

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE  
CAMPUS DE NATAL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO  
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**HELDER FABRICIO DOS SANTOS LIMA**

**ABORDAGEM COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS DE  
ROTEAMENTO UTILIZADOS NO PADRÃO IEEE 802.15.4 PARA A INDÚSTRIA  
DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL**

**NATAL**

**2013**

**HELDER FABRICIO DOS SANTOS LIMA**

**ABORDAGEM COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS DE  
ROTEAMENTO UTILIZADOS NO PADRÃO IEEE 802.15.4 PARA A INDÚSTRIA  
DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte  
– UERN – como requisito obrigatório para  
obtenção do título de Bacharelado em Ciência  
da Computação.

**ORIENTADOR:**

Felipe Denis Mendonça de Oliveira

**NATAL**

**2013**

**HELDER FABRICIO DOS SANTOS LIMA**

**ABORDAGEM COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS DE  
ROTEAMENTO UTILIZADOS NO PADRÃO IEEE 802.15.4 PARA A INDÚSTRIA  
DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte  
– UERN - como requisito obrigatório para  
obtenção do título de Bacharelado em Ciência  
da Computação.

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

Banca Examinadora

---

Felipe Denis Mendonça de Oliveira  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

---

Felipe Soares da Costa  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

---

Rodrigo Soares Semente  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Dedico este trabalho aos meus pais, Edilson Jacinto de Lima Segundo e Maria das Graças Santos de Lima, e a minha irmã, Geórgia Santos de Lima, que contribuíram com todo o apoio para que este trabalho pudesse ser realizado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a oportunidade de realizar este trabalho com muito esforço e dedicação que, mesmo com todos os momentos de dificuldades que passei ao longo do curso, consegui superá-los. Aos meus pais, que sempre estiveram do meu lado, me apoiando, incentivando e auxiliando conforme podiam, para que meu objetivo de concluir o curso fosse realizado. A todos os meus familiares, que sempre demonstraram torcer por minhas conquistas e me estruturaram como pessoa, sempre me aconselhando nos momentos mais difíceis a não desistir. Aos meus colegas e amigos de classe: Irlan, Isaiane, Thaise, Hércules, Thomás, Murilo, Bruno, Itamar, Matheus Araújo, Edilene, Vandeclécio, Antônio Porto, Marieta, Joselita, Ronaldo Wagner e a Rafael Jullian que me ajudaram durante todo o período de construção do TCC e aos demais, que me ajudaram de alguma forma a chegar neste momento final do curso. Aos meus professores de faculdade, em especial meu orientador, Professor Felipe Denis, que sempre dispuseram esforços para me auxiliar ao longo desta caminhada. Aos meus companheiros de moradia ao longo do curso, com os quais dividi apartamento e compartilhei momentos de conquistas e também de dificuldades ao longo da minha graduação. Agradeço também a todos os meus amigos e familiares em geral que, de alguma forma contribuíram, mesmo que na torcida, para que eu chegasse ao fim do curso com êxito. À todo o grupo de docentes e discentes da UERN, que fizeram parte da estrutura do meu curso, influenciando direta ou indiretamente nos meus estudos. À minha ex-namorada, Rayanne Souza, com a qual convivi na maioria do tempo do meu curso e, de alguma forma participou da minha formação. À minha cachorra Bellinha, na qual me propiciou inúmeras alegrias e bons momentos, me ajudando a desopilar nos momentos mais estressantes do curso. Por fim, ao Sport Club Corinthians Paulista, por ter me dado tantas alegrias nos anos coincidentes aos anos da Graduação, com conquistas que me trouxeram inúmeras felicidades, como a conquista da Copa Libertadores da América no ano de 2012.

"Obrigado senhor, por me dar força para mudar o que pode ser mudado. Resignação para aceitar o que não pode ser mudado. E sabedoria para distinguir uma coisa da outra."

(São Francisco de Assis)

## RESUMO

Nos últimos anos as indústrias em geral têm investido cada vez mais em novas tecnologias, visando facilitar e assegurar o desenvolvimento de suas atividades comerciais. Diante disso, a Indústria de Petróleo e Gás Natural tem demonstrado interesse significativo em implantar novas tecnologias em alguns de seus espaços físicos, com o intuito de monitorar ambientes hostis, onde é inviável o envio constante de seres humanos para realizar operações rotineiras ou de manutenção, por exemplo. As Redes de Sensores sem Fio (RSSF) apresentam-se como possível solução para este problema, realizando o monitoramento destes ambientes remotamente evitando, assim, a necessidade da presença humana nos locais onde tal rede encontra-se instalada. Este trabalho tem como objetivo a realização de testes e análises comparativas dos protocolos de roteamento comumente utilizado em RSSF baseados no padrão IEEE 802.15.4. Estes protocolos foram implementados em cenários de simulação, utilizando a ferramenta Network Simulator 2 (NS-2), tendo como base um ambiente com distâncias reais de tanques de uma refinaria, da Indústria de Petróleo e Gás Natural. Portanto, a finalidade destes testes e análises comparativas é mostrar, através de resultados gráficos e dados estatísticos, qual o protocolo que oferece melhores resultados em determinando cenário de comunicação proposto. A Refinaria de Capuava/SP foi a escolhida para servir de cenário para os testes realizados neste trabalho. Pacotes enviados, jitter, vazão, e pacotes perdidos são os dados de QoS utilizados neste trabalho.

**Palavras-chave:** Redes de sensores sem fio, protocolos de roteamento, indústria de petróleo e gás natural, simulações.

## ABSTRACT

In recent years the industries in general have increasingly invested in new technologies to facilitate and ensure the development of their business activities. Thus, the Oil and Natural Gas has shown significant interest in deploying new technologies in some of their physical spaces, in order to monitor hostile environments, where it is impractical to send constant humans to perform routine operations or maintenance for example. The Wireless Sensor Networks (WSN) appear as a possible solution to this problem, performing environmental monitoring remotely, thus avoiding the need for human presence in places where such a network is installed. This work aims at testing and comparative analysis of routing protocols commonly used in WSN based on IEEE 802.15.4. These protocols were implemented in simulation scenarios, using the Network Simulator 2 (NS-2) software, based on an environment with real distances of an oil and gas refinery tanks. Therefore, the purpose of these tests and comparative analysis is to show, through graphical results and statistical data, which the protocol that provides the best results in determining communication scenario proposed. Refinery of Capuava/SP was chosen to serve as the backdrop for the tests performed in this work. Packets sent, jitter, throughput, and packet loss are the QoS data used in this study.

**Keywords:** wireless sensor networks, routing protocols, oil and natural gas simulations.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aplicações industriais de RSSF .....	22
Figura 2 – Ciclo de vida de uma RSSF .....	26
Figura 3 – Estabelecimento de vida de uma RSSF .....	27
Figura 4 – Consumidores de energia em um nó sensor .....	29
Figura 5 – Camadas de Comunicação .....	34
Figura 6 – Formato de Transmissão dos pacotes na camada PHY .....	37
Figura 7 – Estrutura de um superframe .....	38
Figura 8 – Topologias do Padrão IEEE 802.15.4 .....	40
Figura 9 – Topologia de uma rede cluster tree .....	41
Figura 10 – (a) AODV – propagação do RREQ (b) AODV - Caminho do RREP à Origem .....	44
Figura 11 – Cenário do conjunto 1 de tanques da Refinaria de Capuava .....	49
Figura 12 – Cenário do conjunto 2 de tanques da Refinaria de Capuava .....	50
Figura 13 – Cenário dos 2 conjuntos de tanques da Refinaria de Capuava .....	51
Figura 14 – Estrutura de uma simulação .....	53
Figura 15 – Ilustração dos Nós distribuídos fisicamente nos Cenários Implementados baseados nas distâncias reais da Indústria de Capuava, gerado através do NAM.....	58
Figura 16 – Total de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento AODV .....	60

Figura 17 – Total de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento DSDV .....	60
Figura 18 – Jitter de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento AODV .....	62
Figura 19 – Jitter de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento DSDV .....	62
Figura 20 – Vazão de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento AODV .....	64
Figura 21 – Vazão de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento AODV .....	64
Figura 22 – Total de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento AODV .....	68
Figura 23 – Total de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento DSDV .....	68
Figura 24 – Jitter de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento AODV .....	70
Figura 25 – Jitter de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento DSDV .....	70
Figura 26 – Vazão de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento AODV .....	72
Figura 27 – Vazão de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento DSDV .....	72
Figura 28 – Total dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento LEACH .....	75
Figura 29 – Jitter dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento LEACH .....	76

Figura 30 – Vazão dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento LEACH .....	77
Figura 31 – Total dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento LEACH .....	79
Figura 32 – Jitter dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento LEACH .....	80
Figura 33 – Vazão dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento LEACH .....	81
Figura 34 – Total dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE .....	83
Figura 35 – Jitter dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE .....	84
Figura 36 – Vazão dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE .....	85
Figura 37 – Total dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE .....	86
Figura 38 – Jitter dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE .....	87
Figura 39 – Vazão dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE .....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações da camada física .....	36
Tabela 2 – Total de Pacotes Enviados, Recebidos e Perdidos dos Protocolos de Roteamento AODV e DSDV no Cenário d Comunicação Simultânea .....	66
Tabela 3 – Total de Pacotes Enviados, Recebidos e Perdidos dos Protocolos de Roteamento AODV e DSDV no Cenário da Comunicação Intercalada .....	74
Tabela 4 – Total de Pacotes Enviados, Recebidos e Perdidos do Protocolo de Roteamento Hierárquico LEACH nos dois Cenários de Comunicação Implementados.....	82
Tabela 5 – Total de Pacotes Enviados, Recebidos e Perdidos do Protocolo de Roteamento Híbrido ZIGBEE nos dois Cenários de Comunicação Implementados.....	89
Tabela 6 – Percentagem dos Pacotes Perdidos nos Testes dos Protocolos de Roteamento implementados nos Cenários de Simulações .....	92

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 PROBLEMÁTICA .....	18
1.2 SOLUÇÃO .....	18
1.3 OBJETIVOS .....	19
1.4 TRABALHOS RELACIONADOS .....	20
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2 REDES DE SENSORES SEM FIO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL</b> .....	<b>22</b>
2.1 ESTABELECIMENTO .....	27
2.2 MANUTENÇÃO .....	27
2.3 SENSORIAMENTO .....	29
2.4 PROCESSAMENTO .....	30
2.5 COMUNICAÇÃO .....	30
<b>3 REDE DE SENSORES SEM FIO: TECNOLOGIAS E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS</b> .....	<b>31</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE SENSORES SEM FIO .....	32
3.2 ARQUITETURA DAS RSSF: PADRÃO DE COMUNICAÇÃO, CAMADAS, DISPOSITIVOS E TOPOLOGIAS .....	33
<b>3.2.1 Padrão de Comunicação IEEE 802.15.4</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.2 Camadas</b> .....	<b>35</b>
3.2.2.1 Camada PHY .....	35
3.2.2.2 Camada MAC .....	37
<b>3.2.3 Dispositivos</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2.4 Topologias</b> .....	<b>39</b>
3.3 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO UTILIZADOS EM RSSF APLICADOS AO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO ESCOLHIDO .....	42
<b>3.3.1 Protocolos Planos Reativos</b> .....	<b>42</b>
3.3.1.1 Protocolo AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector) .....	42
<b>3.3.2 Protocolos Planos Proativos</b> .....	<b>43</b>

3.3.2.1 Protocolo DSDV Protocolo DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector Routing) .....	44
<b>3.3.3 Protocolos Hierárquicos .....</b>	<b>45</b>
3.3.3.1 Protocolo LEACH (Low-Energy Adaptative Clustering Hierarchy) .....	45
<b>3.3.4 Protocolos Híbridos .....</b>	<b>46</b>
3.3.4.1 Protocolo ZIGBEE .....	47
<b>4 CENÁRIO DE TESTES E METODOLOGIA UTILIZADA .....</b>	<b>48</b>
4.1 REFINARIA DE CAPUAVA .....	48
<b>4.1.1 Ambiente de Monitoramento .....</b>	<b>48</b>
4.2 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO NETWORK SIMULATOR 2 .....	52
<b>4.2.1 Camadas do NS-2 .....</b>	<b>53</b>
4.3 TRACEGRAPH .....	54
4.4 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO .....	55
<b>4.4.1 Quantidade de nós sensores a serem monitorados .....</b>	<b>55</b>
<b>4.4.2 Tamanho da área de simulação .....</b>	<b>56</b>
<b>4.4.3 Distribuição dos nós sensores .....</b>	<b>56</b>
<b>4.4.4 Redes Planas, Hierárquicas e Híbridas .....</b>	<b>56</b>
4.4.5 Parâmetros para simulações .....	57
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
5.1 ANÁLISES DAS REDES PLANAS NA COMUNICAÇÃO SIMULTÂNEA .....	59
<b>5.1.1 Total de pacotes enviados .....</b>	<b>59</b>
<b>5.1.2 Jitter dos pacotes enviados .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1.3 Vazão dos pacotes enviados .....</b>	<b>63</b>
5.2 ANÁLISES DAS REDES PLANAS NA COMUNICAÇÃO INTERCALADA .....	67
<b>5.2.1 Total de pacotes enviados .....</b>	<b>67</b>
<b>5.2.2 Jitter dos pacotes enviados .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2.3 Vazão dos pacotes enviados .....</b>	<b>71</b>
5.3 ANÁLISES DAS REDES HIERÁRQUICAS NA COMUNICAÇÃO SIMULTÂNEA.....	74
<b>5.3.1 Total de pacotes enviados .....</b>	<b>74</b>
<b>5.3.2 Jitter dos pacotes enviados .....</b>	<b>76</b>
<b>5.3.3 Vazão dos pacotes enviados .....</b>	<b>77</b>

5.4 ANÁLISES DAS REDES HIERÁRQUICAS NA COMUNICAÇÃO NA COMUNICAÇÃO INTERCALADA .....	78
<b>5.4.1 Total de pacotes enviados .....</b>	<b>78</b>
<b>5.4.2 Jitter dos pacotes enviados .....</b>	<b>79</b>
<b>5.4.3 Vazão dos pacotes enviados .....</b>	<b>80</b>
5.5 ANÁLISES DAS REDES HÍBRIDAS NA COMUNICAÇÃO NA COMUNICAÇÃO SIMULTÂNEA .....	83
<b>5.5.1 Total de pacotes enviados .....</b>	<b>83</b>
<b>5.5.2 Jitter dos pacotes enviados .....</b>	<b>84</b>
<b>5.5.3 Vazão dos pacotes enviados .....</b>	<b>84</b>
5.6 ANÁLISES DAS REDES HÍBRIDAS NA COMUNICAÇÃO NA COMUNICAÇÃO INTERCALADA .....	85
<b>5.6.1 Total de pacotes enviados .....</b>	<b>86</b>
<b>5.6.2 Jitter dos pacotes enviados .....</b>	<b>87</b>
<b>5.6.3 Vazão dos pacotes enviados .....</b>	<b>87</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>91</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os computadores atualmente não servem apenas para uso geral, mas também para uso específico (MOREIRA, 2012). Com isso, os sistemas que são fisicamente menores, com baixo custo, baixo consumo de energia, e com a possibilidade de uso em diversos locais de acesso mais crítico, vem tendo estimulada a sua utilização em uma gama de aplicações, como por exemplo, na área científica, médica e industrial (ISM – *Industrial, Medical and Scientifical*) (PETERSEN et al., 2007).

Diante dessa revolução, no que diz respeito aos computadores de uso específico e também a transmissão de dados sem fios, estimulou-se também o uso de sensores interconectados em uma rede *wireless*, com o intuito de coletar dados do meio físico, onde estes podem ser utilizados para resolução de problemas em diversas situações (LOUREIRO et al., [s.d.]), por exemplo, na área industrial, com funções de monitoramento particularmente em áreas de difícil acesso (FREITAS et al., 2007).

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) é um exemplo destes sistemas fisicamente menores, que consiste em uma tecnologia que tem como função principal a obtenção de informações do meio em que estão inseridas através de sensoriamento. Para isso, a rede tem algumas características em sua composição, tais como sensores, que produzem uma resposta em relação às condições físicas como temperatura, umidade e luminosidade.

Tendo em vista a importância e utilidade das RSSF, e considerando a área industrial como um dos setores mais abrangentes quando se fala de RSSF, o objetivo de uma rede desse tipo é a eliminação de cabos que interligam os sensores e a rede industrial propriamente dita, melhorando o custo/benefício, diminuindo as manutenções e otimizando a mobilidade do sistema. Na indústria de petróleo e gás natural, as refinarias podem servir como cenário para implantação de uma RSSF. Os ambientes industriais de modo geral apresentam, na maioria das vezes, riscos físicos muito altos aos seus trabalhadores, existindo áreas onde o índice de acidentes é elevado (PETERSEN et al., 2007).

Nos últimos anos, as empresas de desenvolvimento de softwares e empresas de desenvolvimento ou produção de hardware, vêm conquistando significativos

resultados no que diz respeito à produção de novas tecnologias, como a criação de softwares para aplicações cada vez mais inovadoras e hardwares cada vez mais robustos. Esses resultados são refletidos diretamente na área industrial, que vêm demonstrando, com o passar do tempo, considerável interesse em usufruir destas novas tecnologias, para melhoria do desempenho de suas atividades internas e diminuição de custos. Nos últimos anos a indústria de petróleo e gás natural tem investido bilhões de dólares em novas tecnologias voltadas ao setor de exploração e produção de petróleo e gás natural, setor este onde as RSSF apresentam grande potencial (SILVA, 2006).

O uso de uma RSSF aplicada a uma indústria de petróleo e gás natural é o cenário motivador desta pesquisa, onde a ideia é fazer uma abordagem comparativa dos principais protocolos que são empregados atualmente nestas redes, utilizando a ferramenta de simulação NS-2 (GONÇALVES; CORRÊA, 2005), de modo a aplicar métricas de qualidade de serviço e desempenho que atestem qual destes protocolos é o mais viável para uma aplicação desenvolvida onde o cenário a ser estudado é uma refinaria da indústria de petróleo e gás natural.

Para que se consiga a implementação de uma RSSF neste ambiente, será feito um estudo sobre alguns tipos de redes, tais como WPAN (*Wireless Personal Area Network*) e WLAN (*Wireless Local Area Network*). Com relação às redes WPAN, neste grupo estão as tecnologias wireless de pequeno alcance, onde nele encontra-se o padrão da IEEE 802.15.4. Este é o padrão ideal a ser utilizado nas RSSF, visto que possui baixa complexidade de implementação, baixa taxa de transmissão (o que se torna uma vantagem para as RSSF, pois como nesse tipo de rede, os nós sensores não precisam transmitir dados robustos como vídeos e imagens e conseqüentemente fazer uso de altos recursos de processamento, torna-se inviável uma alta taxa de transmissão devido ao alto consumo de energia que propiciaria a rede), e tem a vantagem de utilizar o mecanismo de hibernação, que garante o baixo consumo de energia na ausência de transmissão (OLIVEIRA, 2009).

Os protocolos de roteamento podem ser estruturalmente classificados como: planos (reativos e proativos), hierárquicos, e; híbridos (HONG; XU; GERLA, 2012). Estes serão os tipos de protocolos estudados para serem comparados em uma RSSF, de modo a testar como se comportam em diversos cenários que estejam

contextualizados em um ambiente voltado para a uma refinaria na indústria de petróleo e gás natural.

## 1.1 PROBLEMÁTICA

Ultimamente as indústrias de petróleo e gás vêm investindo em tecnologias para melhorar e aperfeiçoar suas atividades internas, com o intuito de tentar evitar problemas rotineiros, como por exemplo, vazamento do gás natural e corrosão. Normalmente as tecnologias utilizadas sempre faziam uso de fios, porém essa foi uma alternativa que caiu em desuso, devido ao surgimento de alternativas que possibilitaram a retirada de fios, de modo a proporcionar uma infraestrutura com menos custos, maior facilidade de manutenção e diminuição do nível de complexidade. A partir daí, as RSSF, surgiram como uma nova tendência a ser empregada nesses ambientes. Porém, esse tipo de tecnologia, ainda enfrenta alguns desafios no que diz respeito à introdução de dispositivos sem fios na indústria de petróleo como, por exemplo: o poder de processamento limitado, armazenamento, memória e consumo de energia; operar em ambiente *wireless* com dificuldades em termos ruídos de rádio e obstruções e; operar em áreas onde as condições de plataforma podem ser muito hostis.

## 1.2 SOLUÇÃO

Pelo fato de uma indústria geralmente conter diversos lugares considerados como ambientes hostis, a instalação de nós sensores nestes locais seria uma solução viável, de forma a permitir que através de sensoriamento, dados possam ser coletados para serem tratados, a fim de se evitar problemas que ocorram na refinaria, além de ser útil para monitoramento remoto de oleodutos e as condições de equipamentos. Diante disto e também pelo fato que, em quase toda sua totalidade, a indústria do petróleo e gás natural caracteriza-se por ser uma área com permanentes riscos de explosões (Áreas Classificadas), a retirada de cabos que interligam sensores e atuadores torna-se fundamental para tais sistemas, de modo a reduzir também os custos operacionais com instalação e desinstalação destes equipamentos (OLIVEIRA, 2009).

Para instalação de RSSF nas indústrias de petróleo e gás, existem uma gama de requisitos a serem estudados, implementados e implantados em um sistema que comporte uma rede deste tipo. A topologia da rede, os padrões, protocolos e tráfego da rede, por exemplo, são fatores importantes a serem considerados. Os protocolos de roteamento, que são o foco do trabalho, foram criados com o intuito de maximizar o tempo de conectividade dos dispositivos e minimizar diversas restrições de ambiente. É fundamental a utilização de um protocolo que passe confiabilidade e proporcione um nível de comunicação aceitável, para que a rede sem fio tenha o máximo de qualidade possível (RIBEIRO, 2010). Estudar alguns protocolos planos, hierárquicos e híbridos que são utilizados nos ambientes de RSSF, investigar o comportamento da rede através de testes de QoS, tais como: Jitter, total de pacotes enviados e perdidos, vazão de pacotes enviados e perdidos e, assim, escolher qual o melhor protocolo baseado nos cenários de simulação, é a solução proposta.

Esta pesquisa analisa e compara diversos protocolos que podem ser inseridos em cenários de uma refinaria da indústria de petróleo e gás. A partir dos resultados obtidos por meio de testes, um protocolo é escolhido como o mais viável para determinados cenários da indústria de petróleo e gás natural.

### 1.3 OBJETIVOS

Nas RSSF, é necessário que se estabeleça um padrão de comunicação e transferência de dados, onde estes padrões são estabelecidos por meio de protocolos. Os dispositivos que fazem uso do meio sem fio para a troca de informações utilizam alguns padrões que são definidos pela IEEE, como por exemplo, o IEEE 802.11, IEEE 802.15.1 e o IEEE 802.15.4 (MOREIRA, 2012).

Este trabalho tem como objetivo fazer uma abordagem comparativa dos protocolos de roteamento (planos, hierárquicos e híbridos), que garantam o desempenho da RSSF voltado a uma aplicação em um cenário de uma refinaria na indústria de petróleo e gás natural. A escolha do melhor protocolo é baseada em alguns testes, como: Jitter, número de pacotes enviados e perdidos e vazão dos pacotes na rede.

#### 1.4 TRABALHOS RELACIONADOS

Na área de RSSF, vários trabalhos são voltados para aplicações nas Indústrias, entre elas, a indústria de petróleo e gás natural. Alguns destes trabalhos são relacionados ao monitoramento de ambientes hostis presentes nestas indústrias, a fim de facilitar o desenvolvimento das atividades internas destas indústrias, manter a segurança dos seus espaços físicos, reduzir custos e outros aspectos semelhantes. Este item apresenta alguns dos trabalhos relacionados com este.

Em AKHONDI et al. (2010), mostrou-se um estudo sobre o uso de redes de sensores sem fio (RSSF) em refinarias, plataformas de petróleo e gás e instalações de desenvolvimento de submarinos. O trabalho centrou-se em redes que faziam o monitoramento de processos de produção, com o objetivo de prevenir ou detectar problemas de segurança por exemplo. Os nós sensores da rede foram utilizados para monitorar oleodutos, vazamentos de gás, condições dos equipamentos e status dos reservatórios em tempo real. Com os dados recolhidos pelos sensores, foi possível encontrar soluções inovadoras que auxiliaram as indústrias de petróleo e gás, melhorando a segurança das plataformas, otimizando as operações, e reduzindo custos operacionais.

