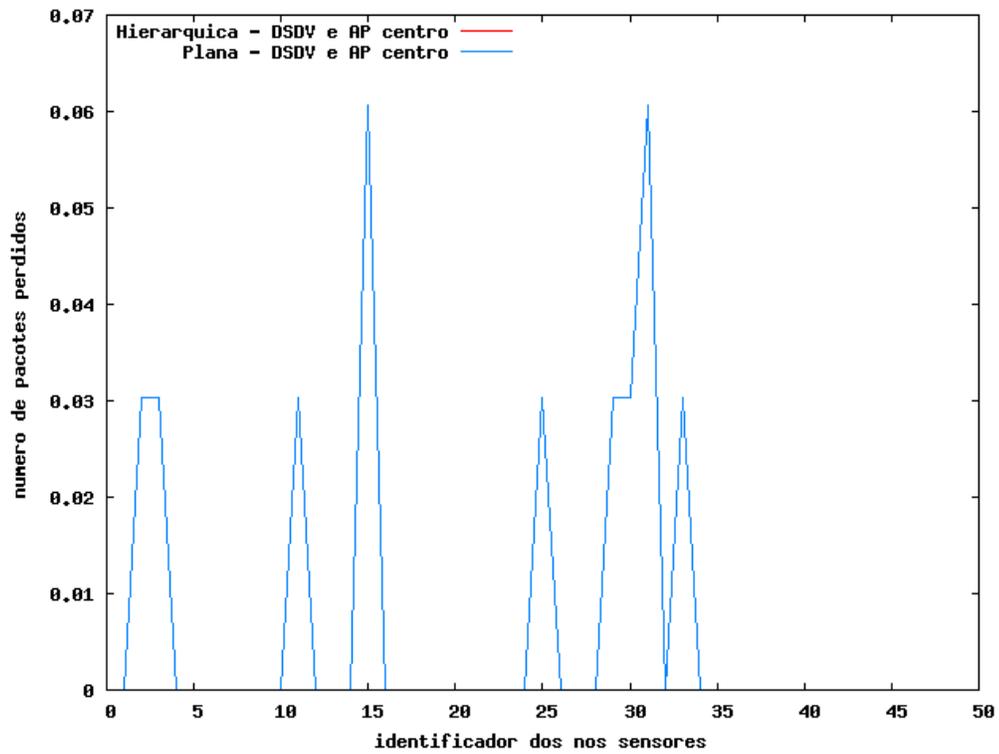


Figura 5.48. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 48 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro – Rede hierárquica sem perdas

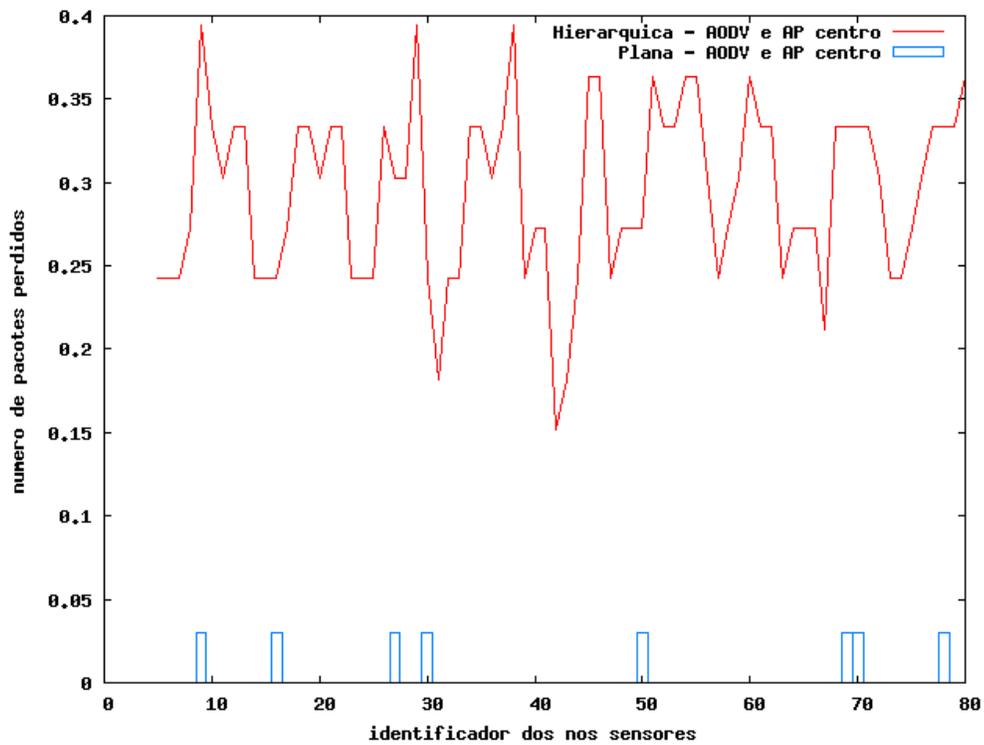


Figura 5.49. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro – Rede plana foi superior