Em OBODOEZE; INYIAMA; IDIGO (2012), foi apresentado o estudo da possibilidade de mudança de uma tecnologia com fio, para uma tecnologia de sensores sem fio, visando à coleta de dados em áreas pantanosas de uma região específica da Nigéria, eliminando assim a utilização de fios e cabos. A ideia partiu de necessidades de segurança, pois é uma região caracterizada por insegurança e constantes sabotagens nas plataformas de petróleo, oleodutos, poços de petróleo e estações de fluxo, além de outras instalações petrolíferas. Vários casos de vandalização de oleodutos e gasodutos e de outras instalações petrolíferas foram identificados quando da antiga configuração. Este trabalho introduziu arquiteturas de implantação prática e mecanismos que puderam proteger as instalações petrolíferas e os sensores sem fio de serem atacados fisicamente, para que eles pudessem monitorar facilmente e auxiliar medidas de precaução em tempo útil e, ao mesmo tempo, manter a segurança dos dados das RSSF.

Em SAVAZZI; GUARDIANO; SPAGNOLINI (2013), foi apresentado que Redes de sensores sem fio para aplicações industriais críticas estão se tornando um paradigma tecnológico notável. Nas zonas industriais de petróleo e gás, os sinais de rádio são propensos à obstrução devido a estruturas metálicas densas, influenciando a intensidade do sinal recebido e, assim, a qualidade do serviço (QoS). Este documento examinou as tecnologias sem fio mais promissoras para o monitoramento e controle destas redes em indústrias de petróleo e gás, e propôs um modelo de canal adaptado especificamente para prevenção da qualidade dos sinais de rádio em ambientes com alta densidade metálica, que dificultava a recepção do sinal. A solução proposta foi validada por medições experimentais em áreas críticas em uma planta de refinaria de petróleo caracterizada por uma estrutura metálica altamente densa. Os resultados experimentais confirmaram a eficácia do método proposto, proporcionando uma ferramenta prática que atendesse as expectativas em vários ambientes industriais.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este documento está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 faz uma abordagem sobre a utilização de RSSF na indústria de petróleo e gás natural. O Capítulo 3 apresenta características e tecnologias das RSSF, bem como os protocolos que serão comparados, os padrões, camadas, topologias e a arquitetura da rede de modo geral. O Capítulo 4 descreve o cenário de testes e as metodologias empregadas para realização destes testes, parâmetros utilizados nas simulações, ferramentas utilizadas etc. No Capítulo 5 serão mostrados os gráficos gerados dos testes realizados, comparando os mesmos para avaliação de qual protocolo é o mais viável para determinado cenário. O Capítulo 6 apresenta as considerações finais sobre o trabalho.

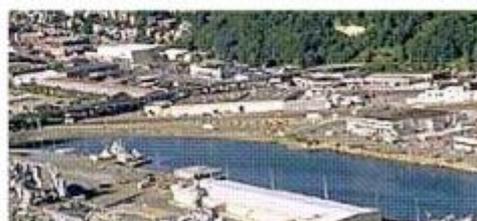
## 2 REDES DE SENSORES SEM FIO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL

As RSSF são uma tecnologia emergente que, tendo significativa relevância, possui uma gama de aplicações nas quais podem ser utilizadas em diversas áreas de atuação, como mostra a figura 1 a seguir. Estas redes constituem-se de pequenos dispositivos denominados sensores, que tem a capacidade de processar dados, comunicar-se com outros sensores e fazer o monitoramento do meio físico em que se encontram. Por ser uma tecnologia que proporciona mobilidade física e pelo fato de ser uma alternativa viável a ser implantada em ambientes hostis, a área industrial é uma das mais predominantes para aplicações das RSSF, visto que a indústria possui muitos locais de acesso crítico (FREITAS et al., 2007).

**Figura 1:** Aplicações industriais de RSSF



(a) Produção industrial



(b) Área industrial



(c) Extração de petróleo e gás



(d) Indústria de aviação

Fonte: SILVA, (2006)

As indústrias de modo geral, continuamente estão investindo em novas tecnologias, visando à melhoria de suas atividades internas e prezando sempre pelo baixo custo, de forma a otimizar seus processos, sem querer abrir mão da qualidade de suas operações (SILVA, 2006). Elevados custos com manutenções, maior consumo de energia, menos segurança e mobilidade, são alguns fatores preponderantes que impulsionam as indústrias a optar pela substituição das redes com fio pelas redes sem fio. Estas, por sua vez, oferecem a possibilidade de serem instaladas em ambientes hostis, lugares de difícil acesso ao ser humano que seria inviável visitar constantemente para realizar manutenções.

As características de uma RSSF são baseadas nas características da aplicação na qual esta rede foi estruturada para receber. Existem algumas características comuns a todas as RSSF, porém, a maioria das características é específica de cada aplicação, isso assegura a resolução dos problemas também específicos. Cada rede é projetada pra uma finalidade diferente, dispondo de sensores apropriados para sua aplicação.

Algumas características comuns a todas as RSSF podem ser explanadas, tais como: endereçamento dos sensores, que dependem de suas funções e de como são utilizados; a quantidade de sensores; a mobilidade dos sensores, que implica na possibilidade dos mesmos se movimentarem durante a coleta de dados do sistema, sendo classificados em móveis ou estáticos; a agregação dos dados, que consiste na capacidade que a rede possui de coletar dados e agregá-los, com o intuito de combinar estes dados ainda na rede antes de enviá-los para a estação-base, diminuindo a quantidade de mensagens enviadas e assim conservando mais recursos, o que maximiza a vida útil da rede; a auto-organização da rede fundamenta-se no fato de estas redes terem a capacidade de se ajustar a alterações que possam surgir, mas sem a necessidade de interferências humanas e; por fim a limitação da energia disponível para os sensores, que por serem instalados geralmente em locais de difícil acesso, a manutenção é algo inviável de se fazer, sendo assim é necessário estudar bem qual a fonte de energia que alimentará os sensores, pois a aplicação, os protocolos, e algoritmos, influenciarão diretamente no consumo de energia da rede (NAMBA, 2011).

Na indústria de petróleo e gás natural, existem alguns campos de atuação que as RSSF operam de forma mais ativa, como por exemplo, o monitoramento em tempo real de processos de controle e a segurança.

No monitoramento em tempo real, os processos de controle de uma indústria de petróleo e gás podem ser monitorados remotamente através de recursos provenientes de plataformas que utilizam as RSSF, permitindo uma possível redução ou eliminação de custos oriundos de manutenções. Dessa forma, para conseguir a máxima produtividade, estas plataformas devem operar continuamente devido aos altos custos de infraestrutura que elas acarretam para a empresa. O monitoramento e a aquisição de dados em tempo real utilizando uma RSSF podem propiciar à indústria a eliminação ou redução de tempo gasto com manutenção e/ou quebra de máquinas, permitindo assim, economias e melhor gestão de energia, de modo que com essa estrutura de monitoramento, o operador terá uma visão ampliada do estado geral da plataforma, e poderá assim tomar as medidas de prevenção conforme julgue necessário (SOBRAL, 2012).

O monitoramento remoto na indústria de petróleo e gás é fundamental para otimização de suas atividades internas, tendo algumas aplicações importantes, tais como: monitoramento do nível do tanque em uma refinaria, por exemplo, que geralmente é medido na base inferior do tanque através da pressão exercida pelo líquido (FAÇANHA, 2007); monitoramento da integridade física dos dutos e; monitoramento da válvula de alívio, que serve para aliviar a pressão nesses sistemas (CAVALCANTE et al., 2012).

Com relação à segurança, nas indústrias de petróleo e gás natural, são produzidos durante os processos de exploração do petróleo, diversos gases tóxicos como, por exemplo, o Amônia ( $\text{NH}_3$ ), o Dióxido de Enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e o Sulfeto de Hidrogênio ( $\text{HS}_2$ ). Este último é considerado um produto útil e bastante comum, porém ocasiona alguns problemas de saúde ao ser humano. Nas refinarias, o  $\text{HS}_2$  deve ser transportado entre os gasodutos até as oficinas de tratamento, de modo que são imprescindíveis os cuidados com os vazamentos nestes gasodutos, pois a liberação e conseqüentemente provável inalação deste gás, causará fortes impactos negativos de saúde e também ao meio ambiente. As causas destes vazamentos podem ser originárias de corrosão, danos intencionais, deformações físicas causadas por abalos ou tremores, e falhas materiais.

A exposição do HS2 poderá causar alguns sintomas de mal estar, como irritação, dores de cabeça e tonturas. Se caracteriza por ser um gás incolor, inflamável e extremamente tóxico, sendo mais pesado que o ar e solúvel em água. Já a exposição a níveis elevados poderá trazer danos ao sistema nervoso e em casos mais graves levar a morte. Com relação ao meio ambiente, o HS2 pode impactar negativamente o sistema ecológico. Um exemplo seria a inserção do H<sub>2</sub>S em solução aquosa, que alteraria o valor de PH, e resultaria em um desequilíbrio ecológico entre os micróbios e espécies aquáticas. Desta forma, é importante o uso das RSSF neste âmbito para fazer a monitorização dos processos de H<sub>2</sub>S durante os processos de exploração de petróleo, pois todos os problemas apresentados pela liberação deste gás, são suficientemente significativos para que medidas de prevenção sejam tomadas a fim de se evitar maiores prejuízos aos seres humanos e ao meio ambiente (SOBRAL, 2012).

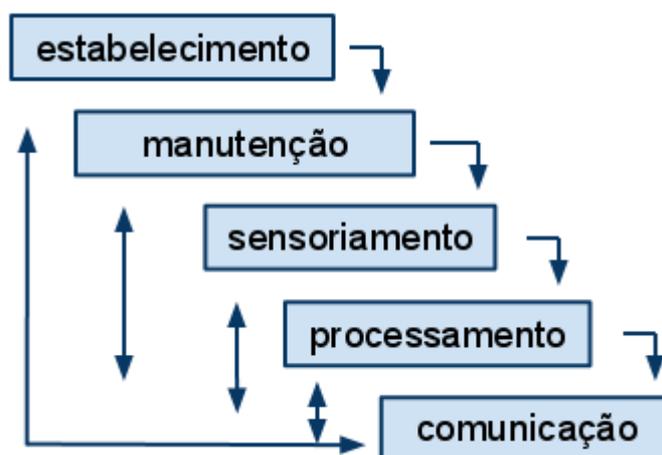
Outro caso em que se pode aplicar RSSF na área de segurança e que pode ser aproveitada no ambiente de uma refinaria é a utilização de sensores de imagem e sensores acústicos, onde estes estariam implantados em um mesmo nó sensor ou em nós sensores diferentes. Para esta situação, a rede coleta dados do tipo: imagens, vídeos e áudio. Nesta aplicação existem duas características importantes, que é o grande volume de dados que trafegarão pela rede e a frequência de coleta de dados. O fato de alguns nós sensores terem a função de fazer o processamento das imagens coletadas, implica que estes nós tenham dimensões maiores do que as dos nós microsensores, isso porque as operações de processamento de imagens requerem um esforço maior, pois consomem muitos recursos, uma quantidade de memória maior, e conseqüentemente, consome mais energia. Esta aplicação permite que as imagens e sons capturados possam servir como fonte de segurança para situações em que se faz necessário monitorar o ambiente visualmente, com o intuito de se defender de possíveis roubos (LOUREIRO et al., [s.d.]

Além da segurança física em relação aos equipamentos e componentes, a segurança dos dados da rede deve ser levada em consideração. O fato de uma RSSF possuir uma comunicação móvel e de natureza autônoma, abre espaço para eventuais ataques de usuários mal intencionados que podem se infiltrar na rede a fim de espionar, interceptar, modificar ou, até mesmo, roubar os dados da rede,

podendo alterar a chave de segurança e colocar em risco a confidencialidade e integridade dos dados, o que traria prejuízos significativos para a plataforma como um todo (OBODOEZE; INYIAMA; IDIGO, 2012).

Com a utilização das RSSF, é possível fazer o sensoriamento de diversas variáveis ambientais, tais como: pressão, temperatura, umidade, presença ou ausência de um objeto, movimentação deste objeto, velocidade, localização etc (SOBRAL, 2012). Além do sensoriamento, a manutenção, o estabelecimento, o processamento, e a comunicação constituem as fases do modelo funcional de uma RSSF, como é descrito nos subitens a seguir, e ilustrado a figura 2.

**Figura 2:** Ciclo de vida de uma RSSF

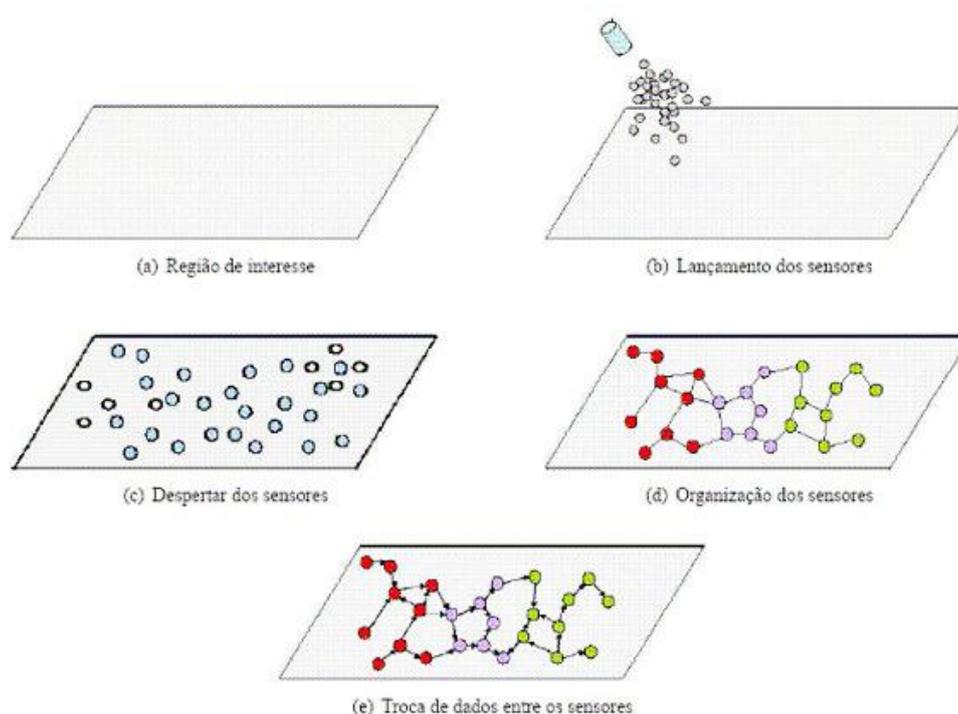


Fonte: SANTANA; ORTIZ; JÚNIOR (2011)

## 2.1 ESTABELECIMENTO

Ao se estabelecer a formação de uma RSSF, os nós podem ser postos estáticos em locais estratégicos do ambiente, ou aleatoriamente como mostrado na figura 3 a seguir. Após isso os sensores se comunicam para o arranjo da rede, tendo a capacidade de se auto-organizar, e se adaptando a possíveis falhas.

**Figura 3:** Estabelecimento de vida de uma RSSF



Fonte: SANTANA; ORTIZ; JÚNIOR (2011)

## 2.2 MANUTENÇÃO

A instalação de uma RSSF possibilita outra importante melhoria para as atividades internas da indústria de petróleo e gás, que é a manutenção dos seus equipamentos. Os sensores instalados na plataforma realizam medições através do sensoriamento do meio físico, emitindo por meio dessas medições um diagnóstico de falhas, que por sua vez, gera uma estimativa de como se encontra o status dos componentes do sistema, além de determinar a causa provável daquela falha. O

sensor de medição possibilita ao sistema dois tipos de manutenção, a preventiva, em que a ideia é programar a manutenção por períodos a fim de se identificar as falhas antes que elas ocorram, e a preditiva, que fornece dados para a manutenção preditiva, de modo que os equipamentos são monitorados por certo tempo, e conforme a necessidade de cada equipamento define-se um período para realizar a manutenção preventiva (SILVA, 2006).

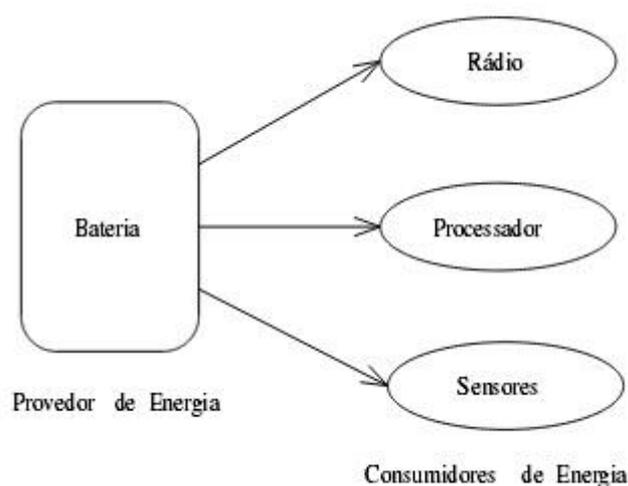
Na maioria das aplicações que as RSSF são implantadas nas indústrias, um dos problemas mais comuns com relação a manutenções é a substituição periódica de baterias dos nós sensores para garantir o funcionamento ininterrupto do sistema durante um longo período de tempo. Cada operação de manutenção feita em uma rede tem um custo associado, cada sensor tem um tempo de vida útil e, durante esse tempo, várias operações de manutenção devem ser realizadas (BARROSO; ROEDING; SREENAN, 2004).

Ao se instalar e configurar uma RSSF, o próximo passo seria distribuir fisicamente os sensores pelo ambiente no qual eles irão atuar. Caso a rede seja pequena, os trabalhos com manutenções serão mínimos, porém quando se trata de uma rede maior a distribuição e auto-organização são importantes, pois a preocupação com a distribuição destes sensores se faz necessária, devido às prováveis mudanças que a rede fica sujeita, tais como, interferências, localização dos sensores e esgotamento de energia. Em todas as fases de implementação de uma RSSF a manutenção se faz presente, desde o estabelecimento, passando pelo sensoriamento, processamento e comunicação, prolongando-se por toda a vida útil da rede, tendo a função de prolongá-la, prever o que pode acontecer na rede em relação ao estado dos seus componentes e atender a todos os requisitos básicos da aplicação. Levando-se em conta todos esses aspectos, nota-se que a manutenção da rede é muito importante para seu funcionamento, visto que os nós sensores podem atingir níveis críticos de energia, caso os mesmos sejam alimentados por baterias, que podem comprometer a capacidade e desempenho da rede de forma parcial ou integral, dependendo da situação (NAMBA, 2011).

## 2.3 SENSORIAMENTO

Outra fase do modelo funcional de uma RSSF é a do sensoriamento, onde se utiliza os nós sensores instalados no ambiente para que observem este ambiente e colem do meio físico os dados que a aplicação requisitar. Esta coleta pode ser periódica, quando é regulada em intervalos de tempo regulares; contínua, quando realizada de forma ininterrupta; reativa, quando durante sua realização há ocorrência de um evento e; coleta em tempo real, onde o objetivo é coletar em um dado intervalo de tempo, o maior número possível de dados. Os nós sensores que coletam estes dados possuem características próprias, tais como: modo de operação, modelo de descarga de bateria e consumo de energia das operações, que depende da aplicação da rede. O bom sensoriamento feito por estes nós, é decorrente das condições físicas em que os sensores se encontram. Estes sensores são constituídos por cinco componentes: bateria, processador, memória, sensores e rádio (transceptor). Em uma RSSF, para realizar as operações da aplicação, o processador, o rádio e o sensor utilizam a energia que fica armazenada na bateria. A figura 4 a seguir, ilustra os elementos consumidores de bateria de um nó sensor (NAKAMURA, 2003).

**Figura 4:** Consumidores de energia em um nó sensor



Fonte: NAKAMURA (2003)

## 2.4 PROCESSAMENTO

Em uma RSSF, o sensor tem como objetivo principal realizar a captura de dados do meio físico em que se encontra implantado. O microcontrolador é o dispositivo responsável por realizar o processamento dos dados que foram capturados. Dependendo da sua arquitetura, alguns microcontroladores dispõem de mecanismos que possibilitam a redução do seu consumo de potência, que influencia diretamente na questão energética e conseqüentemente na vida útil da rede. É importante frisar a questão do processamento na rede, onde este pode ser de informação, quando os dados coletados são gerenciados de modo a envolver ações de compressão e criptografia, por exemplo, e também o processamento de suporte, que envolve, além da atividade de gerenciamento, atividades de comunicação e manutenção da rede (SANTANA; ORTIZ; JÚNIOR, 2011).

## 2.5 COMUNICAÇÃO

Outro importante fator em uma RSSF é a comunicação entre os nós sensores. A forma como essa comunicação é realizada é de extrema relevância para a vida útil da rede, pois influencia diretamente na questão energética, que é um dos maiores desafios a ser solucionado atualmente no emprego deste tipo de tecnologia.

É importante ressaltar que minimizar o uso da bateria em um nó ao máximo possível é necessário, pois em uma RSSF a transmissão de dados é uma das atividades que mais consome energia. Dessa forma é essencial que algoritmos e protocolos de comunicação empregados na rede tenham a capacidade de gerar o mínimo possível de redundância. Escolher o melhor protocolo para a comunicação da rede é essencial para que o tempo de vida útil de um nó seja aumentado (SANTANA; ORTIZ; JÚNIOR, 2011).

### 3 REDES DE SENSORES SEM FIO: TECNOLOGIAS E PRINCIPAIS CARACATERÍSTICAS

As RSSF vêm sendo implantadas recentemente como uma alternativa viável para resolução ou precaução de problemas em diversos segmentos industriais, áreas militares e médicas, além da agricultura e outros campos de atuação. Alguns elementos são de fundamental importância para o funcionamento deste tipo de rede. A seguir, uma explanação breve sobre cada um deles e sua utilidade:

- **Sensor:** converge um dado fenômeno físico específico, em um sinal elétrico que será manipulado por outros equipamentos.
- **Nó sensor:** em uma RSSF é o principal elemento, constituído por memória, processador, bateria, unidade de rádio e os sensores.
- **Gateway:** aparelho responsável por receber dos nós sensores as informações coletadas, ou as informações do estado da rede. Além disso, pode realizar requisições e enviar comandos para a rede.
- **Estação Base:** é representado por uma máquina, mais precisamente um computador, que se comunica com o gateway e armazena os resultados em um banco de dados para disponibilizá-los para os usuários.
- **Atuador:** corrige falhas ou controla o objeto monitorado através da modificação de valores no ambiente.
- **Sink:** é o nó responsável por coordenar e concentrar as informações que recebe dos nós sensores, e enviá-las para o *Gateway*.

Para que seja implementada e configurada em um determinado ambiente, alguns aspectos básicos de como arquitetar a rede para uma aplicação devem ser levados em conta, baseado nas características que esta tecnologia propicia. Na subseção 3.1 serão apresentadas as principais características de uma RSSF. Em seguida, na subseção 3.2 será abordado um pouco sobre as camadas que compõem a arquitetura das RSSF.

### 3.1 CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE SENSORES SEM FIO

- Escalabilidade: possibilidade do número de nós na rede serem aumentados, visto que a instalação e manutenção de um sistema de monitoramento com uma rede de comunicação com fio resultariam em altos custos e uma complexidade gerada por uma grande quantidade de nós. A escalabilidade de uma RSSF também envolve além dos sensores, aquisição e processamento de dados, e a comunicação sem fio. Uma rede escalável é aquela que permite a expansão do número de nós. Ao se expandir uma rede, aspectos como complexidade da topologia, taxa de amostragem, sensibilidade do sensor, quantidade de dados, tempo de comunicação, energia, confiabilidade, e custos de instalação e operação devem ser levados em conta, a fim de se analisar se a expansão é viável ou não pra determinada situação (PAKZAD et al., 2008).
- Auto-organização: as RSSF auto-organizáveis estão se tornando uma realidade em aplicações residenciais, comerciais, médicas, militares, e industriais. Este tipo de rede os elementos interagem apenas entre si localmente, de modo que a ideia é levar as redes a serem menos dependentes de um controle centralizado, visando maior escalabilidade, robustez e serem mais adaptáveis. Além disso, ela deve reconfigurar automaticamente, para atender a possíveis alterações no número de dispositivos que venham a ser acrescentados ou retirados, e na localização dos mesmos (FIGUEIREDO et al., 2007).
- Eficiência energética: em uma RSSF o consumo de energia é fundamental para a duração da vida útil da rede. Algoritmos e técnicas de roteamento são importantes, pois pode estabelecer o número de mensagens que tráfegará na rede, que influenciará diretamente no consumo de energia do transmissor destas mensagens. Nós que tem maior volume de transmissão de dados esgotam suas baterias mais rapidamente. Uma solução é aproveitar a energia restante dos nós que possuem pouco trabalho de roteamento, ou seja, tem menos consumo de energia, para dividir o trabalho de roteamento com eles, e dessa forma, balancear o consumo de energia geral da rede (COAN, 2012).

- Conectividade: nós sensores sem fio possuem recursos muito limitados, e atuam principalmente em ambientes hostis. Deslocamentos, bloqueios na comunicação e falhas frequentes destes nós, fazem com que a topologia da rede altere-se dinamicamente, afetando assim a conectividade da mesma. A falta de topologia na rede leva toda a rede a se dividir em pedaços que se desconectam um do outro. Estas “sub-redes” tornam-se incapazes de se comunicar com o nó *sink*, que é responsável por fazer a interconexão entre a rede externa e a RSSF (SILVA, 2006), dessa forma, não poderão enviar seus dados para a estação base. Portanto, a conectividade da rede é muito importante, pois dados podem ser perdidos e informações não chegarão ao destino (SULTAN et al., 2009).
- Baixos Custos: nas RSSF é uma das características mais importantes, visto que devido a sua estrutura física, fios e conduítes são desnecessários. Vale ressaltar, que as aplicações no campo das RSSF, são projetadas com limitações de largura de banda e energia. Estas limitações impõem que mecanismos de aquisição de dados a tipos de dados de baixa largura devem ser restringidos, de modo que a quantidade de dados transferidos pela rede seja pequena, para que não comprometa o processamento de dados internamente no nó e a autonomia da energia. Com isso, é necessário que as RSSF sejam estruturadas levando-se em conta os custos, pois são redes que operam com poucos recursos e devem trafegar uma quantidade de dados limitada devido à questão energética (SILVA; FRUETT, 2010).

### 3.2 ARQUITETURA DAS RSSF: PADRÃO DE COMUNICAÇÃO, CAMADAS, DISPOSITIVOS E TOPOLOGIAS

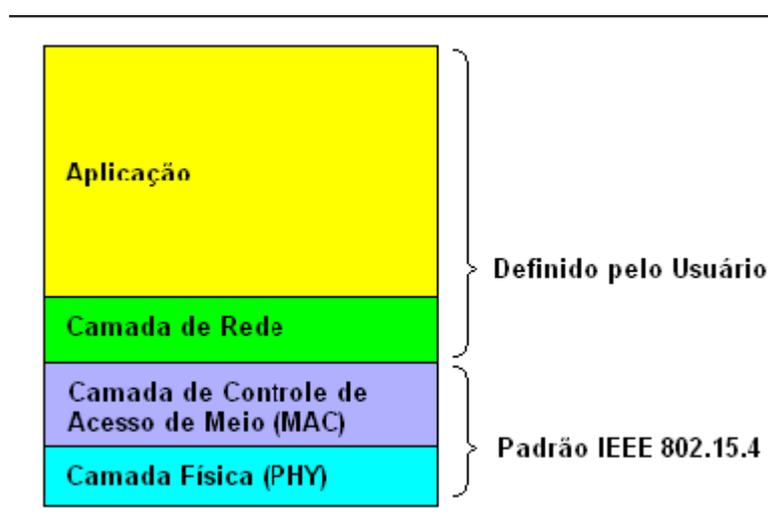
Este capítulo apresenta uma abordagem sobre a arquitetura das RSSF, desde o padrão IEEE 802.15.4, que é o padrão utilizado para se trabalhar com RSSF, passando pelas camadas que envolvem este tipo de rede, como a camada física e a camada MAC (controle de acesso ao meio) e por último as topologias que atuam nestas redes.

### 3.2.1 Padrão de Comunicação IEEE 802.15.4

Uma das principais características das RSSF é o fato de ser uma rede que opera com uma baixa taxa de transmissão, devido a sua infraestrutura física ter recursos limitados de energia. Devido a sua facilidade de implantação e a utilização cada vez mais comum de RSSF, o IEEE 802.15.4 vem se tornando um padrão bastante atraente por ser baseado em RSSF, sendo cada vez mais útil para aplicações comerciais, mais precisamente aplicações industriais. Outra importante questão que o padrão se adapta com eficiência em Redes de Sensores, é o fato de que os sensores são projetados para suportar comunicação entre curtos intervalos e com baixa taxa de dados, além de ter que consumir o mínimo possível de energia.

O padrão IEEE 802.15.4 tornou-se um padrão de credibilidade e boa aceitação, bem reconhecido pela indústria, e, portanto, bem aceito pelos seus usuários. É um padrão em que seus produtos estão disponíveis comercialmente a um baixo custo. Além disso, ele fornece especificações apenas para a camada física (*Physical – PHY*) e a camada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control - MAC*), como mostra a figura 5 a seguir. Essas camadas serão abordadas mais detalhadamente no próximo tópico deste capítulo (CHEN et al., 2009).

**Figura 5:** Camadas de Comunicação



A seguir, algumas das principais características do padrão IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4, 2003):

- Taxa de transmissão de dados de 250 kbps, 40 kbps e 20 kbps;
- topologia estrela e ponto-a-ponto;
- endereçamentos de 16 bits ou 64 bits;
- alocação de *slots* garantidos no tempo (*Guaranteed Time Slots – GTS*);
- acesso ao canal implementado com *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA-CA)*;
- baixo consumo de energia, (após a transmissão, os dispositivos entram em stand-by reduzindo, assim, o consumo de energia);
- detecção de energia (*ED – Energy Detection*);
- indicação da qualidade da conexão (*Link Quality Indication – LQI*);
- 16 canais na banda de 2,4 Ghz, 10 na banda de 915 Mhz e 1 na banda de 868 Mhz.

Além destas, outra importante característica, é que o padrão IEEE 802.15.4 em uma Rede de Sensores, não pode ser utilizado isoladamente, sendo necessária a implementação de um protocolo de rede, que tem por finalidade garantir a entrega das mensagens para nós que se encontrem distantes uns dos outros (OLIVEIRA, 2009). Portanto, é importante a escolha de um protocolo que a comunicação na rede seja a melhor possível.

### 3.2.2 Camadas

Como foi visto no tópico anterior, o padrão IEEE 802.15.4 define duas camadas de baixo nível, a camada física (*Physical – PHY*) e a camada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control - MAC*).

#### 3.2.2.1 Camada PHY

A camada física tem a incumbência de desempenhar algumas atividades, como, por exemplo, a medição da energia dentro do canal especificado (ED), a ativação e desativação do rádio transceptor, a seleção da frequência do canal, LQI

(*Link Quality Indicator*) para pacotes recebidos, e a transmissão e recepção de dados. (CAMPOS, 2006).

O padrão IEEE 802.15.4 disponibiliza dois padrões de camada física, onde que ambos operam dentro de faixas liberadas do espectro de frequências (Faixa ISM - *Industrial, Scientific, Medical*). Um dos padrões trabalha na faixa de 2,4 GHz. O outro padrão trabalha com duas faixas, 868 e 915 MHz, sendo utilizadas na Nova Zelândia, Austrália, Europa e América do Norte (IEEE 802.15.4, 2003).

A tabela 1 a seguir, mostra algumas especificações da camada física:

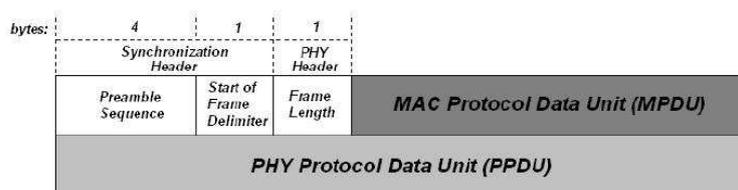
**Tabela 1:** Especificações da camada física

	<b>2450 MHz</b>	<b>915 MHz</b>	<b>868 MHz</b>
<b>Máxima taxa de transmissão</b>	250 kbps	40 kbps	20 kbps
<b>Número de canais</b>	16	10	1
<b>Modulação</b>	O-QPSK	BPSK	BPSK
<b>Bits por símbolo</b>	4	1	1

Fonte: SOARES (2012)

A técnica de modulação de transmissão deste padrão, chamada de DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum), permite o baixo custo dos dispositivos que constituem a rede, além da simplicidade. A camada física é formada por três interfaces: RF-SAP (Radio Frequency – Service Access Point), PD-SAP (PHY Data - Service Access Point) e PLME-SAP (PHY Layer Management Entity – Service Access Point).

A comunicação do ponto transmissor a um ponto de receptor pode atingir distâncias de 10 à 75 metros, dependendo das configurações de layout do ambiente onde a rede está e da potência dos equipamentos (EADY, 2007). O pacote de transmissão do padrão IEEE 802.15.4 pode conter um máximo de 127 bytes e é recebido pela primeira camada. Um byte representa o tamanho do pacote. Na figura 6 a seguir, o formato de transmissão dos pacotes na camada física.

**Figura 6:** Formato de Transmissão dos pacotes na camada PHY

Fonte: EADY (2007)

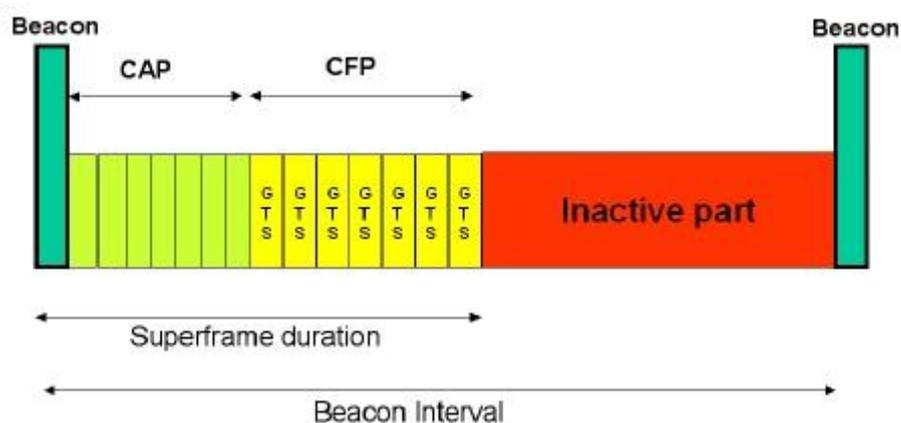
### 3.2.2.2 Camada MAC

A camada MAC tem a função de realizar a comunicação ponto a ponto entre os nós, além de ser responsável pelo acesso ao canal de rádio, fornecer suporte à segurança dos dispositivos da rede, implementar um mecanismo de acesso ao canal, e oferecer uma comunicação confiável entre duas entidades MAC (MOREIRA, 2012). Em resumo, esta camada basicamente tem por finalidade, formatar as mensagens que são recebidas pela camada física, processá-las e depois repassar essas mensagens para a camada de rede (IEEE 802.15.4, 2003).

Para se evitar colisões entre os pacotes transmitidos pelos dispositivos conectados na rede, pode ser utilizado o protocolo CSMA/CA, que é um protocolo de acesso ao meio, onde, o dispositivo que transmite o pacote, escuta o meio de comunicação com o intuito de verificar antes de enviar, se o meio no qual o pacote irá trafegar está livre ou não. Em caso positivo, o pacote é enviado, caso contrário, o dispositivo aguarda um período determinado e faz uma nova verificação para ver se o canal está livre. Todos os nós devem informar aos demais, a intenção de transmissão do pacote (MOREIRA, 2012).

A fim de controlar a comunicação entre os nós na rede, a camada MAC pode fazer uso de sinalizadores, onde o tempo do canal é dividido em superframes, que se ligam através de transmissões de sinalizadores pelo coordenador da rede. Um superframe é constituído por uma parte ativa e uma parte inativa. Na parte ativa é feita toda a comunicação e ela é dividida em slots com o mesmo tamanho, de modo que a transmissão do sinalizador ocorre no slot zero. Na figura 7 a seguir, uma ilustração da estrutura de um superframe. Já na parte inativa, os nós entram no estado de economia de energia, ou então tratam de outras atividades para não desperdiçar energia (OLIVEIRA, 2009).

**Figura 7:** Estrutura de um Superframe



Fonte: (BURATTI et al., 2009)

### 3.2.3 Dispositivos

Nas RSSF, os dispositivos podem ser analisados do ponto de vista físico ou lógico. Do ponto de vista físico, os dispositivos são classificados conforme suas funções. Os dispositivos com funções completas são denominados FFDs (*Full Function Device*), enquanto os dispositivos com funções reduzidas são os RFDs (*Reduced Function Device*).

Os dispositivos FFDs podem trabalhar como um simples membro da rede, como um coordenador ou servir como um coordenador da rede pessoal, podendo fazer parte de qualquer topologia de rede e exercer qualquer tipo de função. Devido a sua complexidade ou a função que exerce na rede, são dispositivos que consomem mais energia e podem se comunicar com qualquer tipo de nó.

Já os RFDs são dispositivos que não podem exercer a função de roteador ou coordenador, pois são dispositivos limitados. Os RFDs são indicados para aplicações mais simples, como o sensoriamento, por exemplo, ou o acionamento de dispositivos que não precisem transmitir ou receber uma grande quantidade de dados. Outra característica é que eles apenas mantêm comunicação com os FFDs, e consomem menos energia.

Os dispositivos vistos do ponto de vista lógico podem assumir diversas funções, entre elas: roteador, coordenador, e dispositivo final.

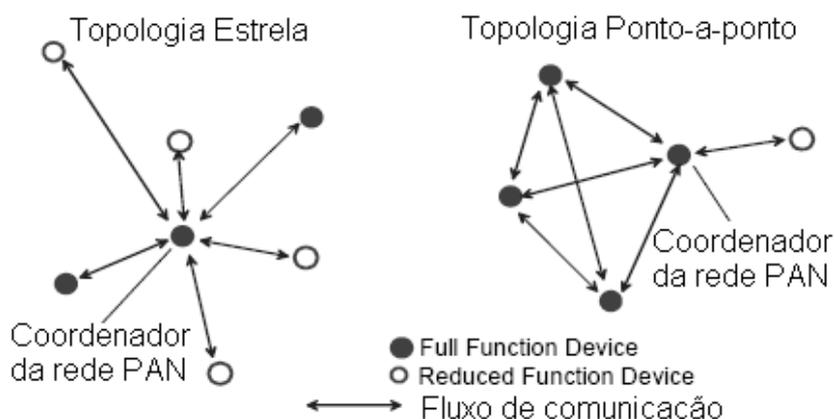
- Roteador: oferece a possibilidade de expandir a rede nem necessariamente a presença de um coordenador, pois este dispositivo armazena as informações da rede, e de acordo com os dados capturados, traça a rota correta para o tráfego de dados na rede. O roteador pode ser representado por um dispositivo apenas do tipo FFD.
- Coordenador: fornece o canal de comunicação e o número lógico para formar a rede, além disso, permite que roteadores e dispositivos finais se incorporem à rede. Assim como o roteador, pode ser representado apenas por um FFD.
- Dispositivo final: este tipo de dispositivo faz tanto a transmissão, quanto a recepção de dados, porém, não pode redirecioná-las. Sua comunicação ocorre apenas com o roteador ou com o nó coordenador, além disso, diferente dos demais dispositivos, este, pode ser tanto um FFD como um RFD, de modo que o RFD é melhor por consumir menos energia com o FFD.

Com estes tipos de dispositivos da rede, a comunicação mais interessante é a que se faça presente um ou mais FFDs coordenando as atividades, ou então diversos RFDs em uma comunicação ponto a ponto ou em uma topologia estrela. Contudo, este tipo de topologia necessita que todos os nós estejam no alcance do rádio. Por esse motivo, existe a necessidade de um protocolo de rede rodando nas Redes de Sensores, pois o padrão IEEE 802.15.4 trabalhando isoladamente não garante a entrega das mensagens para os nós distantes, sendo essa uma função do protocolo (OLIVEIRA, 2009).

### **3.2.4 Topologias**

No padrão IEEE 802.15.4, existem duas topologias que podem ser empregadas para operar no ambiente dependendo da aplicação utilizada: topologia estrela e topologia ponto-a-ponto, como ilustrado na figura 8 a seguir:

**Figura 8:** Topologias do Padrão IEEE 802.15.4



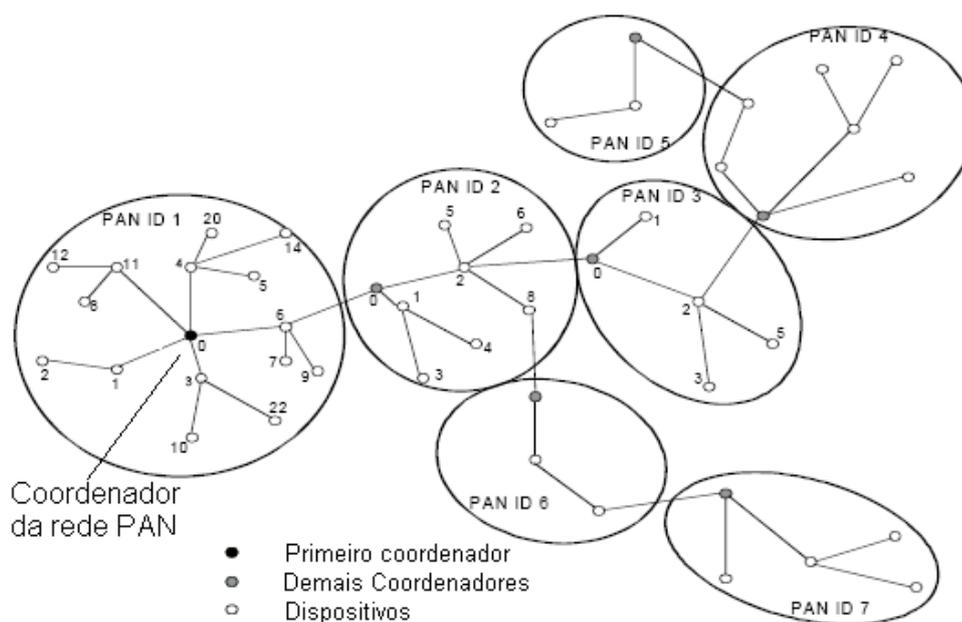
Fonte: (IEEE 802.15.4, 2003)

A escolha da topologia correta para a rede depende de diversos fatores, tais como: quantidade e frequência dos dados a serem transmitidos, requisitos da vida útil das baterias, distância física da transmissão, mudanças dos nós sensores e o nível de mobilidade dos dispositivos da rede. A seguir, uma breve abordagem dos dois tipos de topologia do padrão IEEE 802.15.4 e a topologia cluster tree, que é derivada da topologia ponto-a-ponto.

- **Topologia Estrela:** neste sistema, todos os nós de sensores sem fio estão dentro do alcance de comunicação, que geralmente varia de 30 a 100 metros até a estação base, que pode ser um computador, um dispositivo de monitoramento dedicado, ou qualquer outro dispositivo de entrada para uma taxa de dados elevada. Nesta topologia, todos os nós são idênticos e a estação base serve para comunicação de dados e comandos para os pontos de extremidade do sensor, além de transferir os dados para um sistema de alto nível, como por exemplo, a internet. A topologia estrela é a que gera menor consumo de energia, porém, é limitada pela distância de transmissão de rádio em cada nó (SOHRABI et al., 2004).
- **Topologia Ponto-a-Ponto:** os dispositivos se comunicam entre si dentro do raio de abrangência da rede. O primeiro dispositivo a se comunicar com o canal é nomeado o coordenador da rede (IEEE 802.15.4, 2003).

- Topologia Cluster Tree:** este tipo de topologia em RSSF apresenta um modelo em forma de árvore, onde os nós são organizados em diferentes grupos, denominados clusters. Nesse modelo de árvore, cada nó sensor é ligado a um nó sensor de menor profundidade, chamado de nó pai, que pode ser ligado a vários nós em profundidade superior, chamados de nó filho (JURCÍK et al., 2008). Nesta topologia, o primeiro coordenador age de modo a fazer com que outro dispositivo se torne o coordenador de um novo *cluster* adjacente ao primeiro. Outros dispositivos aos poucos irão se conectar, formando assim uma estrutura de rede denominada *multicluster*, ilustrado na figura 9 a seguir. A vantagem da estrutura *multicluster* é que aumenta consideravelmente a área de cobertura, porém, aumenta a latência da rede.

**Figura 9:** Topologia de uma rede *Cluster tree*



Fonte: OLIVEIRA (2012)

Os nós da rede que são instalados no ambiente a ser monitorado utilizam mecanismos para o estabelecimento da topologia. Durante a vida útil da rede, é natural que alguns dos nós falhem por falta de energia, consequentemente, a topologia desta rede será alterada, tornando-se assim uma topologia denominada dinâmica. Dessa forma, a qualquer momento a função de descoberta da topologia será utilizada (LOUREIRO et al., [s.d.]).

### 3.3 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO UTILIZADOS EM RSSF APLICADOS AO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO ESCOLHIDO

Os protocolos de roteamento para RSSF devem ser capazes de lidar com um número elevado de dispositivos e equipamentos com recursos limitados. O principal desafio dos protocolos de roteamento é que eles têm que lidar com a questão da mobilidade dos nós sensores, pois estes nós podem aparecer e desaparecer em vários locais, o que pode prejudicar a conectividade da rede. Por isso, estes protocolos devem reduzir a sobrecarga no roteamento das mensagens para que, mesmo com o aumento do número de hosts e da mobilidade, a conectividade da rede não seja afetada (HUHTONEN, 2004).

De acordo com a forma como as descobertas das rotas são efetuadas e quando elas acontecem, os protocolos de roteamento podem ser estruturalmente classificados como sendo planos (reativos e proativos), hierárquicos e híbridos. A seguir, é mostrada a classificação de cada um destes tipos de protocolos utilizados nas simulações no cenário escolhido, assim como suas características.

#### 3.3.1 Protocolos Planos Reativos

Neste tipo de protocolo, o descobrimento das rotas só é iniciado pelos nós da rede quando existe alguma informação a ser transmitida, ou seja, eles agem sobre demanda. Com isso, uma vantagem que este protocolo oferece, é que as rotas podem ser adaptáveis ao ambiente, que pode sofrer constantemente mudanças, como por exemplo, a inserção ou remoção de nós na rede. Contudo, para que essa adaptação ocorra, é necessário que cada nó atualize sua tabela de roteamento quando houver alguma mudança na topologia, e assim, rotas novas serem determinadas. Assim, haverá mais consumo de energia, pois durante a transmissão de dados vários recálculos serão feitos, maximizando a latência. (OLIVEIRA, 2012). A seguir alguns exemplos de protocolos de planos que foram implementados:

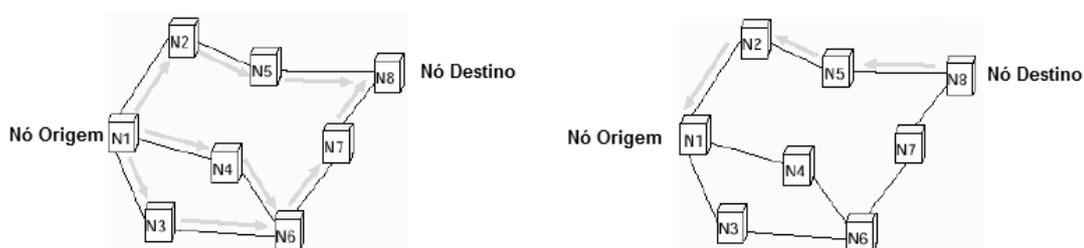
##### 3.3.1.1 Protocolo AODV (*Ad Hoc On-Demand Distance Vector*)

É um protocolo em que as rotas são criadas e mantidas apenas por demanda. Possui uma tabela de roteamento que armazena as informações sobre os nós intermediários entre o emissor e o destino, e também a informação que o pacote

chegou ao destino. Durante a descoberta das rotas as informações sobre os nós vizinhos ativos são recebidas pelo nó destino, servindo para transmitir uma mensagem aos dispositivos que estão dentro do alcance de transmissão. Esta mensagem de solicitação chamada REQ (*Route Request*), contém apenas o identificador do nó que fez a solicitação, sendo incrementada por cada dispositivo da rede por onde passa. Vale lembrar que a rota contida na RREQ contém a descrição da trajetória realizada de um nó origem até o atual, se fazendo necessária a inversão da ordem da rota pelo nó atual, para a inserção na sua tabela de rotas.

O nó que recebe a RREQ tem a tarefa de enviar uma mensagem de volta, de forma que a tabela de rotas do nó origem possa ser atualizada. Essa mensagem de volta é a resposta à requisição (*Route Reply*) RREP, que deve ser repassada para todos os dispositivos da rede que sejam vizinhos do dispositivo na qual a RREP foi enviada, pois nessa mensagem é que o nó origem encontra a rota dele até o nó que ele solicitou. (OLIVEIRA, 2012). Estas etapas de RREQ e RREP do protocolo AODV são ilustradas na figura 10 a seguir:

**Figura 10:** (a) AODV – propagação do RREQ (b) AODV - Caminho do RREP à Origem



Fonte: ROYER (1999)

### 3.3.2 Protocolos Planos Proativos

Os protocolos de roteamento planos do tipo proativos são protocolos que buscam sempre manter a consistência atualizando as informações de roteamento entre os nós, enviando mensagens de controle periodicamente para atualização das tabelas de rotas destes nós. Quando ocorrem mudanças na estrutura, as atualizações são propagadas através da rede.