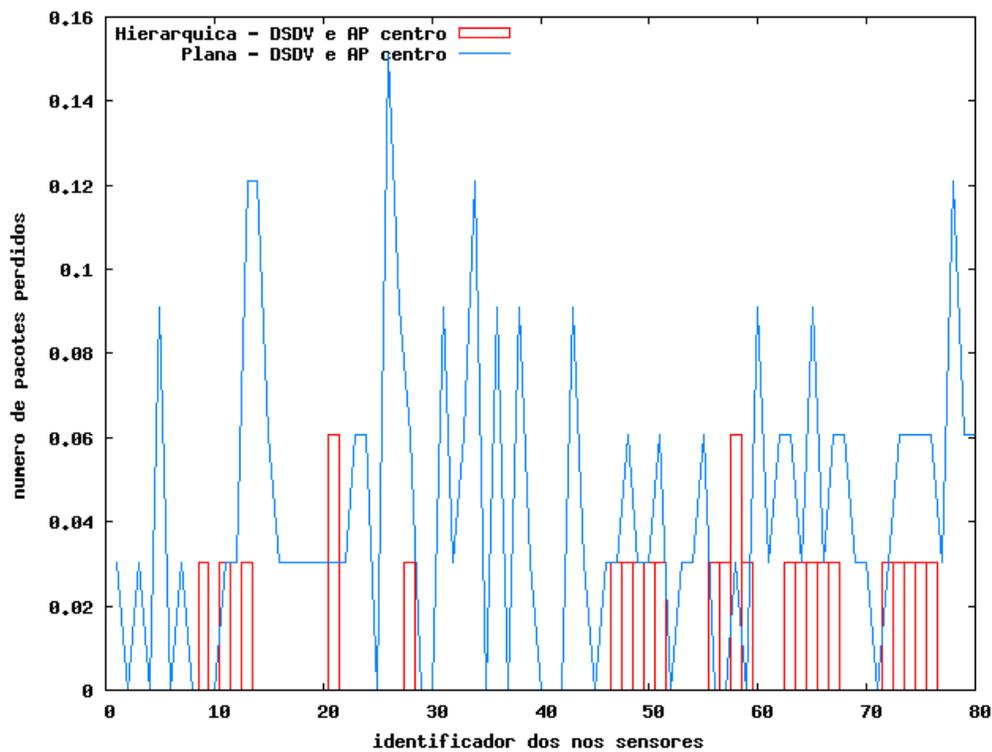


Figura 5.50. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 80 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro – Rede plana foi inferior

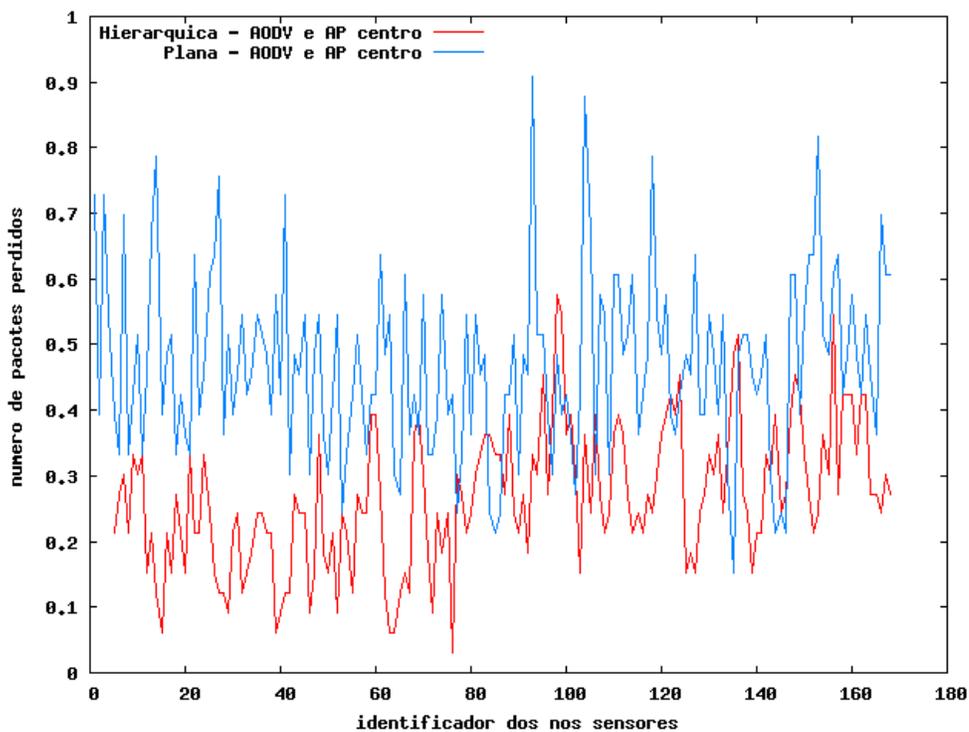


Figura 5.51. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento AODV e AP no centro – Rede plana foi inferior

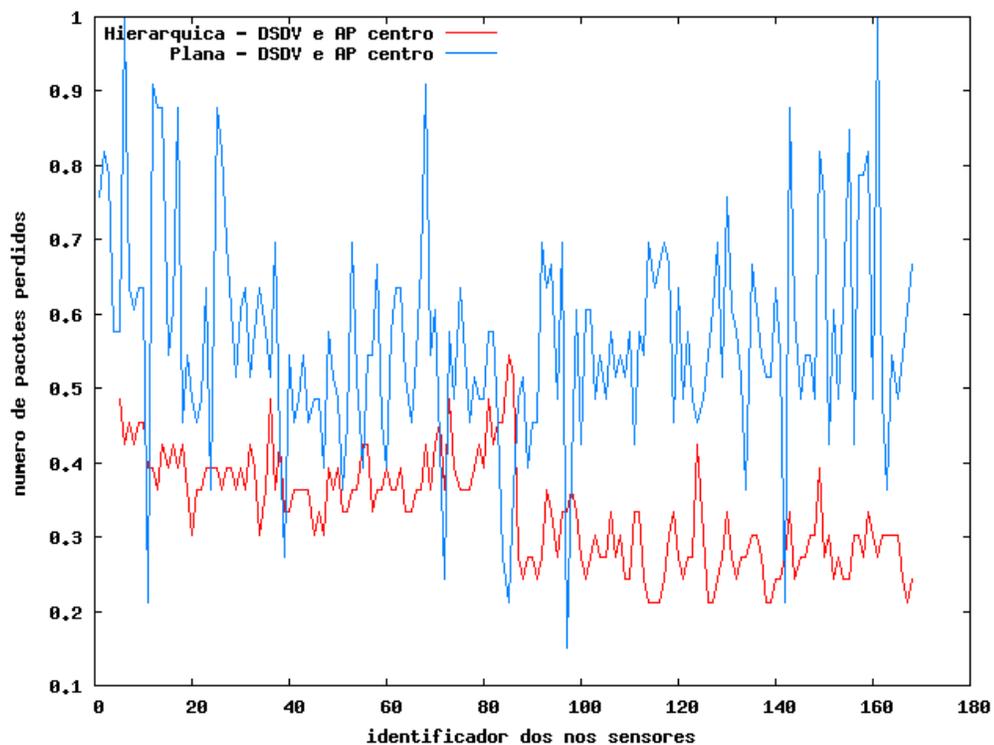


Figura 5.52. Número de pacotes perdidos da rede plana e da rede hierárquica com 168 nós sensores, protocolo de roteamento DSDV e AP no centro – Rede plana foi inferior