Os protocolos proativos nem sempre são recomendados para todo tipo de aplicação, pois a manutenção das tabelas de roteamento dos nós da rede consome boa parte da banda da rede (OLIVEIRA, 2012). Os protocolos de roteamento proativos usam algoritmos que freqüentemente podem inundar a rede com muitas informações de roteamento sobre os nós vizinhos. Dessa forma, percebe-se a principal diferença dos protocolos reativos e dos proativos, onde os reativos atualizam as informações de rota por demanda, enquanto os proativos atualizam constantemente para manter a consistência da rede. Um exemplo de protocolo de roteamento planos proativo que é utilizado para as simulações feitas no cenário escolhido neste trabalho, será abordado a seguir:

### 3.3.2.1 Protocolo DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector Routing*)

É um protocolo que tem basicamente a ideia de utilizar um algoritmo de roteamento de vetor de distancia mais curto, para buscar uma rota mais simples da origem até o destino. Dessa forma, a quantidade de informações enviadas através da rede é reduzida. Além disso, dois tipos de pacotes de atualização são utilizados, que são os pacotes *full dump* e *incremental*. Este último tem a função de transportar a informação que sofreu alteração desde o último ciclo de rotas. Já o *full dump*, faz o transporte de todas as rotas que estão disponíveis. A quantidade de mensagens incrementais enviadas é maior que a quantidade dos pacotes *full dump*, porém, o protocolo DSDV ainda envia uma grande quantidade de informações para a rede, devido requisições das mensagens que são atualizadas constantemente, e assim, a quantidade de informações aumenta em termos de complexidade. Nas redes mais estáveis, que não sofram modificações constantes na sua topologia, e que possuam elevada quantidade de nós, o protocolo DSDV apresenta bons resultados, se comparados a outros protocolos, como por exemplo, o protocolo reativo AODV, pois o DSDV gera uma menor sobrecarga de dados que trafegam na rede, já que faz menos atualizações das rotas que o AODV. Porém, como dito anteriormente, os protocolos proativos consomem boa parte da banda, se comparados aos reativos (MAHDIPOUR; RAHMANI; AMINIAN, 2009).

### 3.3.3 Protocolos Hierárquicos

São protocolos indicados quando a rede sem fio cresce mais do que o esperado e os protocolos planos não conseguem mais suprir as necessidades, por causa da sobrecarga de dados cada vez maior e do enlace da rede. Uma solução viável e satisfatória é a utilização do roteamento hierárquico. Esse tipo de roteamento tem por base a organização dos nós da rede em grupos, de modo a atribuir a esses nós, funcionalidades diferentes dentro e fora dos grupos. A sobrecarga dos dados na rede pode ser reduzida através da inserção das tabelas de roteamento e das atualizações dos tamanhos dos pacotes em uma única porção da rede, sem precisar usar ela totalmente. A seguir será descrito o protocolo hierárquico utilizado para as simulações feitas no cenário deste trabalho.

#### 3.3.3.1 Protocolo LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*)

É um protocolo baseado em clusters que utiliza rotação aleatória das estações base (*cluster-heads*) de clusters locais, de forma a distribuir a carga de energia entre os sensores da rede. Além disso, ele tem por característica utilizar coordenação localizada para permitir escalabilidade e robustez em redes dinâmicas, incorporando uma fusão dos dados com o intuito de reduzir a quantidade de informação que deve ser transmitida para a estação base. O LEACH é um protocolo que tem a capacidade de distribuir uniformemente a dissipação da energia nos sensores, fazendo com que duplique a vida útil do sistema (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000).

A comunicação que ocorre no protocolo LEACH entre os *cluster-heads* e o nó central pode ser realizada diretamente. Diante disso, os *cluster-heads* que são responsáveis pela comunicação, devem ter a capacidade de transferir os dados diretamente para o nó central, de modo que é necessário que possuam uma potência de transmissão superior aos demais dispositivos comuns do seu próprio *cluster*. Isso acarreta um consumo maior de energia, diminuindo o tempo de vida deste dispositivo, o que não é desejável para uma RSSF. Baseado nesse desafio, a solução é propor novas eleições de *cluster-heads* para balancear o gasto energético entre os dispositivos. Para se eleger um novo *cluster-head*, a ideia é enviar

mensagens pela rede, porém, a desvantagem é que também aumenta o consumo de energia. Mesmo com o consumo maior de energia, vale salientar que tal consumo se dará apenas no coordenador de cada *cluster* e não em todos os nós sensores (OLIVEIRA, 2012).

### 3.3.4 Protocolos Híbridos

Este tipo de protocolo é uma junção das características dos protocolos planos e hierárquicos. São protocolos desenvolvidos com o intuito de otimizar a escalabilidade da rede, de modo a permitir que os nós que são próximos uns dos outros operem juntos, formando uma espécie de agrupamento, propiciando que a sobrecarga da rede diminua, pois o descobrimento de rotas faz com que essa sobrecarga aumente. Geralmente isso pode ser alcançado através da manutenção proativa de rotas entre nós vizinhos, e através da abordagem de descoberta das rotas, determinarem as rotas dos nós mais distantes. Alguns protocolos de roteamento híbridos são baseados em localização, ou seja, a rede é particionada e vista como um número de zonas para cada nó.

Um protocolo de roteamento adaptativo híbrido requer as seguintes propriedades para a implantação bem sucedida (RAMASUBRAMANIAN; HAAS; SIRER, 2003):

- Adaptativo: O protocolo deve ser aplicável a uma grande variedade de características da rede. Deve ajustar automaticamente o seu comportamento para alcançar metas traçadas de acordo com possíveis mudanças nos padrões de tráfego, mobilidade do nó e outras características da rede.
- Flexível: O protocolo deve conter diferentes métricas de otimização para aplicações específicas na camada de roteamento. Esses objetivos de otimização não devem ser definidos pelo projetista da rede, mas ser colocados sob o controle dos participantes da rede.
- Eficiente e prático: O protocolo deve alcançar um melhor desempenho possível, tendo estratégias para melhorar a comunicação na rede sem necessitar optar por alternativas de altos custos e de baixo nível.

A seguir será descrito o protocolo Zigbee, o protocolo híbrido utilizado para as simulações feitas no cenário deste trabalho.

#### 3.3.4.1 Protocolo Zigbee

O Zigbee é uma especificação para um conjunto de protocolos de comunicação de alto nível. É uma tecnologia típica de comunicação sem fio, além de utilizar baixa taxa de transmissão, rádios digitais de baixa potência. A tecnologia definida pela especificação ZigBee, destina-se a ser mais simples e menos dispendiosa do que outras, tal como o Bluetooth. É um protocolo destinado a rádio-frequência (RF) para aplicações que requerem uma baixa taxa de dados, bateria de longa duração, e redes seguras. O Zigbee se caracteriza por ser um padrão de protocolo com firmware atualizado remotamente, totalmente sem fio e baixa potência, malha líquida trabalhando para operar com baterias, baixa manutenção e maior tamanho de rede com alto padrão de segurança (LAKHE, 2012).

O padrão de protocolo Zigbee tem um mercado aberto para diversas aplicações, tais como: controle doméstico, no setor de segurança, em sistemas de ventilação, aquecimento e ar condicionado, por exemplo; área da saúde com relação à monitoração de pacientes; controle de processos industriais; medições automáticas na área de automação predial; controles remotos eletrônicos e; monitoramento ambiental. Para tanto, o Zigbee é implementado sobre o padrão IEEE 802.15.4, que especifica a camada física e a de enlace, enquanto as demais camadas o próprio Zigbee é quem as define (MOREIRA, 2012).

## 4 CENÁRIO DE TESTES E METODOLOGIA UTILIZADA

O cenário real escolhido para realizar as simulações desta pesquisa consiste em um espaço propício para a instalação de uma Rede de Sensores Sem Fio. O ambiente escolhido foi uma refinaria de petróleo e gás natural.

### 4.1 REFINARIA DE CAPUAVA

Para o cenário de simulação e execução dos testes, foi escolhida a Refinaria de Capuava (RECAP), localizada nas proximidades do município de Mauá, estado de São Paulo, com uma área total de aproximadamente 4 km<sup>2</sup>. Incorporada à Petrobrás desde 1974, a RECAP trabalha com alguns produtos, entre eles, os principais são: GLP (gás liquefeito de petróleo), óleo diesel e gasolina, tendo como atividade principal o refino do petróleo.

A RECAP é um projeto que consiste na eliminação do consumo de água potável da concessionária através do reuso de um rio que fica próximo da refinaria, chamado Tamanduateí. Neste sentido, algumas ações e objetivos foram planejados, conforme descrito nos tópicos a seguir:

- Adequações na estação de tratamento de água;
- Pesquisa, desenvolvimento de fornecedores e substituição de produtos químicos;
- Limpeza de tanques e reservatórios;
- Melhorias nos processos de filtragem;
- Desenvolvimento de produtos e procedimentos químicos para lavagem química;
- Eliminação da formação de micro-organismos nos filtros.
- Implantação do sistema de monitoramento da qualidade de água;

#### 4.1.1 Ambiente de Monitoramento

A escolha do local na Refinaria de Capuava para a simulação da Rede de Sensores Sem Fio tem como justificativa ser um ambiente que oferece a possibilidade de implantar os nós sensores em tanques que estão a uma distância

viável para realização dos testes, e que estes ambientes dispusessem de algum galpão central para abrigar o nó coordenador da rede. As figuras a seguir (figura 11 e figura 12), ilustram as imagens das partes da refinaria que serão utilizadas como cenário deste trabalho. Estas imagens foram captadas pela ferramenta Google Earth, que possibilita a visualização de imagens feitas via satélite. Em seguida, foram feitas edições no programa Paint.

**Figura 11:** Cenário do conjunto 1 de tanques da Refinaria de Capuava



O cenário da figura 11 representa um conjunto de oito tanques (numerados de 1 a 8) a serem monitorados cada um com um nó sensor, e um galpão (representado pela letra 'G') servindo de abrigo para o nó coordenador. Já o cenário da figura 12 apresenta um conjunto de sete tanques (numerados de 10 a 16) a serem monitorados cada um com um nó sensor, e um tanque (representado pela letra 'T') com um nó intermediário entre os cenários para realizar tanto o sensoriamento quanto o roteamento (apenas no caso das redes hierárquicas e híbridas).

**Figura 12:** Cenário do conjunto 2 de tanques da Refinaria de Capuava



A figura 13 a seguir, ilustra o cenário total da simulação, contendo os 16 tanques, 8 do primeiro conjunto e 7 do segundo conjunto e 1 tanque intermediando os 2 conjuntos.

**Figura 13:** Cenário dos 2 conjuntos de tanques da Refinaria de Capuava



Os tanques de uma refinaria de petróleo são ambientes propícios a elevadas temperaturas, além disso, pressão e vazão também são variáveis que podem acarretar prejuízos significativos quando não tratados corretamente. O controle e monitoramento destas três variáveis nos tanques de uma refinaria são essenciais para a segurança do local, pois se os limites de temperatura, pressão ou vazão, forem excedidos em um tanque que armazena algum produto químico, as consequências e riscos de explosões, incêndios e vazamentos, aumentam substancialmente (FREITAS, 2000). Com o intuito de amenizar possíveis riscos a estes tanques e, conseqüentemente, a todo o ambiente industrial ao qual os tanques estão inseridos, este trabalho propõe (a nível de simulação), uma RSSF para realizar o monitoramento das variáveis de temperatura, vazão e pressão, em

cenários de monitoramento constante e intercalado destes tanques, permitindo que os dispositivos inteligentes (nós sensores) instalados nos tanques se comuniquem entre si, de modo a receber e processar, em tempo real todas as informações pertinentes ao meio físico em que se encontram os nós que farão o sensoriamento. Em seguida, os dados coletados pelos sensores são encaminhados para uma central de controle, chamada de “nó coordenador”, instalado no galpão. Com isso, em caso de alguma anomalia nos tanques, há uma possibilidade de uma correção remota, evitando assim, possíveis prejuízos.

## 4.2 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO NETWORK SIMULATOR 2

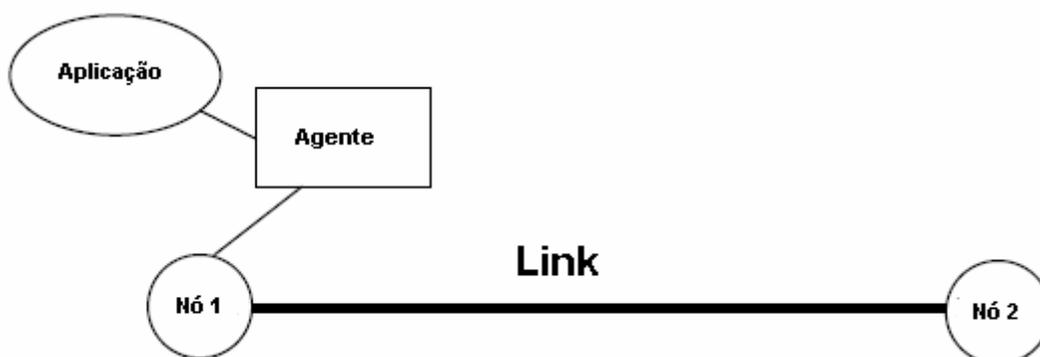
O Network Simulator 2 (NS-2) é uma ferramenta robusta criada para simulação de redes de computadores, desenvolvida na Universidade de Berkeley através do projeto VINT (*Virtual InterNetwork Testbed*). Por ser uma ferramenta gratuita e com código fonte aberto, permite aos usuários a alterações e ajustes conforme necessário, de modo a se caracterizar, a partir daí, como um software colaborativo, sendo possível simular tecnologias de rede com e sem fio, podendo fazer uso de cenários construídos com os protocolos UDP e TCP, utilizando diversas políticas e arranjos de rede, entre outras características.

Na ferramenta Network Simulator 2, a programação é feita em duas linguagens: OTCL, que é uma linguagem interpretada, onde são escritas as simulações e a linguagem C++, que é utilizada para a estrutura básica, ou seja, agente e protocolos por exemplo. Essas duas linguagens são utilizadas devido à necessidade de se implementar algoritmos que rodem em um grande conjunto de dados (C++) e outra linguagem para evitar o desgaste por parte do usuário em ter que compilar o programa para testá-lo sempre que um parâmetro da simulação precisar ser mudado (OTCL).

Durante as simulações, a ferramenta disponibiliza um módulo de visualização da rede chamado NAM, com o intuito de facilitar o entendimento da simulação através de desenhos dos dispositivos da rede. Além disso, o NAM tem a capacidade de criar configurações de rede de forma gráfica, de modo a acrescentar dispositivos e ligações entre os mesmos. A figura 14 a seguir ilustra um exemplo da estrutura de

uma simulação básica, com os componentes necessários para esta simulação. (GONÇALVES; CORRÊA, 2005).

**Figura 14:** Estrutura de uma simulação



Fonte: GONÇALVES; CORRÊA (2005)

- Aplicação: associada diretamente a um agente particular, sendo a fonte de tráfego da rede;
- Agente: são associados aos nós, e responsáveis pela geração de diferentes pacotes;
- Nós Sensores: contém os sensores para realizar o sensoriamento e/ou fazer o roteamento das mensagens;
- Link: é o enlace que conecta os nós da rede, onde trafegam os pacotes, podendo ser com ou sem fio.

#### 4.2.1 Camadas do NS-2

O NS-2 trabalha com as camadas de rede, transporte e aplicação. A seguir é feita uma abordagem sobre estas camadas, relacionando seus aspectos ao funcionamento do NS-2.

- **Camada de Rede:** com a necessidade de especificar qual o caminho que os pacotes devem seguir, a camada de rede tem essa responsabilidade, é nela que ocorre a transferência de pacotes entre um nó emissor e um nó receptor.

Na realidade essa tarefa é realizada pelos protocolos de roteamento que trabalham na camada de rede. O algoritmo de roteamento é o núcleo do protocolo, tendo como função estabelecer uma rota adequada entre a origem e o destino dos pacotes.

- **Camada de Transporte:** no NS-2, os agentes TCP (*transmission control protocol*) e UDP (*user datagram protocol*) são utilizados para simular os protocolos. O UDP é um protocolo não orientado a conexão, de modo a não oferecer muitas garantias de que os pacotes serão entregues ao destino. Já o protocolo TCP é orientado a conexão, mantém controle do fluxo de congestionamento, retransmissão, e garante que os dados chegarão corretamente ao receptor.
- **Camada de Aplicação:** nesta camada, o NS-2 possui várias classes que fazem a simulação dos protocolos, que são responsáveis por gerar o tráfego da rede. Baseado nos protocolos de transporte (TCP e UDP), existem dois serviços aplicados para as conexões da rede. O CBR (*Constant Bit Rate*) é um serviço aplicado para as conexões que precisam de banda fixa, pois os requisitos de tempo entre o emissor e o receptor são limitados. Exemplos de aplicações deste tipo são voltados geralmente para áudio e vídeo. Já o serviço FTP (*File Transfer Protocol*) se diferencia principalmente por passar mais confiabilidade, pois requer garantias na entrega dos pacotes.

### 4.3 TRACEGRAPH

No NS-2, além dos arquivos NAM, que permitem visualizar os pacotes sendo enviados e recebidos entre os nós da rede, existem os arquivos do tipo trace, cujo seu conteúdo pode ser analisado graficamente através da ferramenta TraceGraph (LUKOIT et al., 2000).

Esta ferramenta disponibiliza 12 tipos de gráficos diferentes em terceira dimensão (3D), e um leque de 238 tipos de gráficos diferentes em duas dimensões (2D). Além disso, é uma ferramenta que compreende modelos para análise de simulações, como por exemplo: Jitter, total de pacotes enviados, total de pacotes recebidos, vazão de pacotes enviados e vazão de pacotes recebidos, que são os testes utilizados neste trabalho como critério de comparação dos protocolos. Os

gráficos podem ser gerados com a extensão *jpeg* ou *tiff* facilitando, assim, a captura dos gráficos gerados.

Como foi dito anteriormente, no TraceGraph foram utilizados três parâmetros para realizar a comparação dos protocolos dos testes da simulação. Estes parâmetros serão abordados a seguir:

- **Total de Pacotes Enviados e Recebidos:** os pacotes enviados e recebidos são importantes para avaliar o bom desempenho da rede. Cada protocolo trabalha o tráfego dos dados na rede de forma diferente, logo, a quantidade de pacotes que são enviados e recebidos, é fundamental para analisar os protocolos do ponto de vista da consistência da rede.
- **Jitter:** é um parâmetro utilizado como forma de avaliar o atraso que o ocorre na entrega dos dados na rede, de modo que consiste da diferença de variação de atraso de duas amostras consecutivas. Quanto menor o Jitter em uma rede melhor é a comunicação da mesma.
- **Vazão:** assim como o total de pacotes enviados, recebidos e o Jitter, outro importante parâmetro de simulação é a vazão, que corresponde à quantidade de pacotes que são enviados ou recebidos simultaneamente em determinados períodos de tempo.

#### 4.4 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Neste tópico são abordados alguns parâmetros de avaliação utilizados para as simulações que são realizadas nos cenários implementados e simulados na ferramenta NS-2. A seguir são descritos as análises de cada parâmetro necessário às simulações:

##### 4.4.1 Quantidade de nós sensores a serem monitorados

A cobertura da coleta de dados no ambiente a ser monitorado, é relativa à quantidade nós presentes nesta área, de modo que quanto mais nós existirem, melhor será essa cobertura. Porém, se houver uma quantidade muito elevada de

dispositivos no ambiente e este ambiente for relativamente pequeno, existe a possibilidade de congestionamento na rede, que conseqüentemente resultaria em perda de dados. Portanto, é necessária uma densidade correta de dispositivos no ambiente a ser monitorado para que se evite o máximo possível de perda de informações.

#### **4.4.2 Tamanho da área de simulação**

Dependendo da topologia empregada na RSSF (Estrela, Malha ou *Cluster-tree*), tamanho da área de monitoramento deve ser viável a comunicação, visto que as RSSF oferecem certa limitação para conectividade entre os nós sensores. No cenário escolhido na Refinaria de Capuava a distância entre os tanques exige uma rede configurada como Malha ou *Cluster-tree*, sendo, nestes casos, empregados os protocolos de roteamento alvo deste estudo.

#### **4.4.3 Distribuição dos nós sensores**

Na área de monitoramento os nós foram fixados nos tanques, de forma que a distância entre os tanques e o galpão permite uma comunicação com uma perda de pacotes viável.

#### **4.4.4 Redes Planas, Hierárquicas e Híbridas**

Foi utilizado um galpão para instalação do nó coordenador e dois conjuntos de tanques: um conjunto com oito tanques, cada um com um nó sensor e outro conjunto com sete tanques, cada um também com um nó sensor, onde cada nó possui três sensores (temperatura, pressão e vazão). Entre os dois conjuntos existe um nó instalado em um tanque, que faz a medição e o roteamento entre os dois conjuntos, dependendo do tipo de topologia escolhida.

#### 4.4.5 Parâmetros para simulações

Todas as configurações de hardware dos nós sensores, dos *cluster-heads* das redes hierárquicas e híbridas, e do nó coordenador, foram baseadas nos seguintes valores do nó sensor MicaZ (“WSN Professional Kit - Crossbow Technology”, [s.d.]).

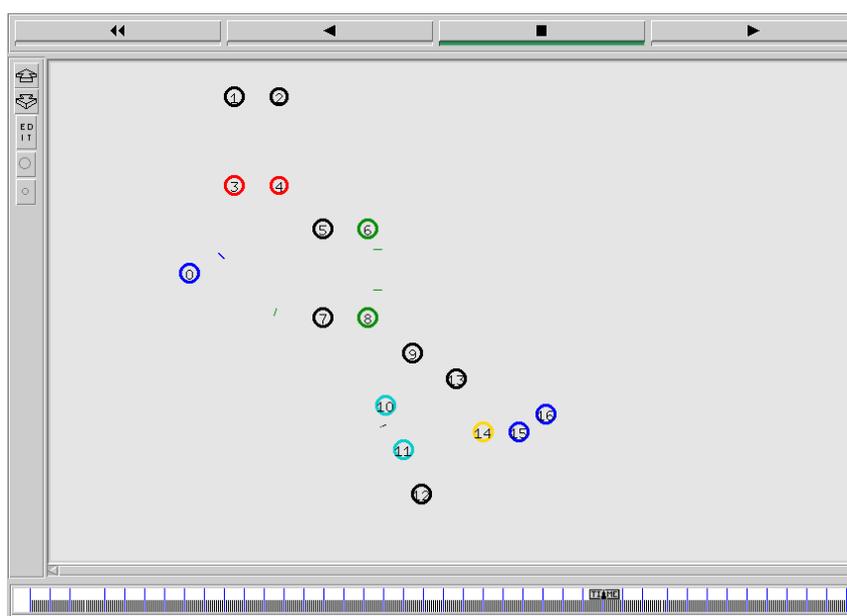
- Tensão de trabalho: 3Volts;
- Utilização de 3 sensores por nó sensor. Dessa forma, com média de 1mA por sensor, o consumo total de sensoriamento é de 3mA (miliampéres). Isto gera uma potência consumida de 9mW (miliwatts) ( $P = i \times V \Rightarrow P = 3\text{mA} \times 3\text{V} = 9\text{mW}$  ou 0.009 Watts, que equivale a um consumo de 0.009 Jouls por segundo);
- A corrente de consumo do processamento: 8mA, que corresponde a uma potência de consumo de 24mW (8mA x 3V) ou 0.024 Joules por segundo;
- Frequência de operação: 4MHz;
- Bateria: Nesta planta, a fonte de energia é permanente (alimentação pó rede elétrica), não sendo necessária a utilização de baterias;
- Protocolos de roteamento: AODV, DSDV, LEACH e ZIGBEE;
- Camada de acesso ao meio: padrão IEEE 802.15.4;
- Unidade de radiotransmissão: corrente de consumo de 27mA para transmissão e 10mA para recepção, correspondendo as potências consumidas de 81mW (27ma x 3V) e 30mW (10mA x 3V) respectivamente.
- Comunicação realizada entre nós sensores e coordenador da RSSF: foi feita de dois tipos: intercalada, com intervalos entre coletas de 20 segundos e simultânea, cujos nós sensores comunicam-se simultaneamente com o coordenador.
- A simulação inicia no instante  $t = 1$  segundo e termina no instante  $t = 98$  segundos na simulação simultânea. Na simulação intercalada inicia no instante  $t = 1$  segundo, e termina no instante  $t = 500$  segundos. O motivo do TraceGraph, em alguns gráficos, exibir tempos menores é que o mesmo, ao perceber um comportamento linear do dado plotado, exibe apenas o tempo onde houve mudanças perceptíveis ou importantes nos gráficos gerados.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados alguns gráficos que foram gerados pela ferramenta TraceGraph. Estes gráficos servem de critério comparativo para analisar o desempenho dos protocolos de roteamento implementados para realização dos testes nas simulações. Tais gráficos possibilitam a escolha do melhor protocolo, pois, através da análise dos mesmos, é possível determinar qual o mais viável para determinado cenário de simulação da RSSF aplicado à Indústria de Petróleo e Gás Natural. Foram implementados os protocolos das Redes Planas (AODV e DSDV), das Redes Hierárquicas (LEACH) e das Redes Híbridas (ZIGBEE).