As Figuras 5.35 até 5.52 possibilitaram concluir quais as melhores configurações entre as redes planas e as redes hierárquicas utilizando o mesmo protocolo de roteamento e a mesma área de simulação. Analisando o atraso médio das redes simuladas, obteve-se melhor resultado em todas as áreas de simulação (48 nós sensores, 80 nós sensores e 168 nós sensores) utilizando o protocolo AODV com as redes hierárquicas. Ainda analisando o atraso médio, em todas as áreas de simulação que utilizaram o protocolo DSDV obtiveram-se melhores resultados com a organização plana da rede. Para encontrar então a melhor configuração de rede e protocolo com menor atraso médio, comparou-se as mesmas áreas de simulação utilizando organização hierárquica e protocolo de roteamento AODV com a organização plana e protocolo de roteamento DSDV. Essas comparações podem ser observadas nas Figuras 5.53, 5.54 e 5.55, em que a organização plana com protocolo DSDV obteve melhores resultados em todas as áreas de simulação.

Com relação ao consumo de energia, utilizando tanto o protocolo de roteamento AODV como o DSDV os melhores resultados foram encontrados com a organização hierárquica da rede. Para encontrar então a melhor configuração de rede hierárquica visando menor consumo de energia, foi observada a comparação entre as redes hierárquicas variando

o protocolo de roteamento, constatando-se que o protocolo de roteamento AODV obteve menor consumo de energia em todas as configurações de rede hierárquica quando comparado com o protocolo DSDV também em rede hierárquica.

Analisando o número de pacotes perdidos pelas várias configurações de rede, observou-se que nas áreas com 48 e 80 nós sensores que utilizaram o protocolo AODV, obteve-se melhores resultados com a organização plana da rede, enquanto que utilizando o protocolo DSDV, a melhor organização de rede foi a hierárquica. Para concluir qual combinação é a melhor (rede plana + AODV ou rede hierárquica + DSDV), realizaram-se duas comparações, mostradas pelas Figuras 5.56 e 5.57, em que o par plana + AODV se saiu melhor na área com 80 nós sensores, e o par hierárquica + DSDV na área com 48 nós sensores. Na área com 168 nós sensores, tanto o protocolo AODV como o DSDV obtiveram melhores resultados utilizando organização hierárquica, sendo o AODV melhor que o DSDV na comparação em rede hierárquica.

5.3.4. Comparações Adicionais

Após uma conclusão parcial de algumas configurações de redes planas e hierárquicas utilizando o mesmo protocolo de roteamento, constatou-se que em alguns casos seria necessária a comparação entre diferentes protocolos de roteamento e diferentes organizações da rede, o que é mostrado inicialmente pela Figura 5.53. Nela, foi observado que o atraso médio obtido pela rede hierárquica em conjunto com o protocolo AODV foi maior do que o atraso médio obtido pela rede plana utilizando o protocolo de roteamento DSDV.

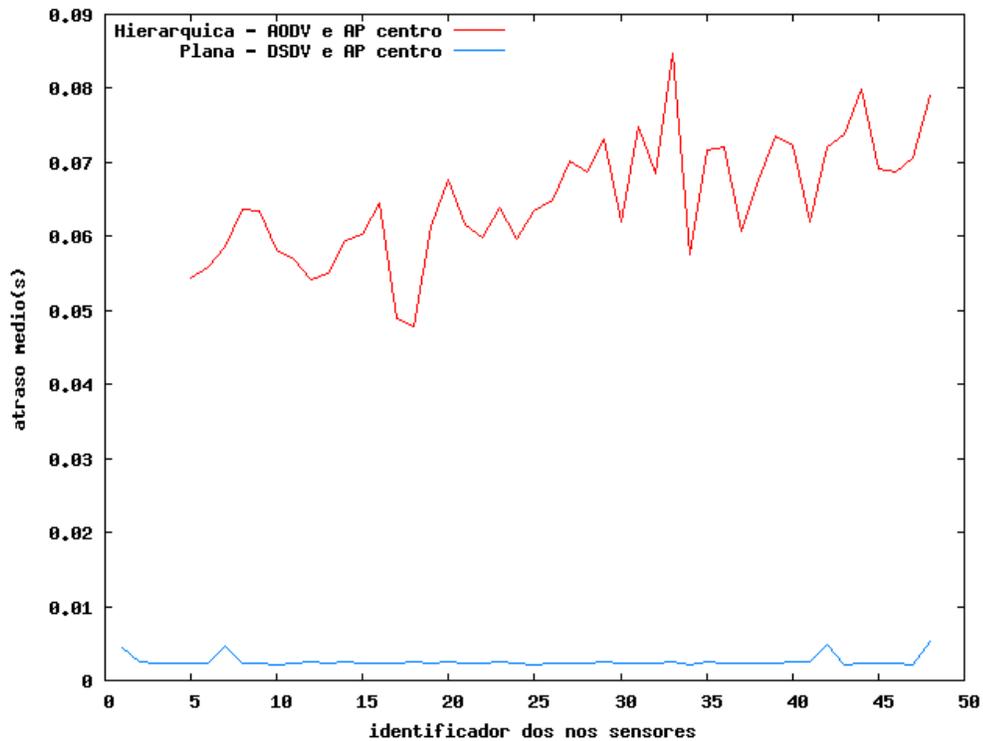


Figura 5.53. Atraso médio da rede plana utilizando o protocolo DSDV e da rede hierárquica utilizando o AODV na área de simulação com 48 nós sensores