Os testes foram realizados em um cenário com a comunicação simultânea e outro com a comunicação intercalada. A figura a 15 ilustra a composição física dos nós na rede, onde os nós que iniciam a comunicação (4, 8, 10 e 16), repassam os pacotes da rede ao nó sorvedouro (nó 0), quando as simulações disserem respeito às redes planas e os nós 3, 6, 11 e 15, são os subcoordenadores dos *clusters* implementados nas Redes Hierárquicas e Híbridas. O nó 3 é responsável por administrar os nós 1, 2, e 4; o nó 6 responde pelos nós 5, 7 e 8; os nós 9, 10 e 12 são coordenados pelo nó 11 e; o nós 13, 14 e 16 são de responsabilidade do nó 15.

**Figura 15:** Ilustração dos Nós distribuídos fisicamente nos Cenários Implementados baseados nas distâncias reais da Indústria de Capuava, gerado através do NAM



Fonte: NAM (Network Simulator 2, 1995)

## 5.1 ANÁLISES DAS REDES PLANAS NA COMUNICAÇÃO SIMULTÂNEA

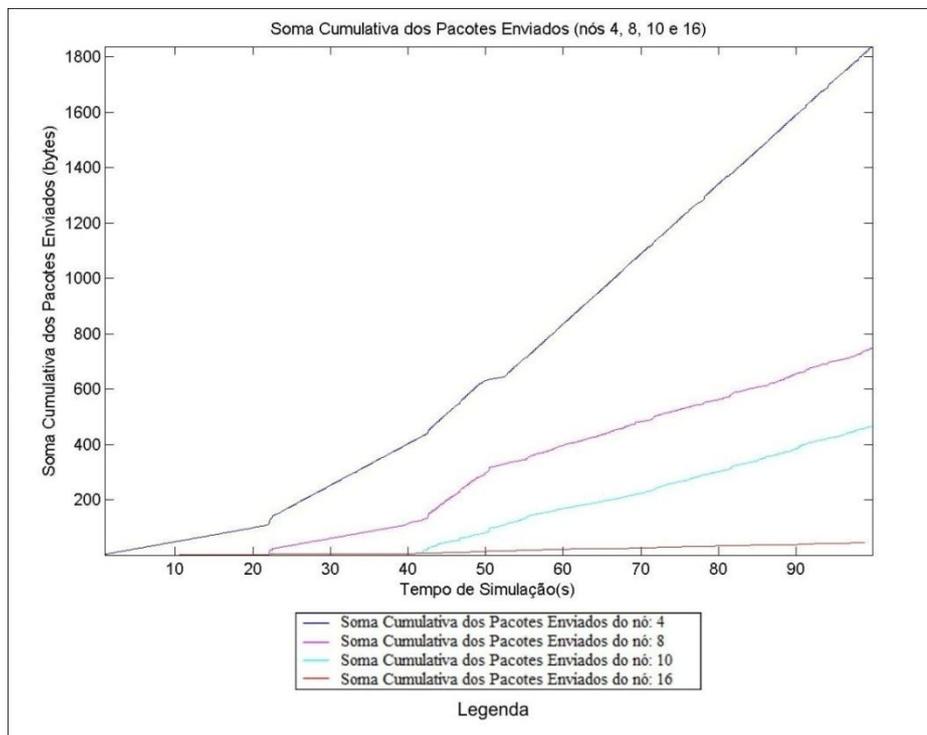
Os resultados a seguir apresentam os gráficos e comparações feitas diante dos testes realizados com os dois Protocolos Planos implementados: AODV e DSDV. Posteriormente aos gráficos e comentários, foi feita uma comparação para saber qual dos dois Protocolos se adéqua melhor ao cenário da Comunicação Simultânea, neste contexto.

### 5.1.1 Total de Pacotes Enviados

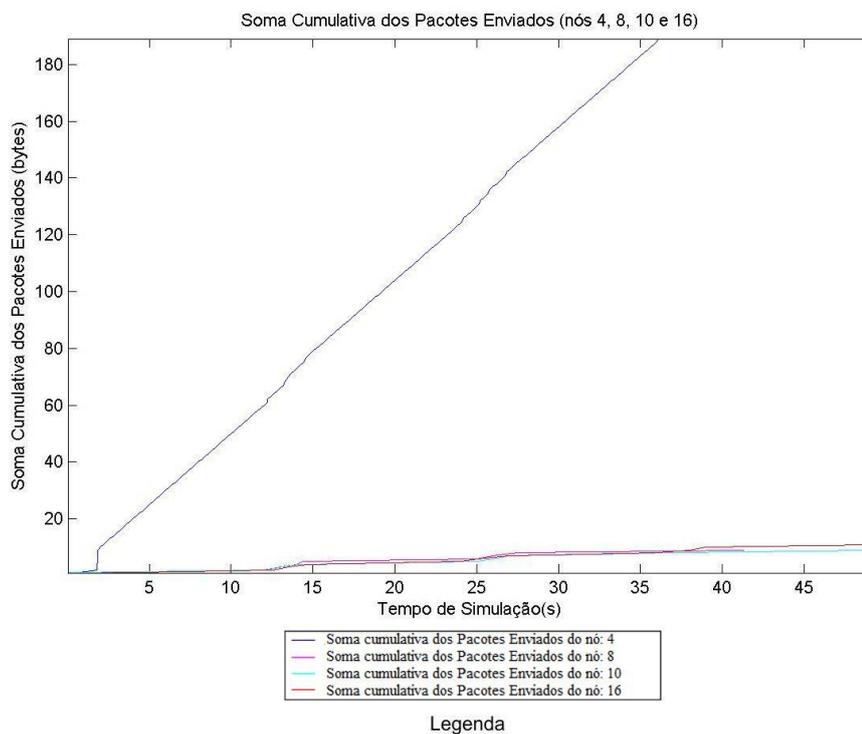
A figura 16 representa o gráfico do total de pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo AODV. Pode-se perceber a existência da tendência de crescimento mostrando que o nó que iniciou primeiro a comunicação (nó 4), obteve primeiro o acesso ao meio físico, garantindo assim um envio de uma quantidade de pacotes maior em relação aos próximos nós que iniciaram seu envio de dados ao coordenador posteriormente. Portanto, os outros nós vão ter que disputar o meio, demorando mais tempo para iniciar o envio de seus pacotes, tendo assim, uma latência maior para começar o envio dos dados na rede.

A figura 17 ilustra o gráfico do total de pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo DSDV. O gráfico do DSDV mostra que os três nós sensores que se comunicaram posteriormente ao primeiro nó a iniciar a comunicação, mantêm um crescimento constante baixo e aproximadamente equivalente entre eles, porém significativamente inferior ao nó 4, o qual iniciou primeiro sua comunicação e obteve logo o acesso ao meio. Esse resultado corrobora com a característica deste protocolo, que é o de ocupar muito o meio físico de comunicação na tentativa de localizar os nós vizinhos ao nó comunicante, tentando assim estabelecer a melhor rota.

**Figura 16:** Total de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento AODV



**Figura 17:** Total de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento DSDV

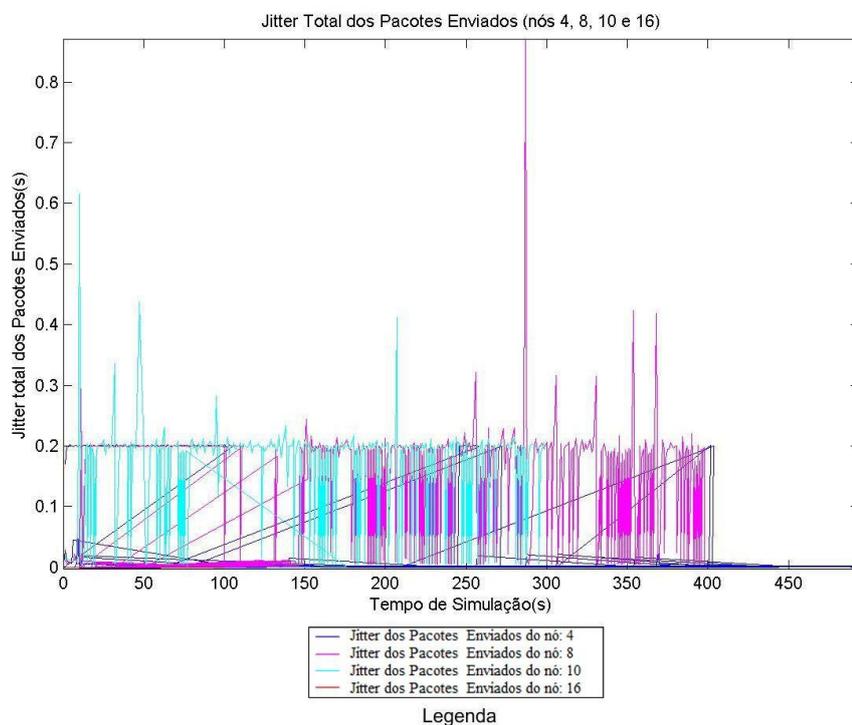


### 5.1.2 Jitter dos pacotes enviados

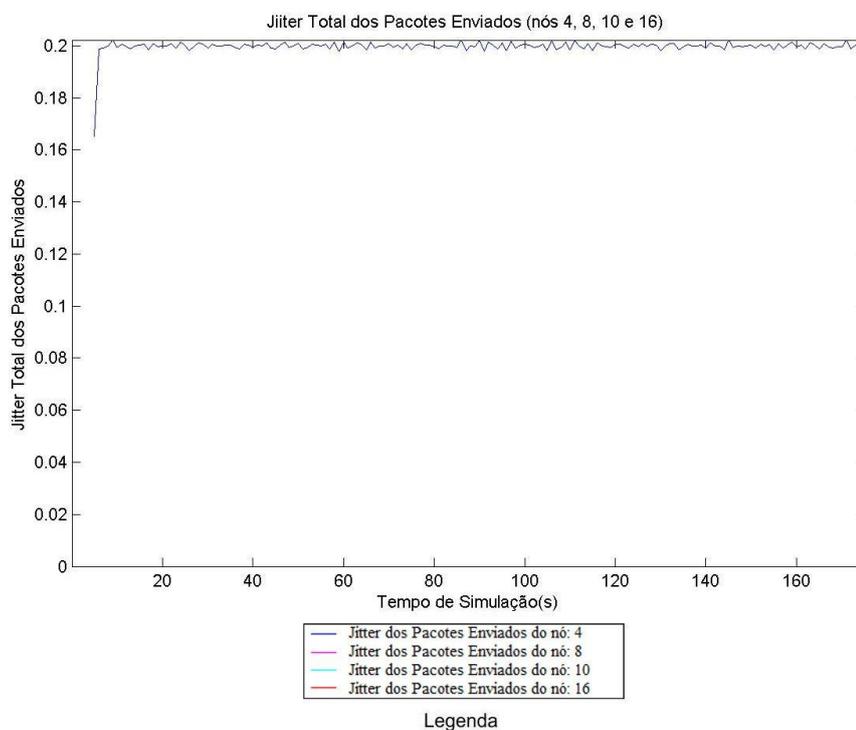
A figura 18 apresenta o gráfico do Jitter dos pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo AODV, onde se percebe que o Jitter mantém uma média de 0,2 segundos, variando de 0,0s a 0,8s em alguns momentos, o que é considerado baixo e conseqüentemente adequado para este cenário, pois quanto menor o Jitter, melhor é a comunicação, mostrando que a diferença de atraso entre um pacote e outro é baixo e, conseqüentemente, adequado ao tipo de cenário simulado.

Na figura 19, que representa o gráfico do Jitter dos pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo DSDV, é possível que notar, que assim como no gráfico do AODV, a média constante de 0,2s também se mantém, porém apenas o nó 4 apresenta essa média, de forma que os demais nós (que se diferenciam do nó 4, pelo fato de não iniciar a comunicação primeiro) tem o seu valor de Jitter zerado, por isso, não aparecem no gráfico. Isso se deve ao fato do DSDV trabalhar com roteamento baseado em menor caminho em não em tabelas de roteamento, como é o caso do AODV, tornando-se, assim, mais rápido e com menor atraso entre os pacotes do mesmo nó comunicante.

**Figura 18:** Jitter dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento AODV



**Figura 19:** Jitter dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento DSDV

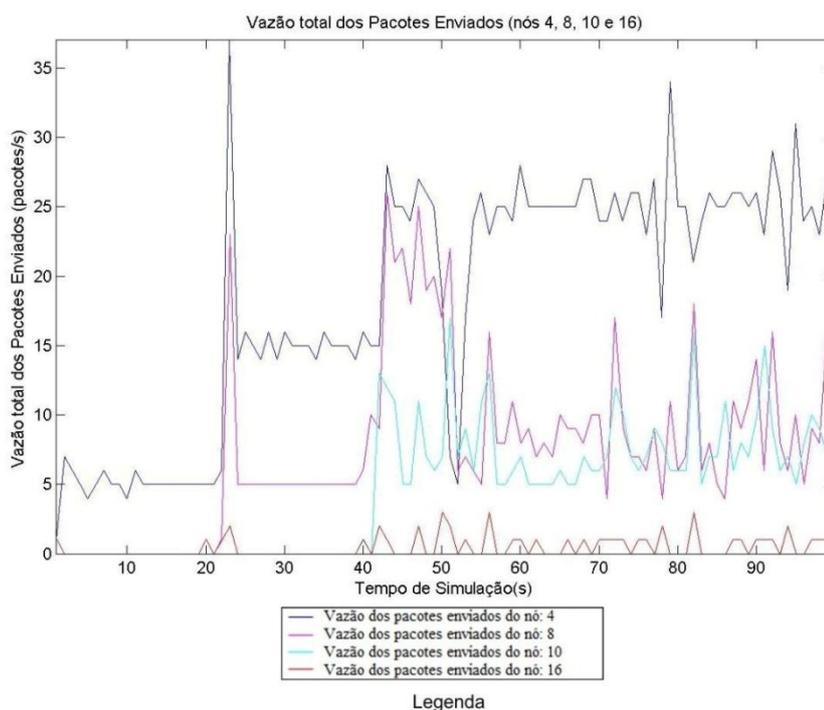


### 5.1.3 Vazão dos pacotes enviados

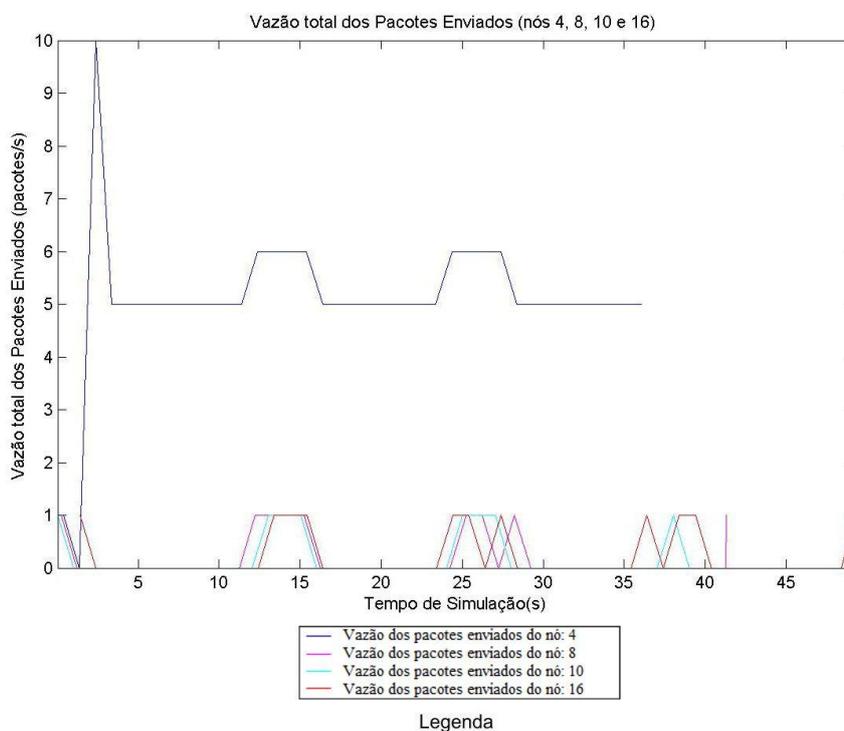
Na figura 20, está representado o gráfico da Vazão total dos pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo AODV, que apresenta uma situação onde se percebe que, à medida que vão se comunicando mais nós na rede, existe uma tendência da vazão do nó inserido por último ser sempre menor que o nó que se comunicou anteriormente a ele, devido à existência da disputa pelo meio entre os nós que ocorre sempre que um nó é inserido. Outra característica perceptível é que à medida que os nós que iniciam a comunicação após o primeiro (nó 4), este mesmo nó vai aumentando sua vazão até se estabilizar mantendo uma média de 25 pacotes/s após o início da comunicação do último nó (16), no instante  $t = 40$  segundos.

A figura 21 apresenta o gráfico da Vazão total dos pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo DSDV onde, no início, existe um pico elevado da vazão de pacotes do nó 4 (nó que inicia primeiro a comunicação), que é normal devido a ser o início da comunicação. Rapidamente a vazão se estabiliza variando de 5 a 6 pacotes/s. Posteriormente, os nós que iniciam sua comunicação depois do nó 4, mantêm uma taxa de vazão constante variando de 0 a 1 pacotes/s sempre no instante em que o nó 4 varia de 5 a 6 pacotes/s, mais uma vez atestando que o DSDV requer maior utilização do meio físico de comunicação para realizar o seu roteamento.

**Figura 20:** Vazão dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento AODV



**Figura 21:** Vazão dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento DSDV



Após a análise dos gráficos acima, baseados nos parâmetros de simulação escolhidos como critério de comparação e com as estatísticas de simulação obtidas através da ferramenta TraceGraph, foi possível concluir que para a comunicação simultânea, o protocolo AODV gerou melhores resultados que o protocolo DSDV.

No total de pacotes enviados, o protocolo AODV mostrou uma distribuição do total de pacotes enviados na rede melhor que o protocolo DSDV, pois através dos gráficos, foi possível perceber que, no DSDV, apenas o nó 4 mantém um crescimento aparentemente satisfatório, enquanto os demais nós (8, 10 e 16) se mantêm com um crescimento muito inferior. Já no AODV, os nós ocupam o meio com melhor distribuição, proporcionando que todos os nós possam enviar na rede uma quantidade de pacotes mais igualitária do que no DSDV, propiciando assim, uma rede mais confiável, pois se o nó 4 falhar, os demais não deixarão a rede tão ociosa. Tal situação deve-se ao fato de o AODV trabalhar com tabelas de roteamento, cujas rotas são previamente conhecidas, no ato do estabelecimento de todos os nós da rede facilitando, assim, o rápido encaminhamento dos pacotes, dos nós sensores até o coordenador da rede. No caso do DSDV, como ele trabalha com vetor de distância, a verificação do menor caminho é constante, gerando assim uma maior utilização do meio físico de comunicação, refletindo diretamente na latência da rede. O protocolo AODV consome maior energia do nó sensor para manter suas tabelas de roteamento em relação ao DSDV, porém, como no nosso cenário, existe disponibilidade de energia permanente fornecida aos nós sensores (rede elétrica), a preocupação com o consumo energético deixa de ser uma preocupação.

Com relação ao Jitter, ambos os protocolos mostraram baixas taxas, o que caracteriza boa estabilidade de comunicação de ambos os protocolos, pois a baixa taxa de atraso no envio de pacotes sucessivos faz com que a comunicação na rede não se torne lenta para uma aplicação de tempo real. No gráfico do protocolo AODV pode se perceber que todos os nós mantêm uma média de 0,2s, com alguns picos durante o decorrer do tempo. Já no protocolo DSDV a média também se mantém em 0,2, porém sem ocorrência de picos durante o decorrer do tempo. Em resumo, tanto o AODV como o DSDV tem bom desempenho no cenário da comunicação simultânea.

Já no parâmetro da vazão dos protocolos, é possível notar que o protocolo AODV apresenta uma taxa de vazão bem superior a taxa apresentada no protocolo

DSDV, o que resulta em melhor desempenho por parte do AODV, pois com a vazão maior, em um determinado intervalo de tempo, mais pacotes estão sendo enviados. No gráfico do protocolo AODV, a vazão do nó 4 vai crescendo com o tempo, até uma hora que se estabiliza em 25 pacotes/s, enquanto no DSDV, o nó 4 consegue ter uma vazão média de apenas 5 a 6 pacotes/s sendo enviados na rede. Os demais nós no protocolo AODV também mostram crescimento variando sua vazão de 0 a 10 pacotes/s, enquanto no DSDV os demais nós se mantêm estáveis em uma média de apenas 0 a 1 pacotes/s. Com isso, o protocolo AODV demonstrou clara vantagem nas taxas de vazão dos pacotes enviados na rede. A explicação para tal fato é a mesma já citada na discussão da análise do total de pacotes enviados.

Para melhor avaliar o desempenho dos protocolos nos cenários de simulação implementados, a ferramenta TraceGraph dispõe de um quadro de estatísticas, onde é possível verificar o total de pacotes perdidos, através da diferença entre os pacotes enviados na rede e os pacotes recebidos. Com isso, foi possível montar a tabela 2 a seguir para comparar o desempenho dos protocolos com relação ao percentual de pacotes perdidos na rede.

**Tabela 2:** Total de Pacotes Enviados, Recebidos e Perdidos dos Protocolos de Roteamento AODV e DSDV no Cenário da Comunicação Simultânea

<b>Protocolos de Roteamento / Parâmetros de Simulação</b>	<b>Nº Pacotes Enviados</b>	<b>Nº Pacotes Recebidos</b>	<b>Pacotes Perdidos</b>
AODV	7249	2239	30,88%
DSDV	525	289	55,04%

De posse desses resultados é possível perceber que o percentual de pacotes perdidos é alto em ambos os protocolos, o que tornam sua utilização não recomendada para cenários semelhantes ao gerados por esta simulação, em comunicação simultânea dos nós sensores.

## 5.2 ANÁLISES DAS REDES PLANAS NA COMUNICAÇÃO INTERCALADA

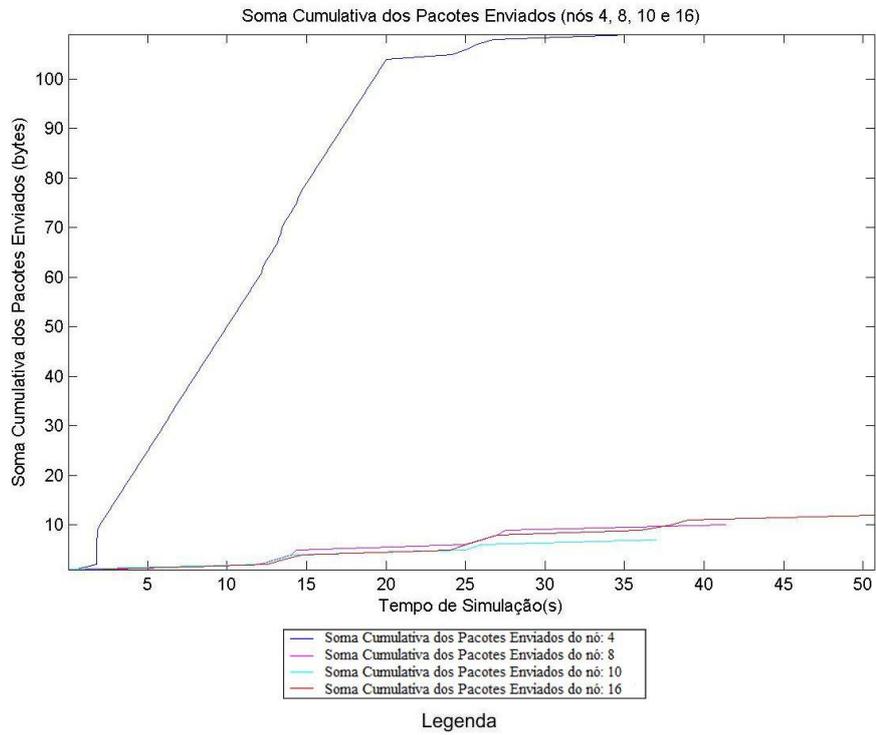
A seguir estão os resultados gráficos das comparações feitas realizando os testes com os dois Protocolos Planos implementados (AODV e DSDV), assim como na comunicação simultânea.