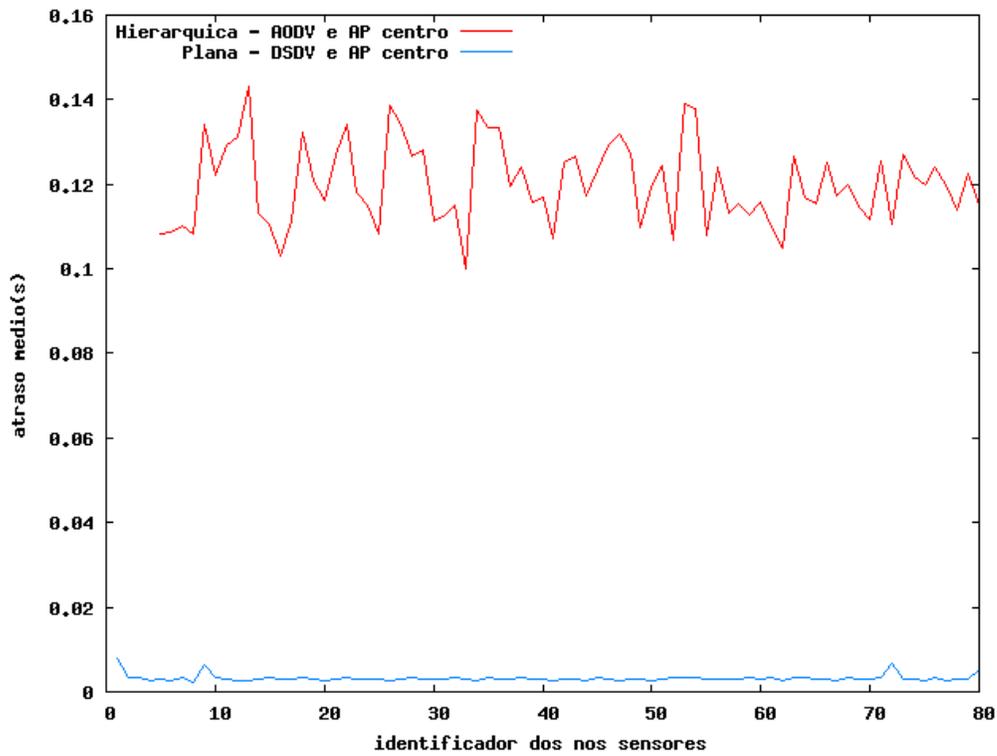


Figura 5.54. Atraso médio da rede plana utilizando o protocolo DSDV e da rede hierárquica utilizando o AODV na área de simulação com 80 nós sensores

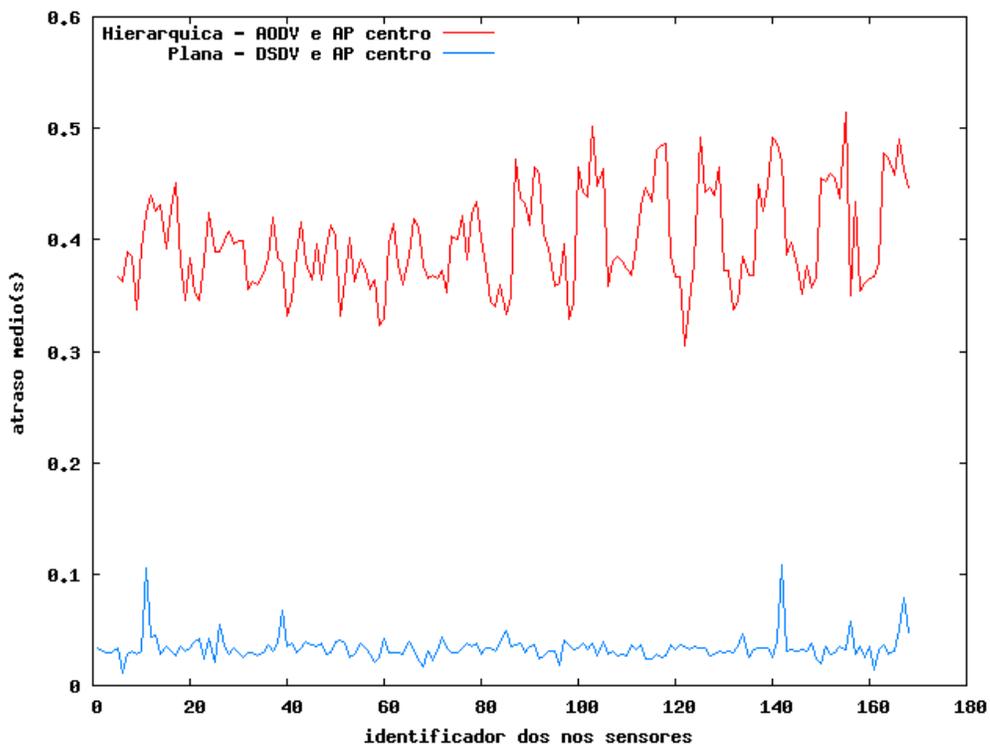


Figura 5.55. Atraso médio da rede plana utilizando o protocolo DSDV e da rede hierárquica utilizando o AODV na área de simulação com 168 nós sensores