### 5.2.1 Total de Pacotes Enviados

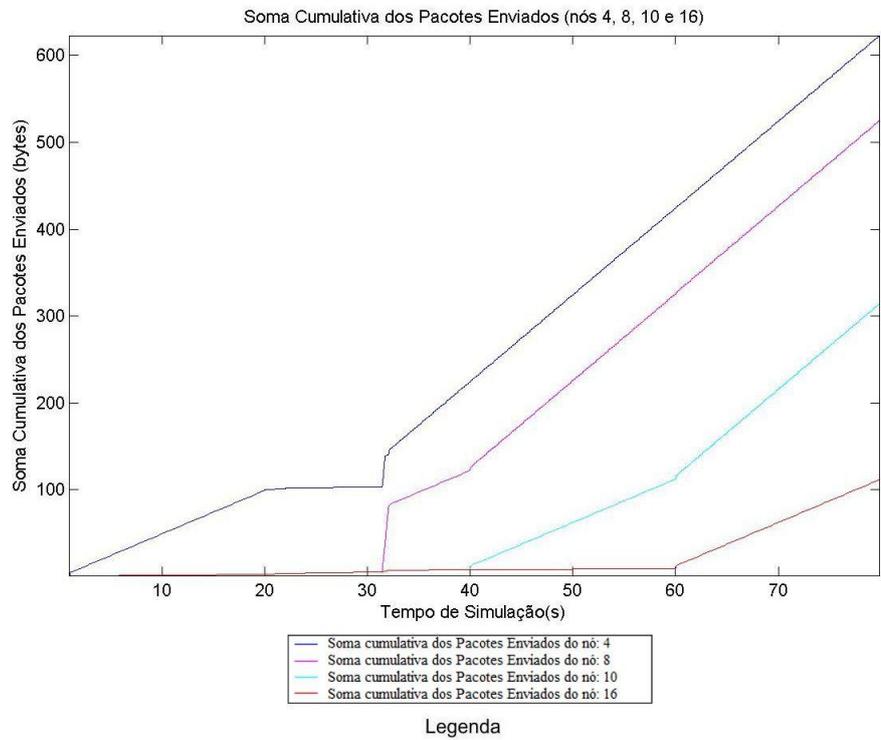
Na figura 22, está representado o gráfico do total de pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo AODV, onde se pode perceber que, assim como na comunicação simultânea, existe também uma tendência de crescimento, mostrando que o nó que inicia primeiro a comunicação, ou seja, o nó 4, envia uma quantidade de pacotes maior do que os próximos nós que iniciam sua comunicação. É perceptível que, em determinado instante o aumento do número de pacotes enviados passa a crescer linearmente.

A figura 23 ilustra o gráfico do total de pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo DSDV. Neste gráfico, os três nós sensores que se comunicaram posteriormente ao primeiro nó que iniciou a comunicação (4), assim como na comunicação simultânea, mantiveram um crescimento constante baixo e aproximadamente equivalente entre eles, porém significativamente inferior ao nó que iniciou primeiro sua comunicação e obteve logo o acesso ao meio, ou seja, o nó 4.

**Figura 22:** Total de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento AODV



**Figura 23:** Total de Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento DSDV

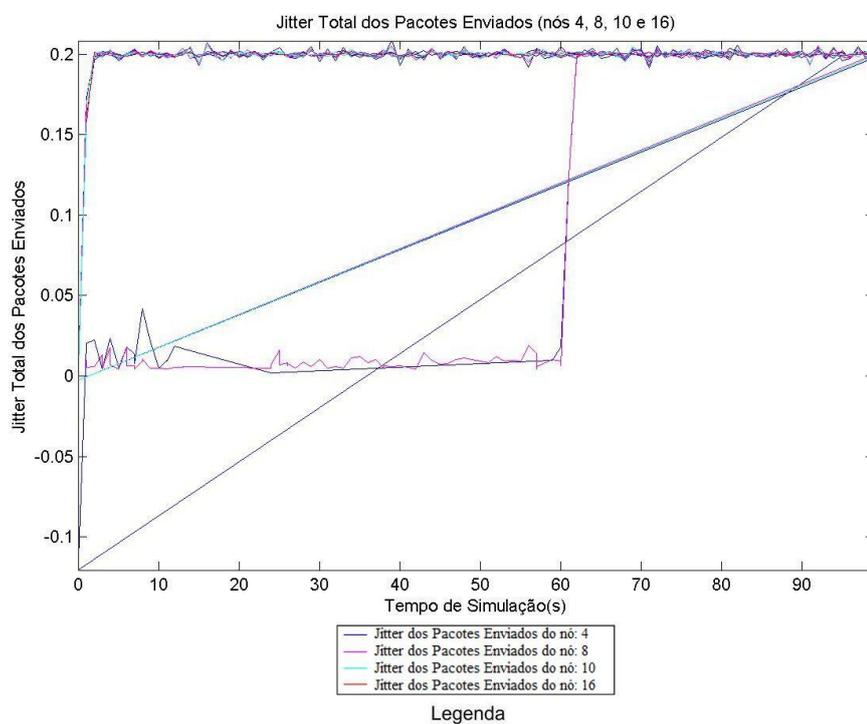


### 5.2.2 Jitter dos pacotes enviados

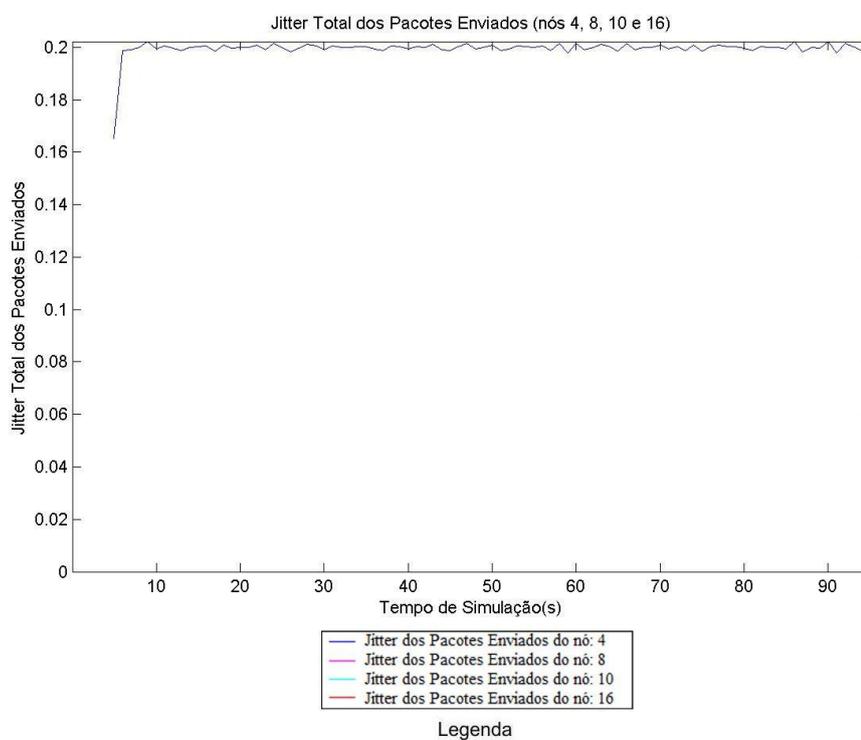
A figura 24 apresenta o gráfico do Jitter dos pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo AODV, onde o Jitter mantém uma taxa média muito baixa ou quase desprezível, chegando a ser representada por um valor negativo. No início com apenas o nó 4, dá para notar que o valor do Jitter fica praticamente zerado, e conforme os outros nós iniciam a comunicação e ocupam o meio, o Jitter vai aumentando até o valor máximo de 0,2s, que é considerado baixo, e como foi dito anteriormente é um valor satisfatório, pois quanto menor o Jitter, melhor é a comunicação.

Na figura 25, que representa o gráfico do Jitter dos pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo DSDV, nota-se que, assim como no gráfico do Jitter do DSDV na comunicação simultânea, a média constante de 0,2s também se mantém, porém apenas o nó 4 apresenta essa média, de forma que os demais nós tem o seu valor de Jitter zerado e, dessa forma, não aparecem no gráfico.

**Figura 24:** Jitter dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento AODV



**Figura 25:** Jitter dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento DSDV

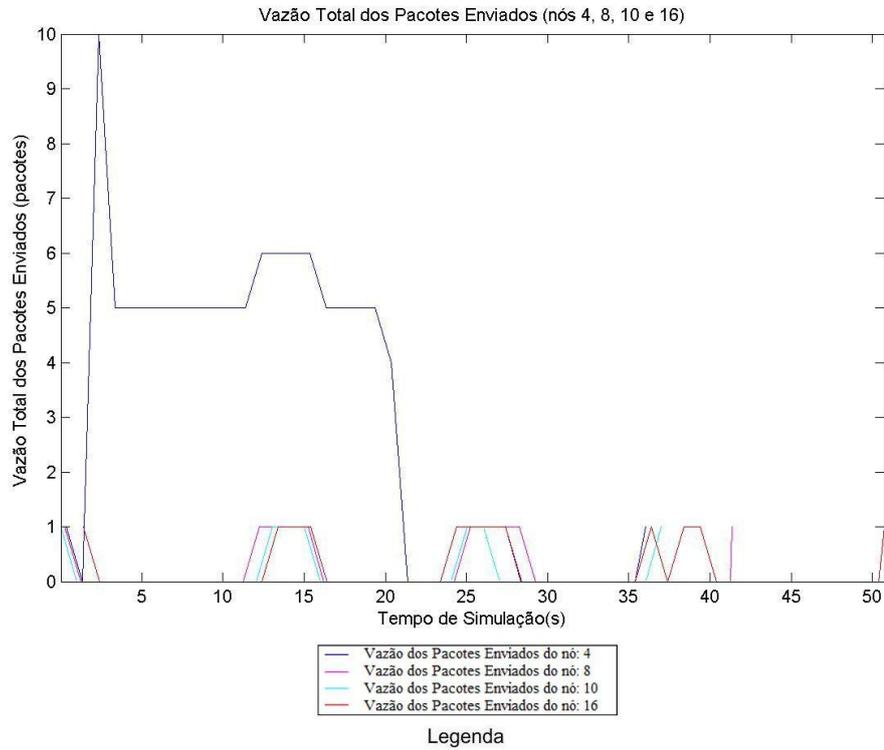


### 5.2.3 Vazão dos pacotes enviados

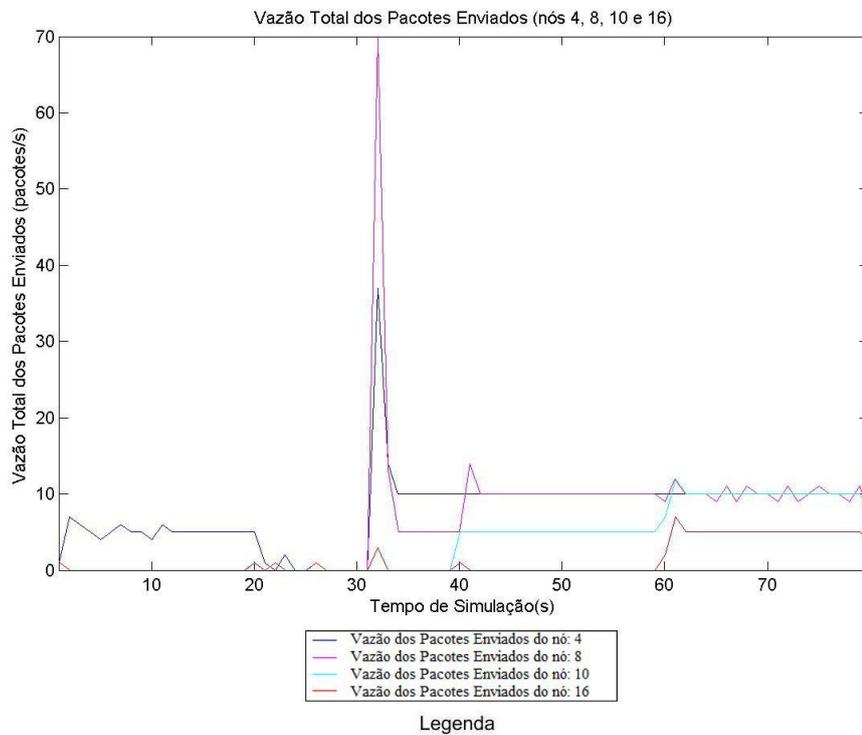
Na figura 26, está representado o gráfico da Vazão total dos pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo AODV, que apresenta uma situação onde se percebe que todos os nós mantêm uma média de vazão variando entre 0 a 10 pacotes/s, tendo um pico mais ou menos no instante  $t = 30$  segundos. Comparando com a comunicação simultânea, nesta comunicação mostrou uma vazão menor, atestando que naquele tipo de comunicação, a vazão dos pacotes enviados é maior, evidenciando o comportamento deste protocolo que, no caso da comunicação intercalada, necessita refazer as tabelas de roteamento e, assim, definir o melhor caminho a cada vez que é reiniciada a comunicação de cada nó, demorando um tempo maior que quando tais nós já se encontram em comunicação permanente.

A figura 27 apresenta o gráfico da Vazão total dos pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo DSDV, onde no início existe um pico elevado da vazão de pacotes do nó 4 (nó que inicia primeiro a comunicação), que é normal devido a tal nó ter acesso único e garantido ao meio, por ser o primeiro a comunicar. Após determinado período da simulação, é perceptível que a vazão cai drasticamente até chegar à zero. Dessa forma, apenas os demais nós seguem sua vazão, que se mantém constante variando de 0 a 1 pacotes/s, assim como na comunicação simultânea utilizando o mesmo protocolo (DSDV). Tal situação deve-se ao fato de ser feito o recálculo das melhores rotas a cada vez que cada nó volta a se comunicar, além da necessidade de se conseguir novo acesso ao meio para realizar a comunicação.

**Figura 26:** Vazão dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento AODV



**Figura 27:** Vazão dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento DSDV



Com a análise dos gráficos da comunicação intercalada em comparação aos parâmetros de simulação utilizados na comunicação simultânea e também às estatísticas de simulação obtidas através da ferramenta TraceGraph, foi possível concluir que, para a comunicação intercalada, o protocolo de roteamento DSDV gerou resultados gerais melhores do que o protocolo AODV.

No parâmetro do total de pacotes enviados, o protocolo DSDV mostrou um melhor percentual em relação ao protocolo AODV. Foi possível verificar, através dos gráficos que, no AODV, apenas o nó 4 mantém um crescimento elevado no envio dos pacotes, enquanto os demais nós (8, 10 e 16) se mantêm com um crescimento muito abaixo do crescimento do nó 4. Já no DSDV, os nós ocupam o meio com uma distribuição menos desigual, fazendo com que todos os nós possam enviar na rede uma quantidade de pacotes mais igualitária do que no AODV, propiciando assim, mais confiabilidade na comunicação. Isso mostra que, no caso do AODV, faz-se necessário estabelecer nova tabela de roteamento a cada reinício da comunicação, o que não ocorre com o DSDV, que trabalha com a descoberta da melhor rota pelo vetor de distância entre os nós.

Nos gráficos do Jitter, ambos os protocolos apresentaram baixas taxas, assim como verificado na comunicação simultânea. No gráfico do AODV a taxa se mantém muito baixa ou quase desprezível, sendo representada por um valor negativo no início da simulação. Conforme os outros nós iniciam a comunicação e ocupam o meio o Jitter aumenta para 0,2s, atingindo seu valor máximo. No protocolo DSDV, a média também se mantém em 0,2s. Em resumo, ambos os protocolos mantiveram suas taxas de Jitter baixas, mostrando que tanto o AODV como o DSDV tem bom desempenho no cenário da comunicação intercalada em relação ao Jitter.

Já nos gráficos do parâmetro de simulação da vazão, é possível notar que o protocolo DSDV apresenta uma taxa de vazão bastante superior à taxa do protocolo AODV, o que significa que o desempenho por parte do protocolo DSDV é melhor, pois, com uma maior vazão, mais pacotes são enviados na rede. O gráfico do protocolo DSDV, mostra que a vazão varia de 0 a 10 pacotes/s em todos os nós, enquanto no AODV, a variação é de 0 a 1 pacotes/s. No AODV, o nó 4 mantém uma vazão média de 5 a 6 pacotes/s até o instante  $t = 20$  segundos e, após isso, decresce sua vazão até chegar em zero. Em resumo, o protocolo DSDV demonstrou

maiores taxas de vazão, sendo melhor para o cenário. O motivo de tal fato é o mesmo já explicado na análise comparativa dos pacotes enviados/nó sensor.

Assim como na comunicação simultânea, para avaliar melhor o desempenho dos protocolos no cenário de simulação intercalado, através do quadro de estatísticas, foi possível montar uma outra tabela comparativa para ilustrar o desempenho dos dois protocolos, baseados no percentual de pacotes perdidos na rede. A tabela 3 é apresentada a seguir:

**Tabela 3:** Total de Pacotes Enviados, Recebidos e Perdidos dos Protocolos de Roteamento AODV e DSDV no Cenário da Comunicação Intercalada

<b>Protocolos de Roteamento / Parâmetros de Simulação</b>	<b>Nº Pacotes Enviados</b>	<b>Nº Pacotes Recebidos</b>	<b>Pacotes Perdidos</b>
AODV	2817	1372	48,70%
DSDV	5807	1954	33,64%

É possível perceber que o percentual de pacotes perdidos continua alto em ambos os protocolos, tornando sua implementação desaconselhada para cenários similares ao exposto neste trabalho.

### 5.3 ANÁLISES DA REDE HIERÁRQUICA NA COMUNICAÇÃO SIMULTÂNEA

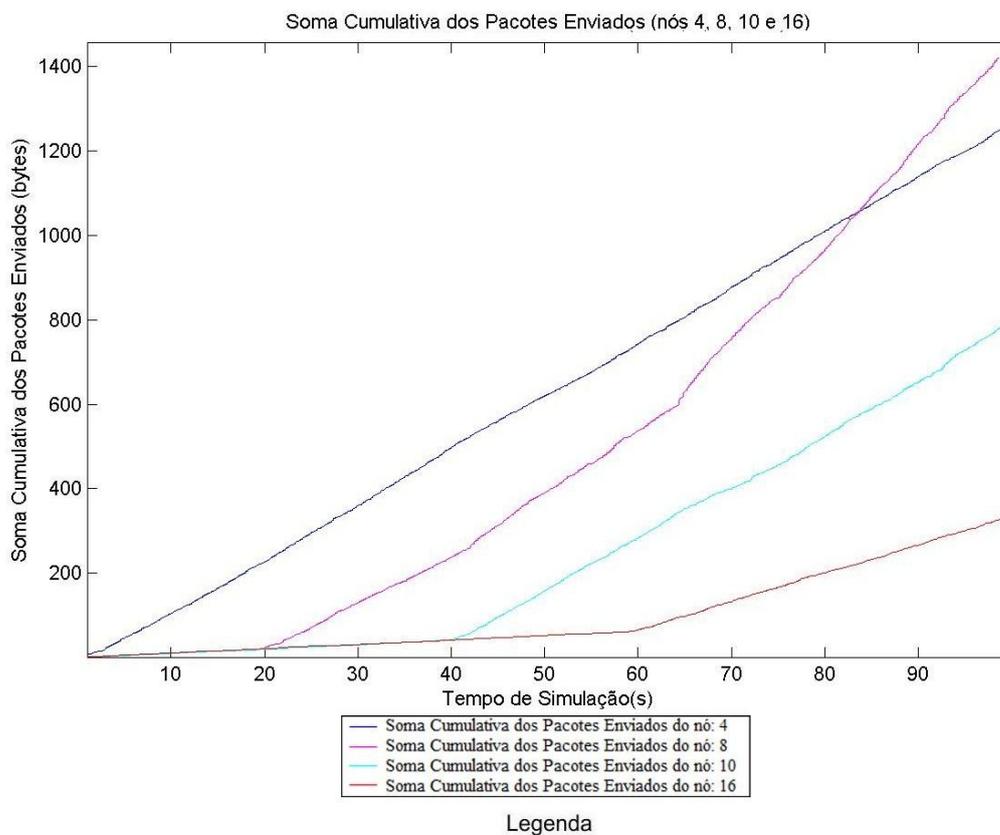
A seguir são apresentados os resultados dos gráficos e das comparações que foram feitas perante os testes realizados utilizando o Protocolo Hierárquico LEACH.

#### 5.3.1 Total de pacotes enviados

Na figura 28, que representa o gráfico do total de pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo LEACH, é possível analisar que existe um bom crescimento (relacionado aos 4 nós) do número de pacotes enviados, atestando o bom comportamento da RSSF sob este protocolo. Isto se explica pelo motivo da não sobrecarga de informações sendo simultaneamente enviadas ao nó central (coordenador). Ao invés disso, os 4 *clusters*, distribuem a responsabilidade

para os subcoordenadores de cada *cluster*, onde tais nós repassam a comunicação realizada pelos nós sensores do seu *cluster* ao coordenador. Nas linhas que representam os nós, percebe-se que, em um determinado instante da simulação, o nó 8 ultrapassa o nó 4, atestando a eficiência da rede hierárquica em comparação à plana, em cenários deste tipo.

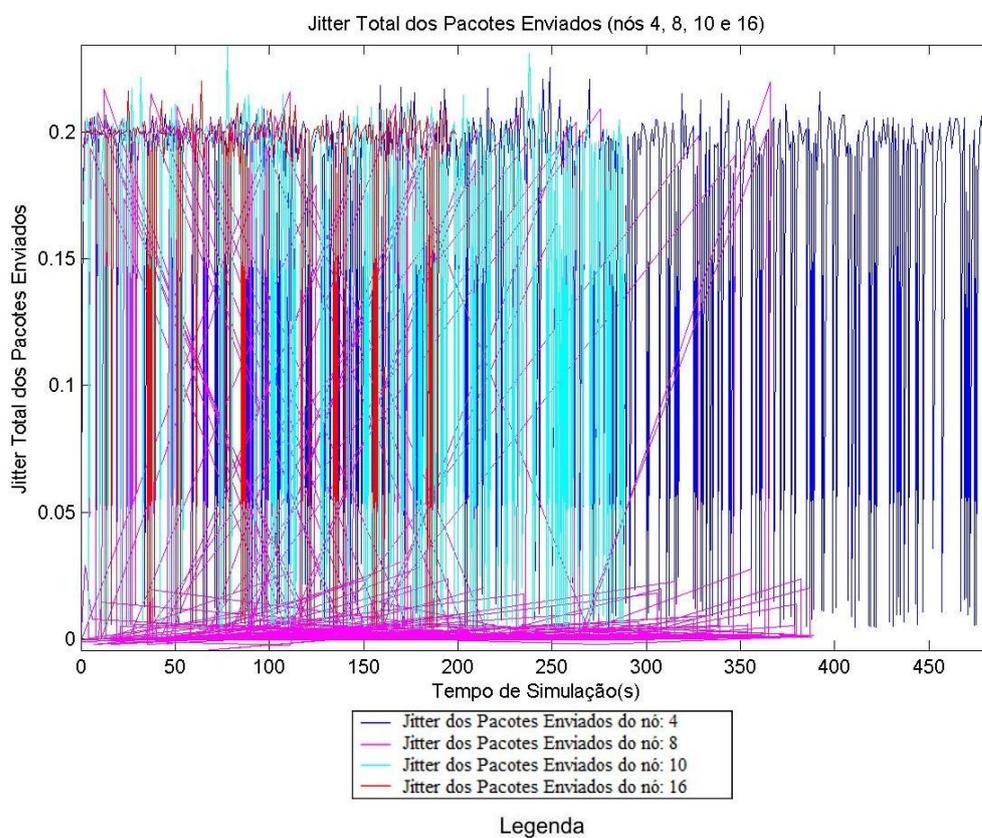
**Figura 28:** Total dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento LEACH



### 5.3.2 Jitter dos pacotes enviados

A figura 29 apresenta o gráfico do Jitter dos pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo LEACH, onde o Jitter mantém uma taxa média muito baixa em torno de 0,2s. Como foi dito anteriormente, a taxa de 0,2s é considerada como um valor satisfatório, pois um Jitter baixo é sinal de uma boa estabilidade na comunicação.