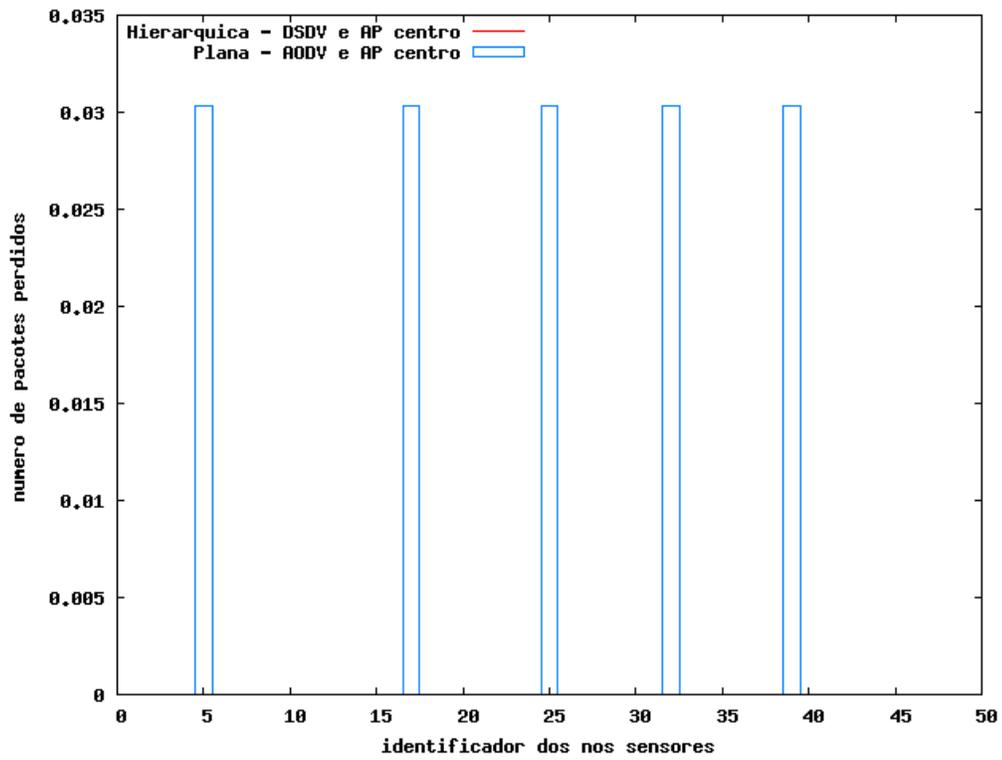


Figura 5.56. Número de pacotes perdidos da rede plana utilizando o protocolo AODV e da rede hierárquica utilizando o DSDV na área de simulação com 48 nós sensores

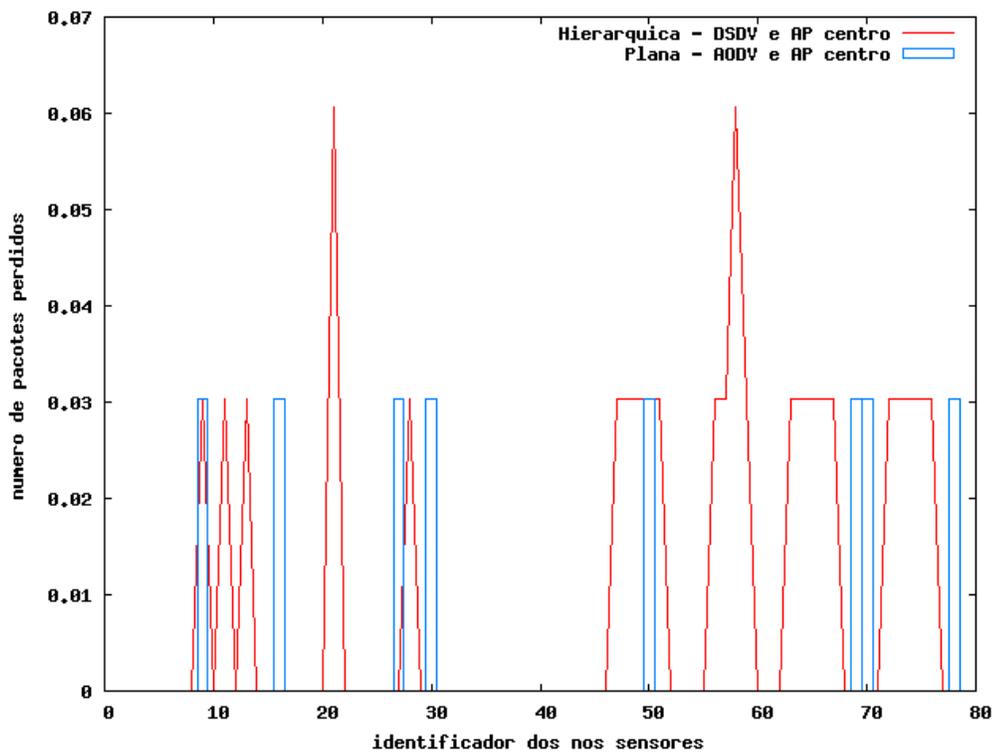


Figura 5.57. Número de pacotes perdidos da rede plana utilizando o protocolo AODV e da rede hierárquica utilizando o DSDV na área de simulação com 80 nós sensores

Conclusão e Trabalhos Futuros

O presente trabalho simulou e analisou várias configurações diferentes de redes de sensores sem fio com o objetivo de definir a influência dos parâmetros de configuração das simulações visando o maior tempo de vida, o atraso médio e o número de dados perdidos por uma rede de sensores para monitoramento das videiras.

6.1. Conclusão

Após as várias análises das várias configurações de redes simuladas, chegou-se a conclusão que a localização do AP está diretamente relacionada ao consumo de energia, atraso médio e ao número de pacotes perdidos em uma rede de sensores sem fio. A localização do AP deve visar à diminuição da distância máxima entre ele e os nós sensores da rede, minimizando o problema de encaminhamento de dados por nós sensores intermediários para os nós sensores que não possuem capacidade de comunicação direta com o AP. Nós sensores mais distantes do AP possuem maior tempo de atraso e maior perda de dados, pois dependem de nós intermediários para encaminhamento dos dados. Nós sensores mais próximos ao AP possuem menor tempo de atraso e perda de dados, porém consomem mais energia devido à necessidade de enviar os seus dados e os dados encaminhados por nós sensores mais distantes. Com relação ao consumo de energia, atraso médio e perda de dados dos protocolos AODV e

DSDV nas redes planas, observou-se que o protocolo DSDV se saiu melhor no atraso médio e no consumo de energia em todas as configurações quando comparado com o AODV.

A densidade da rede está diretamente relacionada ao consumo de energia, atraso médio e perda de pacotes, pois um número maior de nós sensores causa aumento de dados trafegando pela rede, inclusive de dados de controle para descoberta de novas rotas.

Nas redes hierárquicas observou-se menor atraso médio em todos os cenários simulados utilizando o protocolo DSDV, e menor consumo de energia em todos os cenários utilizando o protocolo AODV. Considerando o número de pacotes perdidos, nos cenários com 48 nós sensores e 80 nós sensores foram obtidos melhores resultados utilizando o protocolo DSDV e no cenário com 168 nós sensores foi obtido melhor resultado utilizando o protocolo AODV.

Na comparação final entre as redes planas e as redes hierárquicas, visando definir qual a melhor opção de configuração para os três cenários simulados, observou-se que o menor atraso foi obtido utilizando-se a rede plana com o protocolo de roteamento DSDV. Esse menor atraso é devido principalmente ao envio direto dos nós sensores ao AP sem necessidade do intermédio dos *cluster-heads*, o que aumenta o atraso médio de entrega de pacotes. O menor consumo de energia na comparação das redes planas com as redes hierárquicas foi obtido utilizando-se redes hierárquicas em conjunto com o protocolo de roteamento AODV. Considerando o número de pacotes perdidos, no cenário contendo 48 nós sensores o melhor desempenho foi obtido utilizando-se uma organização plana de rede em conjunto com o protocolo DSDV. No cenário contendo 80 nós sensores, as menores perdas foram obtidas com uma organização plana da rede em conjunto com o protocolo AODV e no cenário contendo 168 nós sensores, o melhor resultado considerando o número de pacotes perdidos foi obtido utilizando-se uma rede com organização hierárquica e protocolo de roteamento AODV. A Tabela 6.1 auxilia na comparação entre os melhores resultados nas três áreas de simulação.

Tabela 6.1. *Melhor configuração encontrada para cada área de simulação em cada parâmetro de interesse*

[Áreas][Parâmetros]	Atraso Médio	Consumo de Energia	Número de Pacotes Perdidos
48 nós sensores	Rede Plana + Protocolo de Roteamento DSDV	Rede Hierárquica + Protocolo de Roteamento AODV	Rede Plana + Protocolo de Roteamento DSDV
80 nós sensores	Rede Plana + Protocolo de Roteamento DSDV	Rede Hierárquica + Protocolo de Roteamento AODV	Rede Plana + Protocolo de Roteamento AODV
168 nós sensores	Rede Plana + Protocolo de Roteamento DSDV	Rede Hierárquica + Protocolo de Roteamento AODV	Rede Hierárquica + Protocolo de Roteamento AODV

6.2. Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros podem ser criadas novas simulações contendo uma distribuição diferente dos nós sensores pela área de monitoramento, um número maior de nós sensores pela área de monitoramento, utilização de mais de um AP na área de monitoramento, utilização de outros protocolos de roteamento, como o LEACH e o DD e a adição de mais *cluster-heads* na área simulada. Ainda como trabalhos futuros, poderá ser implantada uma RSSF real para monitoramento climático nas plantações de uva, configurada com os parâmetros de configuração simulados neste trabalho.

Referências Bibliográficas

ABOLHASAN, M.; WYSOCKI, T.; DUTKIEWICZ, E. *A review of routing protocols for mobile ad hoc networks*. Ad Hoc Networks. Vol. 2, No. 1, janeiro, 2004, pages: 1 – 22.

AGSOLVE. *Estações meteorológicas: Soluções para o monitoramento ambiental*. Disponível em: http://www.agsolve.com.br/pdf/produtos/meteorologicas_b.pdf. Acesso em: 25 fev. 2009.

AKYILDIZ, I. & VURAN, M. C. *Wireless Sensor Networks*. New York, NY, USA: John Wiley; Sons, Inc., 2010.

ATCHISON, L. *Firewire: standard computer industry interconnect for test & measurement*. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Volume 14, Issue 8, Aug. 1999, pages: 21 – 24.

BAI, R. & SINGHAL, M. *DOA: DSR over AODV routing for mobile ad hoc networks*, IEEE transactions on Mobile Computing, 5, 2006, pages: 1403 – 1416.

BANKS, J.; NELSON, B. & NICOL, D. *Discrete-event system simulation*. Prentice Hall, 2009.

BANSAL, S.; SHOREY, R.; MISRA, A. *Comparing the Routing Energy Overheads of Ad-Hoc Routing Protocols*. Wireless Communications and Networking. WCNC 2003. IEEE 2003. Volume 2, Mar. 2003. Pages: 1155 – 1161.

BECKER, M.; SCHAUST, S. & WITTMANN, E. *Performance of routing protocols for real wireless sensor networks*. In: *Proceedings of the 10th International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS)*, 2007.

BECKWITH, R.; TEIBEL, D. & BOWEN, P. *Report from the field: Results from an agricultural wireless sensor network*. In: *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, 2004. Pages: 471 – 478.

BOUAM, S.; OTHMAN, J. B. *A 802.11 multiservices cross-layer approach for QoS management*. Vehicular Technology Conference, 26-29 Sept. 2004, Vol.4. Pages: 2698 – 2702.

BLUETOOTH. *The Official Bluetooth Technology Info Site*. Disponível em: <http://www.bluetooth.com>. Acesso em: 12 dez. 2009.

BRAGA, T. R. D. M. *Um elemento autônomo para redes de sensores sem fio*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

CAMILO, T.; SILVA, J. & BOAVIDA, F. *Assessing the use of ad-hoc routing protocols in Mobile Wireless Sensor Networks*, Proc. CSMU, 2006.

CARDOSO, L.S. *Alterações microclimáticas em vinhedos de Vitis vinífera L. cv. Moscato Giallo pelo uso de cobertura plástica*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CEMBA. *Centro Estadual de Meteorologia da Bahia. A agrometeorologia*. Disponível em: http://www.inga.ba.gov.br/cemba/modules/conteudo/index.php?content_id=49. Acesso em: 05 dez. 2009.

CHAVARRIA, G. *Ecofisiologia e fitotecnia do cultivo protegido de videiras cv. Moscato Giallo (Vitis vinifera L.)*. 2008. Dissertação (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação de Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CHIPCON. *SmartRF CC1000*. Disponível em: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc1000.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2009.

CHIPCON. *SmartRF CC2420*. Disponível em: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2009a.

CHITI, F.; CIABATTI, M.; COLLODI, G. & FANTACCI, R. *Design and application of enhanced communication protocols for wireless sensor networks operating in environmental monitoring*, International Journal of Sensor Networks, 2, 2007. Pages: 299 – 310.