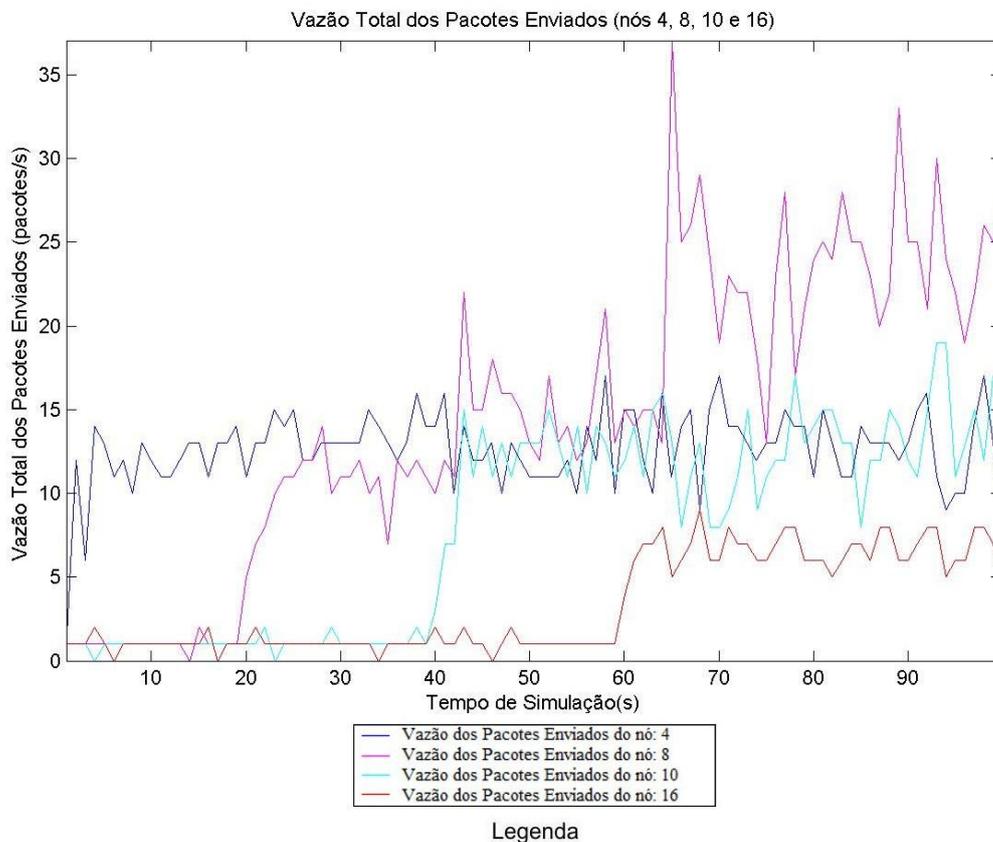
**Figura 29:** Jitter dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento LEACH



### 5.3.3 Vazão dos pacotes enviados

Na figura 30, apresenta-se o gráfico da Vazão total dos pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo LEACH, ao qual ilustra uma situação onde o nó 8 tem uma vazão maior que os demais nós, mostrando um crescimento de 0 a 30 pacotes/s. Já o nó 4, que nas redes planas se mostrou como o “privilegiado”, apresentou uma vazão inferior, com média de 10 pacotes/s. Isso pode indicar que, apesar da comunicação do subcoordenador do *cluster* onde o nó 4 se encontra ter ocorrido antes do subcoordenador do *cluster* do nó 8, o nó 4 demorou mais tempo a enviar informação ao seu subcoordenador em comparação à mesma situação vivenciada pelo 8. Os demais nós também mostraram bom crescimento, variando de 0 a 10 pacotes/s no nó 10, e 0 a 5 pacotes/s no nó 16. Porém, todos os nós mostraram crescimento na vazão dos pacotes enviados, em comparação ao mesmo cenário de comunicação na rede plana.

**Figura 30:** Vazão dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento LEACH



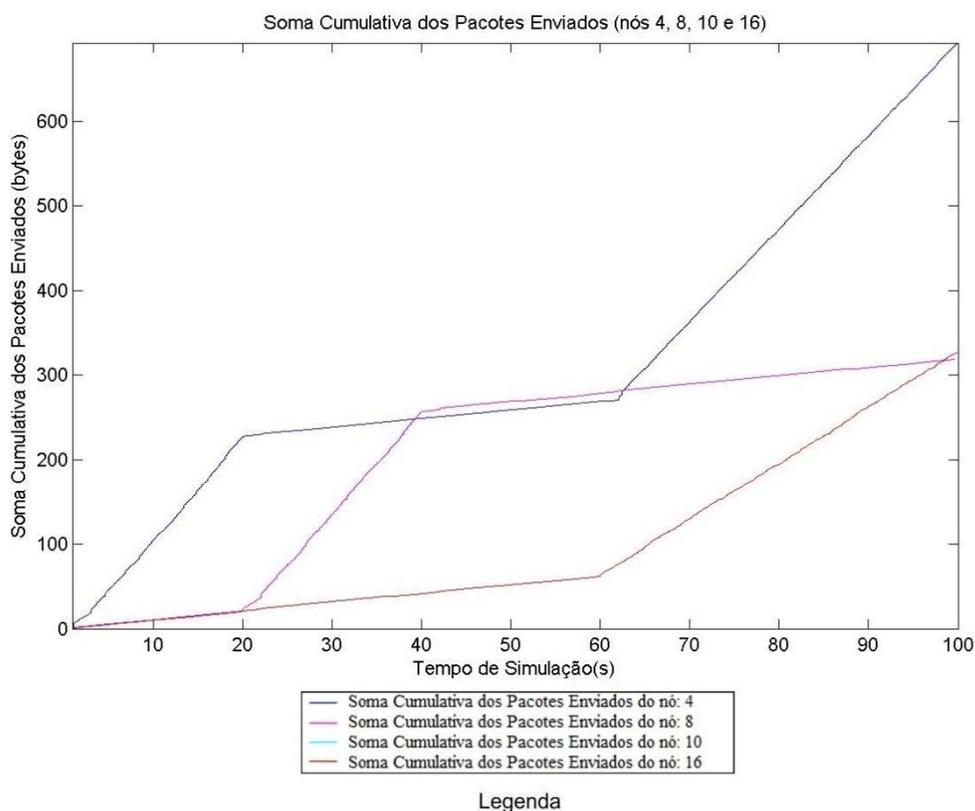
## 5.4 ANÁLISES DA REDE HIERÁRQUICA NA COMUNICAÇÃO INTERCALADA

Neste tópico, estão apresentados graficamente os resultados das comparações realizadas nos testes com o Protocolo Hierárquico LEACH, implementado no cenário da comunicação intercalada. Posteriormente aos gráficos e comentários, uma comparação foi feita para saber qual o cenário em que o Protocolo LEACH se adéqua melhor, levando em conta a comunicação simultânea ou a comunicação intercalada.

### 5.4.1 Total de pacotes enviados

Na figura 31, que representa o gráfico do total de pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo LEACH, a análise mostra que existe um crescimento periódico do total de pacotes enviados na rede onde, em determinados intervalos, a quantidade de pacotes enviados cresce substancialmente para, depois, se estabilizar mais até crescer novamente. Esse tempo de estabilização ocorre justamente na parada da comunicação de cada nó. A linha do nó 4 exemplifica bem isto, onde percebe-se que, do instante  $t$  de 0 a 20 segundos, há um crescimento alto e, em  $t$ , de 20 a 40 segundos, ela se mantém praticamente estabilizada. O nó 10 repercute sua comunicação até o coordenador no tempo de simulação realizado, indicando uma provável latência maior na comunicação intercalada em comparação à mesma situação quando da comunicação simultânea.

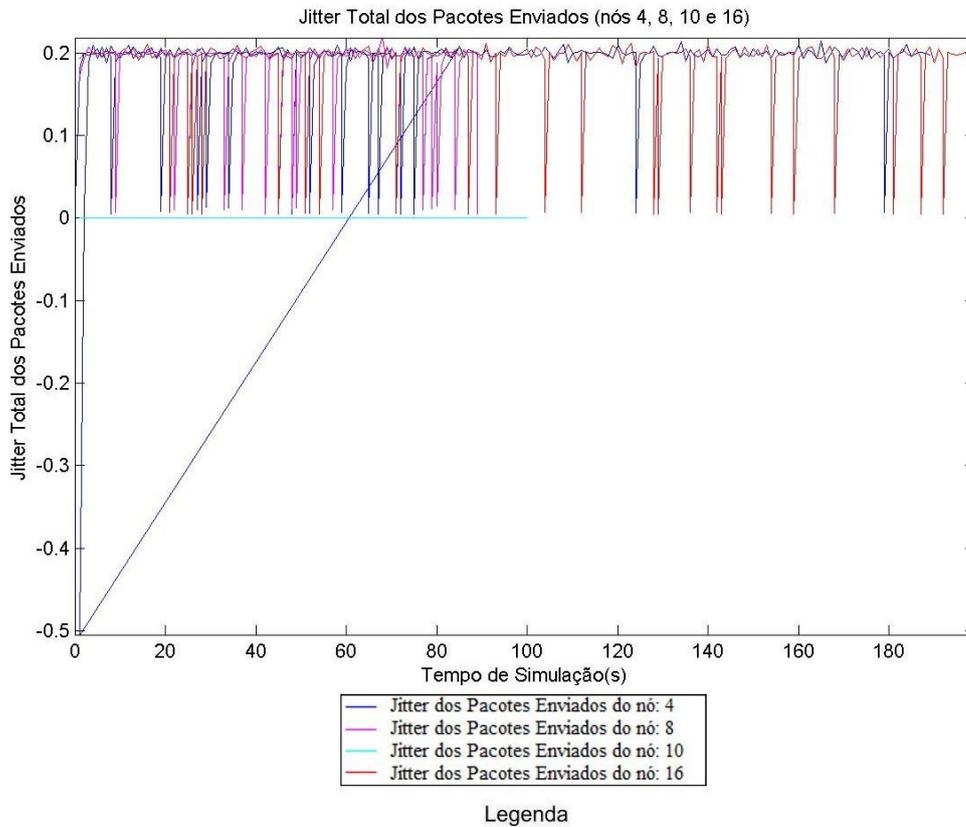
**Figura 31:** Total dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento LEACH



#### 5.4.2 Jitter dos pacotes enviados

A figura 32 apresenta o gráfico do Jitter dos pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo LEACH onde, assim como nos protocolos e cenários anteriores, o Jitter mantém uma taxa média em torno de 0,2s.

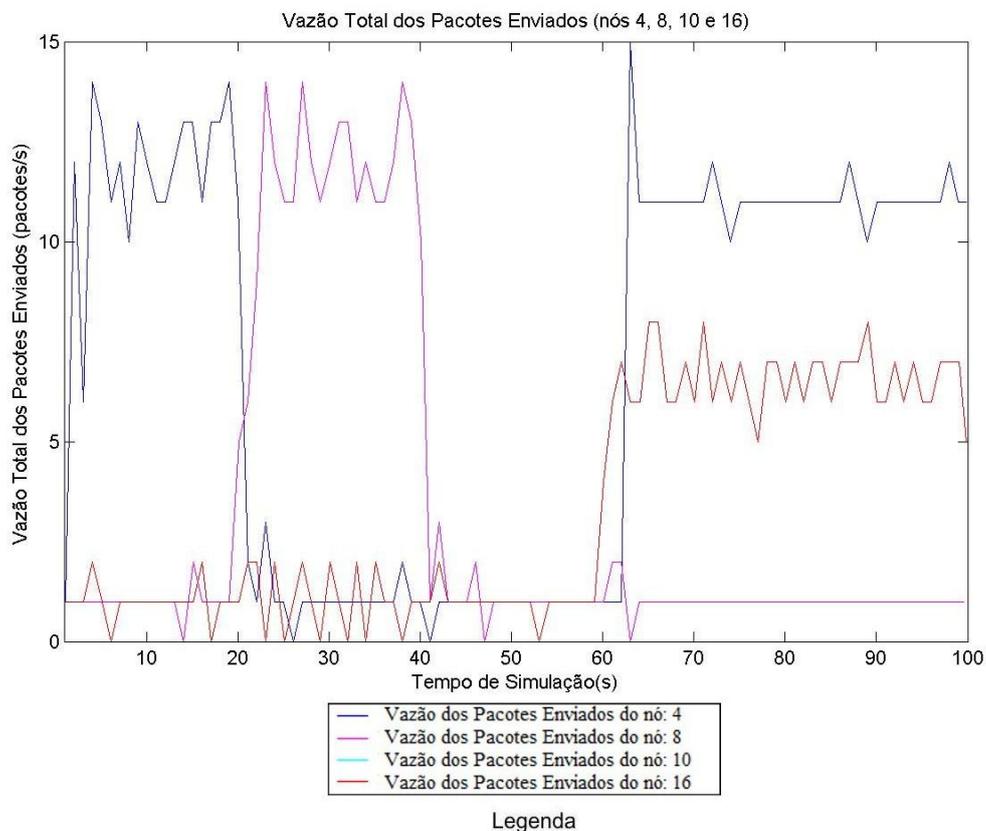
**Figura 32:** Jitter dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento LEACH



### 5.4.3 Vazão dos pacotes enviados

Na figura 33, o gráfico da Vazão total dos pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo LEACH, mostra que a taxa de vazão dos pacotes enviados na rede pelos nós mantém uma média de 0 a 15 pacotes/s, apresentando picos na comunicação constantemente. Estes picos são normais devido ao fato da comunicação ser intercalada, de modo que sempre que um nó que pára a comunicação tem a mesma reiniciada, ocorrem estes picos, os quais podem ser interpretados como o nó “informando” que está iniciando sua comunicação novamente.

**Figura 33:** Vazão dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento LEACH



No parâmetro do total de pacotes enviados, o protocolo LEACH mostrou melhores resultados no cenário da comunicação simultânea, onde se pôde perceber que na comparação dos dois gráficos (um de cada cenário), o gráfico da comunicação simultânea mostrou que, no mesmo instante de tempo, o Protocolo LEACH permitiu que fossem enviados mais pacotes na simulação da rede com a comunicação simultânea. No instante de  $t = 80$  segundos, por exemplo, é possível perceber que são enviados pelos 4 nós, aproximadamente 2.600 pacotes na rede, ou seja, um média de 650 pacotes enviados por cada nó. Já na comunicação intercaldada, no mesmo instante ( $t = 80$  segundos), é possível perceber que aproximadamente 1.000 pacotes são enviados na rede, o que gera uma média de apenas 250 pacotes por nó, valor bem inferior à média da comunicação simultânea. Outra característica notável é a ausência de comunicação de um dos nós no cenário intercaldado, onde nota-se que o nó 10 não aparece devido ao fato de seu gráfico gerado ter obtido um total de 0 pacotes enviados.

Com relação ao Jitter, em ambos os cenários o Protocolo LEACH apresentou baixas taxas, tanto na comunicação simultânea quanto na comunicação intercalada. No geral, o Jitter não teve uma influência significativa para a escolha do cenário em que o protocolo LEACH gera os melhores resultados, pois, como nos gráficos, as taxas são muito semelhantes e, em alguns instantes, até mesmo desprezíveis.

Já nos gráficos da vazão, é possível verificar que, ao comparar o desempenho do protocolo nos dois cenários, o melhor resultado para esta taxa foi o encontrado na simulação com o cenário da comunicação simultânea. Naquele gráfico, a média de vazão dos pacotes se mantém entre 10 a 25 pacotes/s na maior parte do tempo. Já na comunicação intercalada a média cai para 0 a 15 pacotes/s.

A tabela 4 a seguir foi feita para avaliar melhor o desempenho do protocolo nos cenários de comunicação, onde, através do quadro de estatísticas, foi possível verificar os dados dos pacotes enviados menos os pacotes recebidos e, através dessa diferença, calcular o percentual de pacotes perdidos na rede, e analisar qual o cenário que o LEACH tem melhor resultado.

**Tabela 4:** Total de Pacotes Enviados, Recebidos e Perdidos do Protocolo de Roteamento Hierárquico LEACH nos dois Cenários de Comunicação Implementados

<b>Cenário de comunicação / Parâmetros de Simulação</b>	<b>Nº Pacotes Enviados</b>	<b>Nº Pacotes Recebidos</b>	<b>Pacotes Perdidos</b>
Comunicação Simultânea	4223	781	18,49%
Comunicação Intercalada	2356	524	22,24%

Nota-se que o percentual de pacotes perdidos é sensivelmente melhor na rede hierárquica em comparação à rede plana. Em RSSF cujas topologias se encontrem configuradas em grandes áreas e com uma grande quantidade de sensores é esperada uma perda máxima de 20% de pacotes enviados. A diferença entre a comunicação simultânea e a intercalada no cenário hierárquico é muito pequena. O motivo de a configuração simultânea ser melhor deve-se ao fato da não sobrecarga do coordenador desta rede, já mencionada anteriormente e que, em constante comunicação, não se faz necessário um rearranjo desta rede, como

ocorre com as redes planas. A comunicação intercalada, por outro lado, implica numa latência maior, visto que, a cada nova comunicação realizada por um nó, o mesmo terá de solicitar sua permissão para envio ao *cluster* correspondente.

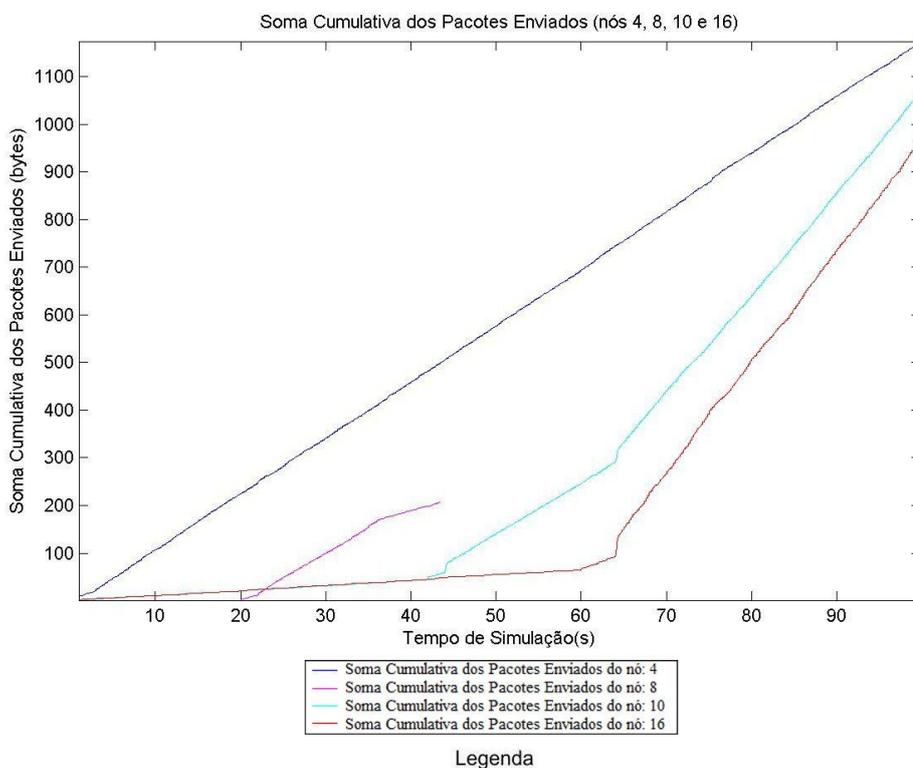
## 5.5 ANÁLISES DA REDE HÍBRIDA NA COMUNICAÇÃO SIMULTÂNEA

Neste tópico são apresentados os resultados gráficos das simulações que foram feitas perante os testes realizados utilizando o Protocolo Híbrido ZIGBEE.

### 5.5.1 Total de pacotes enviados

A figura 34 representa o gráfico do total de pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo ZIGBEE, onde é possível analisar que existe um crescimento constante do nó 4 durante todo o tempo de simulação, e que os demais nós mantêm um crescimento acentuado. O nó 8 parece perder a comunicação no instante  $t = 45s$ , indicando uma falha que pode ser atribuída a uma possível reconfiguração de tal nó no *cluster* ao qual ele está vinculado.

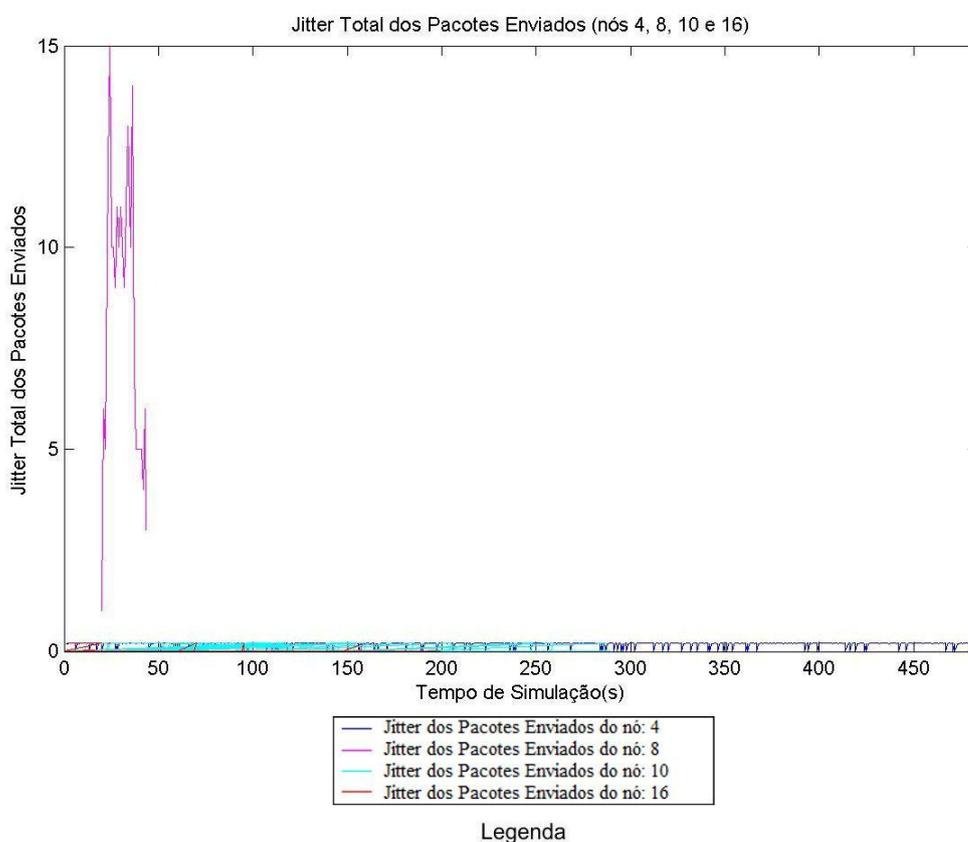
**Figura 34:** Total dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE



### 5.5.2 Jitter dos pacotes enviados

Na figura 35, está apresentado o gráfico do Jitter dos pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo ZIGBEE, onde se pode notar que o Jitter mantém uma taxa muito baixa em torno de 0,2s, com exceção do nó 8, que mantém uma taxa de Jitter variando de 0s a 15s nos primeiros segundos da simulação, indicando o mesmo motivo comentado no subitem anterior.

**Figura 35:** Jitter dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE

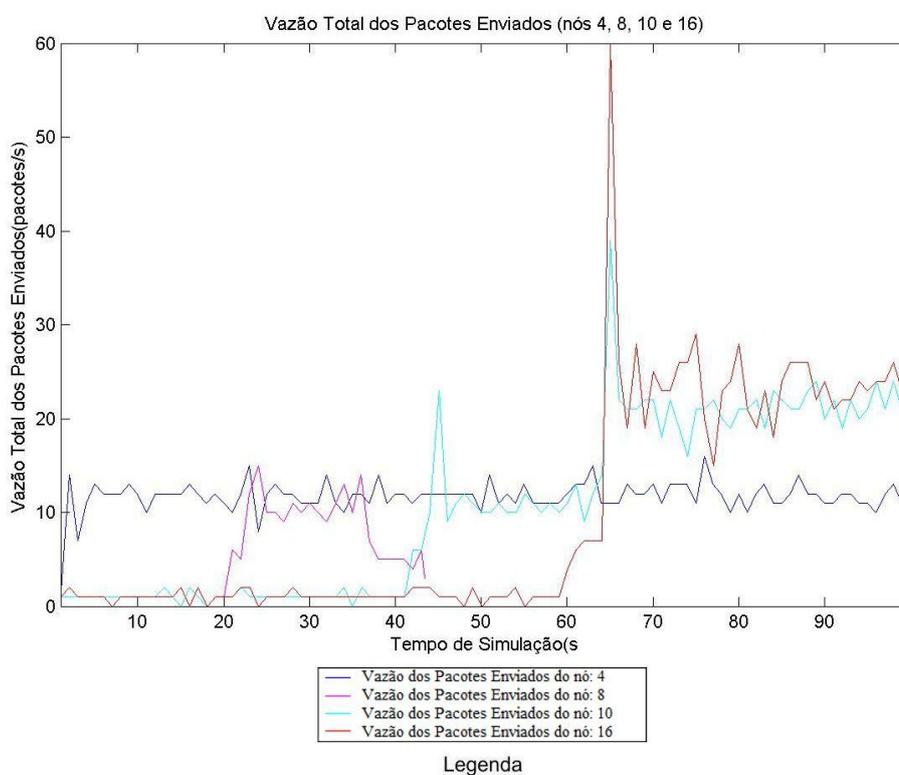


### 5.5.3 Vazão dos pacotes enviados

A figura 30 representa o gráfico da Vazão total dos pacotes enviados no cenário da comunicação simultânea utilizando o protocolo ZIGBEE, onde o nó 4 mantém uma média de vazão de 10 pacotes/s, o nó 8 varia de 10 a 20 pacotes/s durante 20 segundos de simulação e depois parece perder a comunicação, cujo motivo foi anteriormente explicado. Já o nó 10 mantém um crescimento significativo

a partir dos 40 segundos, mantendo uma média de 10 a 20 pacotes/s. O nó 16, assim como o nó 10 também mantém uma constante de crescimento, tendo sua vazão aumentada significativamente a partir dos 60 segundos em diante, ou seja, todos os nós demonstraram crescimento na vazão dos pacotes enviados, com exceção do nó 8, que perde sua comunicação a partir dos 40 segundos iniciais da simulação.