CLAUSEN, T.; JACQUET, P. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*. Network Working Group. Disponível em: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>. Acesso em: 15 dez. 2009.

CORSON, M.; MACKER, J. & CIRINCIONE, G. *Internet-based mobile ad hoc networking*, IEEE Internet Computing, 3, 1999. Pages: 63 – 70.

CORSON, S. & MACKER, J. *Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations*, Request for comments 2501, 1999.

CROSSBOW. *Crossbow Technology*. Disponível em: <http://www.xbow.com>. Acesso em: 07 jun. 2009.

CZERMAINSKI, A.B.C.; SONEGO, O.R. *Influência das condições climáticas sobre a eficácia de fungicidas empregados para o controle do míldio em Vitis vinifera*. Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, n.1, 2004. Pages: 5 – 11.

DAS, S.; CASTANEDA, R.; YAN, J. & SENGUPTA, R. *Comparative performance evaluation of routing protocols for mobile, ad hoc networks*. In: *7th Int. Conf. on Computer Communications and Networks (IC3N)*, 1998. Pages: 153 – 161.

DAVIS. *Vantage Pro os Vantega Pro2 Sensors*. Solar Radiation Sensor. Disponível em: http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/6450_Spec_Rev_E.pdf. Acesso em: 15 dez. 2009.

EMATER. *Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural. Maringá – Festa uva*. Disponível em: <http://www.emater.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=1871>. Acessado em: 03 jan. 2010.

ESTRIN, D.; SAYEED, A. & SRIVASTAVA, M. *Wireless sensor networks*. In: *Tutorial at the Eighth ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2002)*, 2002.

FAO. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. FAOSTAT - Agriculture. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acesso em: 08 de novembro de 2009.

GALMES, S. *Lifetime issues in wireless sensor networks for vineyard monitoring*. In: *2006 IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, 2006. Pages: 542 – 545.

GAROUSI, V. *Analysis of network traffic in ad-hoc networks based on DSDV protocol with emphasis on mobility and communication patterns*. The First IEEE and IFIP International Conference in Central Asia on 26-29 Sept. 2005. Pages: 5.

GAVA, A.T.; TAVARES, S.C.C. de H.; TEIXEIRA, A.H. de C. *Determinação de modelos de associação entre variáveis climáticas e ocorrência de Oídio e Míldio da videira no Vale do São Francisco*. In: *Seminário Novas Perspectivas para cultivo da uva sem sementes*, Petrolina, PE. [Anais]. Petrolina, PE: Embrapa Semi Árido, 2004.

GNUPLOT. *Gnuplot homepage*. Disponível em: <http://www.gnuplot.info>. Acesso em: 08 ago. 2009.

HAAS, Z. *A New Routing Protocol for the Reconfigurable Wireless Networks*. IEEE ICUPC. Vol 2, No. 1, Outubro, 1997. Pages: 562 – 566.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. & WALKER, J. *Fundamentos de Física: Eletromagnetismo*, vol. 3, Editora: LTC, 2007.

HASU, V. & KOIVO, H. *Automatic Rain and Wind Measurement Fault Identification in Mesoscale Weather Station Networks*. In: *Proc. IEEE Int. Instr. and Meas. Tech. Conf., (I2MTC)*, 2, 2008.

HEINZELMAN, W.; KULIK, J. *Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks*. ACM/IEEE MobiCom. 1999, pages: 174 – 185.

HILL, J. L.; CULLER, D. E. *Mica: A wireless platform for deeply embedded networks*. IEEE Micro. Volume 22, Issue 6, Nov.-Dec. 2002. Pages: 12-24.

IBAMA. *Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais. Monitoramento ambiental*. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/siucweb/guiadechefe/guia/t-1corpo.htm>. Acesso em: 04 dez. 2009.

IBRAVIN. *Instituto Brasileiro do Vinho. A vitivinicultura brasileira*. Disponível em: <http://www.ibraevin.org.br/regioesprodutoras.php>. Acesso em: 15 dez. 2009.

INTANAGONWIWAT, C., GOVINDAN, R., ESTRIN, D. *Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks*. ACM/IEEE MobiCom. (2000), pages: 56-67.

JERUCHIM, M.; BALABAN, P. & SHANMUGAN, K. *Simulation of communication systems: modeling, methodology, and techniques*. Springer, Us, 2000.

JiST. *Java in Simulation Time – Introduction to JiST*. Disponível em: <http://jist.ece.cornell.edu/>. Acesso em: 12 mar. 2009.

JOHNSON, D., MALTZ, D. *Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks*. Mobile Computing. (1996), pages: 153 – 181.

JPL. *JPL Sensor Webs*. Disponível em: <http://sensorwebs.jpl.nasa.gov>. Acesso em: 15 dez. 2009.

JUNQUEIRA, N.T.V.; ICUMA, I. M.; VERAS, M. C. M.; OLIVEIRA, M, A. S.; ANJOS, J. R. N. *Cultura do maracujazeiro*. In: Incentivo a fruticultura no Distrito Federal: manual de fruticultura. Brasília, 1999.

KIMBALL, ROSS. *The Data Warehouse Toolkit: The Complete Guide to Dimensional Modeling (Second Edition)*, Wiley, 2002.

LEWIS, F. *Wireless sensor networks, Smart environments: technologies, protocols, and applications*. 2004. Pages: 1 – 18.

LUKOIT, K.; WILDE, N.; STOWELL, S. *TraceGraph: immediate visual location of software features*. Software Maintenance. Proceedings. International Conference on 11-14 oct. 2000. Pages: 33 – 39.

LUX, J. *Comparison of relative energies and powers*, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 6, 2003. Pages: 66 – 68.

MAHDUPOUR, E.; RAHMANI, A. M.; AMINIAN, E. *Performance Evaluation of Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV) Routing Protocol*. Future Networks, 2009 International Conference on 7-9 Mar. 2009. Pages: 186 – 190.

MAIA, C. A.; LUDERS, R.; MENDES, R.S. *Estratégias de Controle por Modelo de Referência de Sistemas a Eventos Discretos Max-Plus Lineares*. Revista Controle & Automação/Vol.16 no.3/Julho, Agosto e Setembro 2005.

MANNASIM. *MannaSim Framework. Wireless Sensor Network Simulation*. Disponível em: <http://www.mannasim.dcc.ufmg.br/>. Acesso em: 27 mar. 2009.

MATLAB. The *MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing*. Disponível em: <http://www.mathworks.com>. Acesso em: 07 jun. 2009.

MCP. *Microchip A Leading Provider of Microcontrollers & Analog Semiconductors*. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22203b.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2009.

MICA2. *Wireless Measurement System*. Disponível em: http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICA2_Datasheet.pdf. Acesso em: 07 jun. 2009.

MICAZ. *Wireless Measurement System*. Disponível em: http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAZ_Datasheet.pdf. Acesso em: 07 jun. 2009.

MPS. *MPS430 Ultra-Low Power Microcontrollers*. Disponível em: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc430f6137.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2009.

MTS. *MTS Sensor, Data Acquisition Boards*. Disponível em: http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/6020-0047-01_B_MTS.pdf. Acesso em: 08 jun. 2009.

NAM. *Nam: Network Animator*. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/nam>. Acesso em: 05 abr. 2009.

NS-2. *Network Simulator 2. The Network Simulator*. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acesso em: 26 mar. 2009.

OTCL. *OTcl – MIT Object Tcl. The FAQ & Manual*. Disponível em: <ftp://ftp.tns.lcs.mit.edu/pub/otcl/README.html>. Acesso em: 30 mar. 2009.

PEDRO JUNIOR, M.J.; PEZZOPANE, JRM.; MARTINS, F.P. *Uso da precipitação pluvial para previsão de épocas de pulverização visando controle de doenças fúngicas na videira 'Niagara Rosada'*. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.7, n.1, 1999, pages: 107 – 111.

PERKINS, C.; HIGLY, P. *Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV) Routing for Mobile Computers*. ACM SIGCOMM. Vol. 24, No. 4, (Outubro, 1994), pages: 234 – 244.

PERKINS, C.; ROYER, E. *Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing*. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. (fevereiro, 1999), pages: 90 – 100.

PIERCE, F. & ELLIOTT, T. *Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington*, Computers and electronics in agriculture 61, 2008, pages: 32 – 43.

POTTIE, G. *Wireless sensor networks*. IEEE. In: *Information Theory Workshop*, 1998, pages: 139 – 140.

PYTHON. *Python Programming Language – Official Website*. Disponível em: <http://www.python.org>. Acesso em: 20 out. 2009.

RUBINSTEIN, M., MORAES, I., et al. *A Survey on Wireless Ad Hoc Networks. Mobile and Wireless Communication Networks*. Agosto, 2006, pages: 1-33.

RUIZ, L. B. *MANNA: A Management Architecture for Wireless Sensor Networks*. Ph.d. thesis, Federal University of Minas Gerais, 2003.

RUIZ, L.B., CORREIA, L., VIEIRA, L., et al. *Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fio*. XXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. Maio, 2004a, pages: 167 – 218.

RUIZ, L. B.; NOGUEIRA, J. M.; LOUREIRO, A. A. F. *MANNA: a management architecture for wireless sensor networks*. Communications Magazine, IEEE Volume 41, Issue 2, Feb. 2003. Pages: 116 – 125.

RUIZ, L. B.; NOGUEIRA, J. M. S.; LOUREIRO, A. A. F. *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*. Volume 1, Chapter III - Sensor Network Management. Edited by Mohammad Ilyas and Imad Mahgoub, CRC Press LLC. Flórida, Estados Unidos da América, 2004.

SENTELHAS, P. C. *Duração do período de molhamento foliar: aspectos operacionais da sua medida, variabilidade espacial em diferentes culturas e sua estimativa a partir do modelo de Penman-Monteith*. Tese (Livre-Docência em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004. Pages: 161.

SHT1. *Sensirion The Sensor Company*. Disponível em: http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf. Acesso em: 25 out. 2009.

SMART. *Smart Dust Autonomous sensing and communication in a cubic millimeter*. Disponível em: <http://robotics.eecs.berkeley.edu/%7Epister/SmartDust>. Acesso em: 15 dez. 2009.

SONG, L.; HATZINAKOS, D. *A cross-layer architecture of wireless sensor networks for target tracking*. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON). Volume 15, Issue1, fev. 2007. Pages: 1063 – 6692.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. 3. Ed. Porto Alegre: ARTMED, 2004. Pages: 719.

TCLCL. *TclCL*. Disponível em: <http://otcl-tclcl.sourceforge.net/tclcl/>. Acesso em: 30 mar. 2009.

TCLTK. *Tcl Developer Xchange*. Disponível em: <http://www.tcl.tk/about/language.html>. Acesso em: 30 mar. 2009.

TINYOS. *TinyOS Community Forum*. Disponível em: <http://www.tinyos.net>. Acesso em: 30 jun. 2009.

USB. *Universal Serial Bus*. Disponível em: <http://www.usb.org>. Acesso em: 30 nov. 2009.

WANG, N.; ZHANG, N. & WANG, M. *Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective*, Computers and electronics in agriculture 50, 2006. Pages: 1 – 14.

WARK, T.; CORKE, P.; SIKKA, P.; KLINGBEIL, L.; GUO, Y.; CROSSMAN, C.; VALENCIA, P.; SWAIN, D. & BISHOP-HURLEY, G. *Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks*, IEEE Pervasive Computing, 2007. Pages: 50 – 57.

WEI, G.; ZHANG, D. *Versatile Model Architecture for Multi-channel MAC Simulation in NS2. Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, 2008. MSN 2008. The 4th International Conference on 10 – 12 Dec. 2008. Pages: 288 – 294.

WILSON, J. S. *Sensor Technology HANDBOOK*. Elsevier, 2005. Pages: 691.

XGRAPH. *Xgraph homepage*. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/xgraph>. Acesso em: 05 abr. 2009.

ZEIGLER, B.; PRAEHOFER, H. & KIM, T. *Theory of modeling and simulation*. Academic press New York, NY, 2000.