**Figura 36:** Vazão dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Simultânea utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE



## 5.6 ANÁLISES DA REDE HÍBRIDA NA COMUNICAÇÃO INTERCALADA

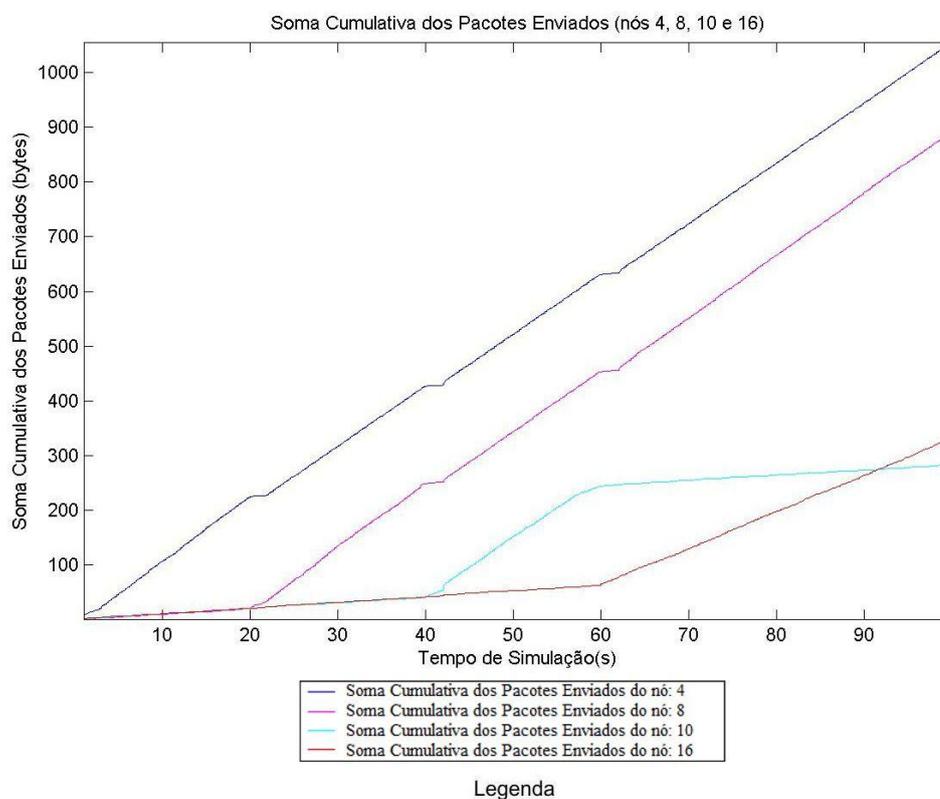
Neste tópico, estão apresentados os gráficos resultantes das comparações realizadas nos testes com o Protocolo Híbrido ZIGBEE, implementado no cenário da comunicação intercalada. Os parâmetros para comparação são os mesmos das outras simulações: Total de Pacotes Enviados, Jitter e Vazão. Por fim, uma

comparação feita para saber qual o cenário que o Protocolo ZIGBEE tem melhores resultados.

### 5.6.1 Total de pacotes enviados

Na figura 37, que representa o gráfico do total de pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo ZIGBEE, a análise mostra que existe um crescimento em todos os nós da rede. O nó 4 mantém um crescimento constante e quase linear durante toda a simulação. Assim como o nó 4, o nó 8 tem sua linha de crescimento praticamente igual ao nó 4, mantendo a mesma crescente porém com um número menor de pacotes enviados no mesmo intervalo de tempo em relação ao nó 4. O nó 10 mantém sempre um crescimento, porém diferente do nó 16, ele primeiro cresce, depois se estabiliza, enquanto o nó 16 mantém um crescimento estabilizado no início, pra depois crescer com mais intensidade.

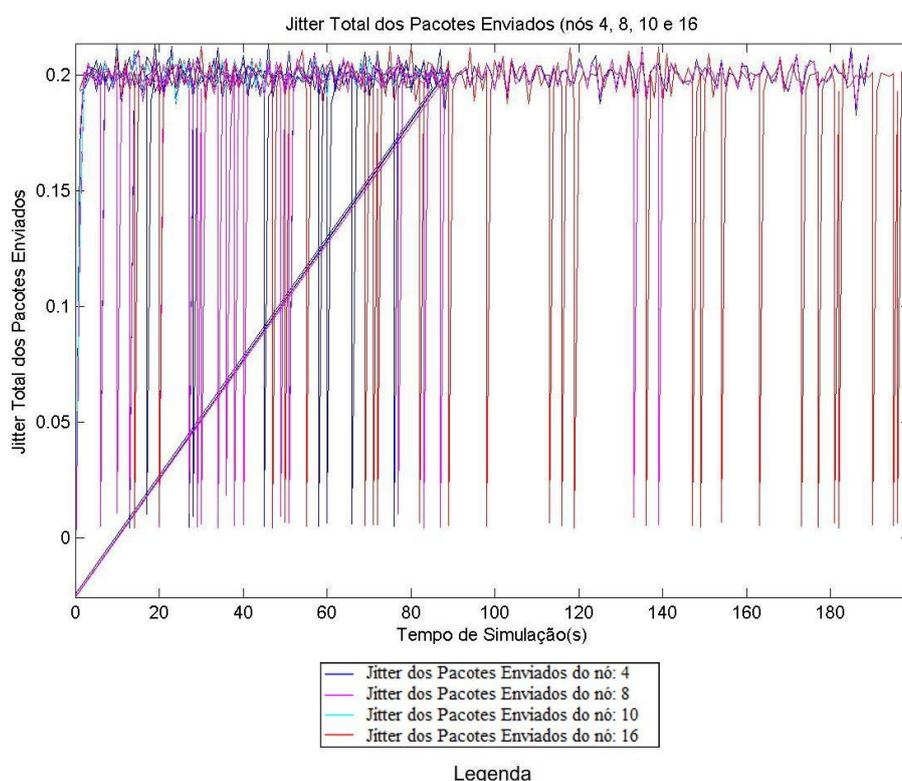
**Figura 37:** Total dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE



### 5.6.2 Jitter dos pacotes enviados

Na figura 38 está representado o gráfico do Jitter dos pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo ZIGBEE. Neste gráfico é perceptível que, assim como nos outros, o Jitter se mantém com uma taxa média variando sempre de 0s a 0,2s. No início da simulação, o nó 4 chega e ter valores abaixo de 0, que significa que, devido a taxa ser muito baixa, torna-se praticamente desprezível, chegando a ser representada por um valor negativo.

**Figura 38:** Jitter Total dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE

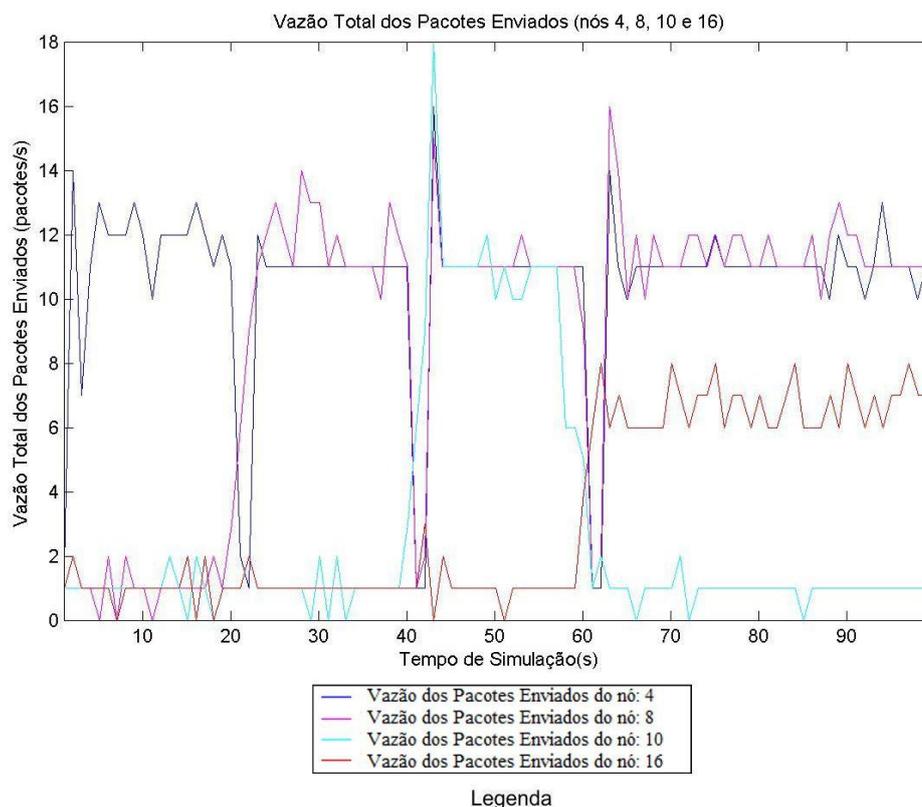


### 5.6.3 Vazão dos pacotes enviados

A figura 39 mostra o gráfico da Vazão total dos pacotes enviados no cenário da comunicação intercalada utilizando o protocolo ZIGBEE, mostra que a taxa de vazão dos pacotes enviados mantém uma média de 0 a 15 pacotes/s, apresentando alguns picos na comunicação constantemente. Estes picos são normais, pois, na comunicação intercalada, sempre que um nó reinicia a comunicação ocorrem estes

picos, que podem ser interpretados como o nó “informando” que está iniciando sua comunicação novamente.

**Figura 39:** Vazão Total dos Pacotes Enviados no Cenário da Comunicação Intercalada utilizando o Protocolo de roteamento ZIGBEE



Através da análise feita sobre os gráficos do protocolo Híbrido ZIGBEE na comunicação simultânea e na comunicação intercalada, foi possível notar, baseado nos gráficos dos três parâmetros de simulação e nas estatísticas de simulação obtidas pelo TraceGraph, que o Protocolo de Roteamento Híbrido ZIGBEE gerou resultados mais favoráveis ao cenário da comunicação intercalada.

Com relação ao total de pacotes enviados, o ZIGBEE apresentou melhores resultados na comunicação intercalada, onde é perceptível que, comparando os gráficos de cada cenário, o da comunicação intercalada mostrou mais coerência no crescimento do número de pacotes enviados no decorrer da simulação. Ambos os 4 nós tiveram bom crescimento, baseado nos períodos intercalados em que cada nó inicia e finaliza sua comunicação, ou seja, sempre que um nó pára, o nó que o sucede, inicia o envio de pacotes com mais intensidade, pois tem acesso exclusivo

ao meio, enquanto na comunicação simultânea, existe uma perda de comunicação de um dos nós, deixando uma comunicação de apenas três dos quatro nós.

No Jitter, o cenário da comunicação simultânea apresenta desvantagem também em um dos nós em relação ao cenário da comunicação intercalada. O nó 8 apresenta uma alta taxa de Jitter variando de 0s a 15s nos primeiros instantes da comunicação, enquanto os demais nós mantêm uma taxa baixa de Jitter de aproximadamente 0s. Na comunicação intercalada, a taxa do Jitter se mantém baixa em todos os nós durante a simulação, variando de 0s a 0,2s. Portanto, devido a aparente falha de comunicação do nó 8, tanto nos pacotes enviados, quanto no Jitter, a comunicação intercalada apresentou melhores resultados que a simultânea.

Nos gráficos da vazão, é possível verificar um equilíbrio entre os gráficos de cada cenário onde, em determinados momentos, a vazão se mostra melhor na comunicação simultânea e, em outros instantes, na comunicação intercalada. Em ambos os cenários, a média de vazão dos pacotes enviados na rede gira em torno de 15 pacotes/s. Portanto, neste parâmetro, não foi possível notar tanta diferença.

A tabela 5 a seguir, assim como nas outras comparações, foi feita uma tabela para avaliar melhor o desempenho do protocolo nos cenários de comunicação, onde foi verificado pela diferença entre pacotes enviados e os pacotes recebidos, que o percentual de pacotes perdidos utilizando o ZIGBEE, foi menor na comunicação intercalada.

**Tabela 5:** Total de Pacotes Enviados, Recebidos e Perdidos do Protocolo de Roteamento Híbrido ZIGBEE nos dois Cenários de Comunicação Implementados

<b>Cenário de comunicação / Parâmetros de Simulação</b>	<b>Nº Pacotes Enviados</b>	<b>Nº Pacotes Recebidos</b>	<b>Pacotes Perdidos</b>
Comunicação Simultânea	10020	1380	13,77%
Comunicação Intercalada	14356	1347	09,38%

Com os resultados acima expostos, percebe-se que a comunicação intercalada foi sensivelmente melhor do que a simultânea. Como a característica do protocolo de roteamento e comunicação ZIGBEE é a de se moldar diante do cenário

e do tipo de comunicação ao qual ele esteja submetido, o mesmo apresenta vantagens em relação a todos os demais protocolos de roteamento. Uma ressalva, porém, deve ser colocada, que é a sua complexidade se comparado aos demais protocolos de comunicação, o que implica em uma maior quantidade de memória e de recursos energéticos e de processamento dos nós sensores, tornando a sua utilização por vezes mais custosa em cenários mais simples, o que não é o caso de cenários que possuam semelhanças ao aqui simulado.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho, consistiu em implementar cenários e os principais protocolos de roteamento utilizados em RSSF, através de ambiente simulado, com o intuito de realizar análises comparativas de qual destes protocolos se adéqua melhor a determinados cenários, que se assemelham ao aplicado na Refinaria de Petróleo e Gás Natural de Capuava/SP. Estas comparações foram feitas através da análise de gráficos e dados estatísticos, obtidos por ferramentas que simulam RSSF, com base em alguns parâmetros de QoS citados no decorrer deste trabalho.

As análises e comparações dos protocolos de roteamento foram feitas, separando os protocolos em seus respectivos tipos de rede da seguinte forma: os protocolos de roteamento das Redes Planas (AODV e DSDV) foram comparados um com o outro em cada um dos dois cenários implementados, ou seja, o cenário da comunicação simultânea e da comunicação intercalada; o protocolo de roteamento da Rede Hierárquica (LEACH) teve sua comparação feita sob o critério de escolha de qual o melhor cenário de comunicação tal protocolo apresentava resultados mais satisfatórios; assim como o protocolo hierárquico implementado, o protocolo de roteamento da Rede Híbrida (ZIGBEE) também foi comparado, levando-se em consideração os dois cenários de comunicação.

Para fazer as comparações e definições de qual protocolo melhor se comportou em cada cenário de comunicação, foram levados como critérios de escolhas, alguns parâmetros de QoS para a elaboração dos gráficos: o total de pacotes enviados, jitter e vazão. Além destes três parâmetros, o percentual de pacotes perdidos também foi levado em consideração. Diferente dos outros três parâmetros anteriormente citados, os resultados deste foi obtido através da captura dos dados estatísticos da rede, que foram obtidos através da ferramenta TraceGraph, ao qual também foi responsável pela geração dos gráficos.

Ao realizar as análises de todos os gráficos das simulações, foi possível perceber que, dentre os Protocolos Planos implementados, o protocolo AODV se comportou melhor no cenário da comunicação simultânea, enquanto o protocolo DSDV obteve melhores resultados no cenário da comunicação intercalada. O Protocolo Hierárquico LEACH teve resultados melhores no cenário da comunicação simultânea, enquanto o Protocolo Híbrido ZIGBEE teve resultados mais satisfatórios no cenário da comunicação intercalada. Na análise comparativa dos protocolos em

relação aos dados estatísticos, também foi perceptível que os resultados do percentual dos pacotes perdidos foram compatíveis com os resultados dos gráficos das simulações. A tabela 6 mostra os resultados do percentual de pacotes perdidos de cada protocolo em cada um dos cenários de simulação implementados.

**Tabela 6:** Percentual dos Pacotes Perdidos nos Testes dos Protocolos de Roteamento implementados nos Cenários de Simulações

<b>Protocolos - Cenários</b>	<b>% Pacotes Perdidos</b>	<b>Tipo de Rede</b>
AODV – SIMULTANEA	30,88%	PLANA
AODV – INTERCALADA	48,70%	PLANA
DSDV – SIMULTANEA	55,04%	PLANA
DSDV – INTERCALADA	33,64%	PLANA
LEACH – SIMULTANEA	18,49%	HIERÁRQUICA
LEACH – INTERCALADA	22,24%	HIERÁRQUICA
ZIGBEE – SIMULTANEA	13,77%	HÍBRIDA
ZIGBEE – INTERCALADA	09,38%	HÍBRIDA

Levando em consideração os dados da tabela 6, chegou-se a conclusão que o protocolo ZIGBEE (classificado como protocolo Híbrido), foi o que gerou melhores resultados em ambas os cenários de comunicação, tanto na rede simultânea, como na intercalada, obtendo as menores taxas de pacotes perdidos sendo que, na comunicação intercalada, seu desempenho foi um pouco melhor. Percebe-se, portanto que, em cenários cujo ambiente se assemelhe ao estudado neste trabalho, a indicação do protocolo ZIGBEE é, de longe, a melhor opção. Tal fator indica que a adaptabilidade deste protocolo às diversas configurações de redes industriais de topologia e características similares à estudada, visto tratar-se de um protocolo híbrido, explica o motivo do seu ótimo desempenho em todos os testes de QoS anteriormente expostos.

## REFERENCIAS

AKHONDI, M. R. et al. Applications of Wireless Sensor Networks in the Oil, Gas and Resources Industries. **Advanced Information Networking and Applications**, p. 8, 2010.

BARROSO, A.; ROEDING, U.; SREENAN, C. J. Maintenance Awareness in Wireless Sensor Networks. p. 4, 2004.

BURATTI, C. et al. An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. **Academic Journal**, v. 9, n. 9, p. 28, 2009.

CAMPOS, C. F. P. DE S. **Estudo e Especificação de um Sistema de Instrumentação para Unidades de Elevação de Petróleo Utilizando Tecnologia Sem Fio**. Dissertação—Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

CAVALCANTE, D. S. et al. Estudo de Válvulas de Segurança e/ou Alívio Utilizadas na Produção e Armazenamento de Petróleo e Gás Natural. **Semana Nacional de Ciência e Tecnologia do Instituto Federal de Sergipe**, p. 1, 2012.

CHEN, F. et al. Real-time Enabled IEEE 802.15.4 Sensor Networks in Industrial Automation. **Dept. of Computer Science, University of Erlangen**, p. 4, 2009.

COAN, W. S. **Roteamento em Redes de Sensores Sem Fio Baseado no Caminho Mais Forte em Energia**. Dissertação—Curitiba: Universidade Católica do Paraná, 2012.

FAÇANHA, T. DOS S. **REDE DE SENSORES SEM FIO: UMA ABORDAGEM PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS**. Monografia—Fortaleza: CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO CEARÁ, 2007.

FIGUEIREDO, C. M. S. et al. Um Esquema de Gerenciamento para Redes de Sensores sem Fio Auto-Organizáveis: Atuando sobre regras locais. **25º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, p. 14, 2007.

FREITAS, L. C. DE et al. Redes de Sensores Sem Fio em Ambientes Industriais: Estudo de Caso em uma Subestação de Energia Elétrica. **XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES**, p. 6, 2007.

FREITAS, N. B. B. **Situações e Fatores de Risco no Ramo Químico**, 2000. . Acesso em: 20 ago. 2013

GONÇALVES, L. C.; CORRÊA, M. E. DE O. **Tutorial de NS-2**, 2005. . Acesso em: 20 ago. 2013

HEINZELMAN, W. R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. **Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences**, p. 10, 2000.

HONG, X.; XU, K.; GERLA, M. Scalable Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks. p. 11, 2012.

HUHTONEN, A. Comparing AODV and OLSR Routing Protocols. **Seminar on Internetworking**, p. 9, 2004.

JURCÍK, P. et al. Real-Time Communications over Cluster-Tree Sensor Networks with Mobile Sink Behaviour. **Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, 2008. RTCSA '08. 14th IEEE International Conference on**, p. 12, 2008.

LAKHE, P. R. WIRELESS SENSOR NETWORK USING ZIGBEE. **National Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology**, p. 10, 2012.

LOUREIRO, A. et al. Redes de Sensores Sem fio. p. 48, [s.d.].

LUKOIT, K. et al. TraceGraph: Immediate Visual Location of Software Features. **Software Maintenance, 2000. Proceedings. International Conference on**, p. 8, 2000.

MAHDIPOUR, E.; RAHMANI, A. M.; AMINIAN, E. Performance Evaluation of Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV) Routing Protocol. **International Conference**, n. 9, p. 8, 2009.

MOREIRA, I. **Protocolo Zigbee em Redes de Comunicação Intraveicular**. Monografia—Natal: Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, 2012.

NAKAMURA, F. G. **PLANEJAMENTO DINÂMICO PARA CONTROLE DE COBERTURA E CONECTIVIDADE EM REDES DE SENSORES SEM FIO PLANAS**. Dissertação—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

NAMBA, M. DE O. **Modelagem e Especificação de um Middleware para Redes de Sensores Sem Fio Aplicado à Saúde**. Dissertação—Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2011.

OBODOEZE, F. C.; INYIAMA, H. C.; IDIGO, V. E. WIRELESS SENSOR NETWORK IN NIGER DELTA OIL AND GAS FIELD MONITORING: THE SECURITY CHALLENGES AND COUNTERMEASURES. **International Journal of Distributed and Parallel Systems**, p. 13, 2012.

OLIVEIRA, F. D. M. DE. **Desenvolvimento de um Software de Comunicação sem Fio Aplicado à Instrumentação de Unidade de Elevação de Petróleo Tipo Plunger Lift**. Dissertação—Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

OLIVEIRA, F. D. M. DE. **Um Novo Protocolo Tolerante a Falhas Aplicado às Redes de Sensores sem Fio**. Doutorado—Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

PAKZAD, S. N. et al. Design and Implementation of Scalable Wireless Sensor Network for Structural Monitoring. **JOURNAL OF INFRASTRUCTURE SYSTEMS**, v. 14, p. 13, 2008.

PETERSEN, S. et al. Requirements, Drivers and Analysis of Wireless Sensor Network Solutions for the Oil & Gas Industry. p. 8, 2007.

RAMASUBRAMANIAN, V.; HAAS, Z. J.; SIRER, E. G. SHARP: A Hybrid Adaptive Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. p. 16, 2003.

RIBEIRO, T. J. R. **Estudo Comparativo de Protocolos de Roteamento para Redes Sem Fio Ad Hoc Móveis e Suas Aplicações em Atividades Emergenciais**. Monografia—Fortaleza: FACULDADE FARIAS BRITO, 2010.

ROYER, E. M. A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks. **IEEE Personal Communications**, p. 10, 1999.

SANTANA, E.; ORTIZ, I.; JÚNIOR, O. Introdução às Redes de Sensores Sem fio. p. 11, 2011.

SAVAZZI, S.; GUARDIANO, S.; SPAGNOLINI, U. Wireless Sensor Network Modeling and Deployment Challenges in Oil and Gas Refinery Plants. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, p. 17, 2013.

SILVA, I. M. D. DA. **Redes de Sensores sem Fio aplicadas em Ambientes Industriais de Petróleo e Gás**. Monografia—Natal: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, 2006.

SILVA, M. S.; FRUETT, F. REDE DE SENSORES SEM FIO DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL. **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**, p. 6, 2010.

SILVA, R. C. **Redes de Sensores Sem Fio**. Monografia—Montes Claros: Universidade Estadual de Montes Claros, 2006.

SOARES, S. A. F. **Rede de Sensores Sem Fio Para Localização e Monitoramento de Pequenos Ruminantes**. Monografia—Juazeiro/BA: Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2012.

SOBRAL, T. **Wireless Sensor Network for Oil & Gas Industry**, 2012. . Acesso em: 20 ago. 2013

SOHRABI, K. et al. **Self-organizing Wireless Sensor Network**, 2004. . Acesso em: 20 ago. 2013

SULTAN, A. et al. Network connectivity in Wireless Sensor Networks: a Survey. **School of Computing and Mathematical Sciences Liverpool John Moores University Byrom Street**, p. 5, 2009.