

Dissertação de Mestrado

Análise de Desempenho de Sistemas de Comunicação Sem-Fio para Monitoramento de Unidade de Produção de Poços Petrolíferos Terrestres

Ivanovitch Medeiros Dantas da Silva

Natal, outubro de 2008

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, Ivanovitch Medeiros Dantas da.

Análise de desempenho de sistemas de comunicação sem-fio para monitoramento de unidade de produção de poços petrolíferos terrestres / Ivanovitch Medeiros Dantas da Silva – Natal, RN, 2008.

77 f. : il.

Orientador: Luiz Affonso Henderson Guedes de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sensores – Dissertação. 2. Poços de petróleo – Monitoramento – Dissertação. 3. Redes de sensores sem fio – Dissertação. 4. Técnicas de roteamento – Dissertação. I. Oliveira, Luiz Affonso Henderson Guedes de. II. Título.

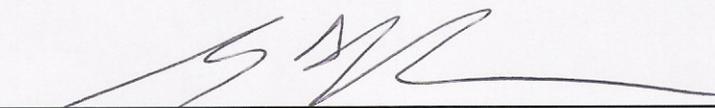
RN/UF/BCZM

CDU 681.586(043.3)

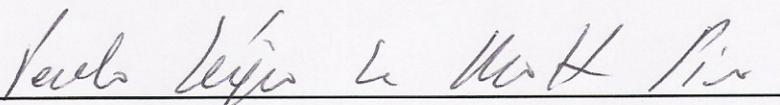
Análise de Desempenho de Sistemas de Comunicação Sem-Fio para Monitoramento de Unidade de Produção de Poços Petrolíferos Terrestres

Ivanovitch Medeiros Dantas da Silva

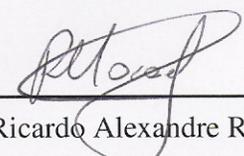
Dissertação de Mestrado aprovada em 30 de outubro de 2008 pela banca examinadora
composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Luiz Affonso H. Guedes de Oliveira (orientador) DCA/UFRN



Prof. Dr. Paulo Sergio da Motta Pires DCA/UFRN



Prof. Dr. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes UFSC

*Aos meus pais, Iveraldo e Adjane,
pela luta e exemplo de dedicação.*

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Luiz Affonso, sou grato pela oportunidade oferecida e orientação.

Ao professor Francisco Vasques, sou grato pela estadia na Universidade do Porto e pelos diversos comentários nos trabalhos realizados.

Aos colegas de laboratório pela ajuda e diversos comentários.

A Evelyne pela paciência e o incentivo nas horas mais difíceis.

À ANP, pelo apoio financeiro.

Resumo

Grande parte do monitoramento de poços petrolíferos terrestres realizados atualmente está baseado em soluções sem fio (*wireless*). Todavia, essas soluções apresentam uma configuração defasada tecnologicamente na medida em que são utilizados rádios analógicos e topologias de comunicação ineficientes. Por outro lado, tecnologias que adotam rádios digitais podem proporcionar soluções mais eficientes relacionadas com o consumo de energia, segurança e tolerância a falhas. O trabalho investiga se as Redes de Sensores Sem Fio, tecnologia de comunicação que utiliza rádios digitais, são adequadas para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Porcentagem de pacotes entregues com sucesso, consumo de energia, atrasos de comunicação e técnicas de roteamento para uma topologia em malha são as métricas usadas para validar a proposta através da ferramenta de simulação NS-2.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio, simulação, monitoramento de poços petrolíferos, técnicas de roteamento.

Abstract

The greater part of monitoring onshore Oil and Gas environment currently are based on wireless solutions. However, these solutions have a technological configuration that are out-of-date, mainly because analog radios and inefficient communication topologies are used. On the other hand, solutions based in digital radios can provide more efficient solutions related to energy consumption, security and fault tolerance. Thus, this paper evaluated if the Wireless Sensor Network, communication technology based on digital radios, are adequate to monitoring Oil and Gas onshore wells. Percent of packets transmitted with successful, energy consumption, communication delay and routing techniques applied to a mesh topology will be used as metrics to validate the proposal in the different routing techniques through network simulation tool NS-2.

Keywords: Wireless sensor network, simulation, oil and gas application, routing techniques.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos e Abreviaturas	vii
1 Introdução	1
1.1 Monitoramento industrial	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Organização do trabalho	3
2 Monitoramento de Poços Petrolíferos Terrestres	5
2.1 Métodos de elevação	5
2.1.1 Bombeio mecânico com hastes	6
2.2 Desafios tecnológicos	7
2.3 Soluções atuais	8
3 Redes de Sensores Sem Fio	11
3.1 Introdução	11
3.2 Camada de Aplicação	12
3.3 Camada de Rede	13
3.4 Padrão IEEE 802.15.4	13
3.4.1 Camada física	14
3.4.2 Camada de enlace	15
3.4.3 Sentidos de comunicação	17
3.4.4 Formação da rede	19
3.5 Trabalhos relacionados	20

4	Proposta do trabalho	23
4.1	Estado da arte para roteamento em RSSF	23
4.1.1	Tópicos relevantes para roteamento em RSSF	24
4.2	Classificação dos algoritmos de roteamento em RSSF	27
4.2.1	Roteamento plano	27
4.2.2	Roteamento hierárquico	29
4.2.3	Roteamento baseado em localização	32
4.3	Algoritmo de roteamento AODV modificado	33
5	Simulações e Análise dos Resultados	35
5.1	Introdução sobre a ferramenta de simulação NS-2	35
5.2	Cenário de simulação	36
5.3	Resultados	40
5.3.1	Throughput relativo	40
5.3.2	Número de colisões	41
5.3.3	Mensagens de controle	43
5.3.4	Atraso fim-a-fim	43
5.3.5	Consumo de energia	45
6	Conclusão	49
6.1	Publicações	51
	Referências bibliográficas	52

Lista de Figuras

2.1	Unidade de bombeio.	6
2.2	Exemplo de uma carta dinamométrica com dados fictícios.	7
3.1	Diferentes camadas do protocolo ZigBee.	12
3.2	Seleção de canais de comunicação para um ambiente na presença do IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11b.	14
3.3	Estrutura do <i>superframe</i> utilizado pelo padrão IEEE 802.15.4.	15
3.4	Comunicação de um dispositivo de rede para o coordenador, baseado(a) ou não(b) na estrutura do <i>superframe</i>	18
3.5	Comunicação do coordenador para um dispositivo de rede, baseado(a) ou não(b) na estrutura do <i>superframe</i>	18
3.6	Mecanismo de formação da rede definido pelo IEEE 802.15.4.	19
4.1	Mensagens de controle para o algoritmo AODV.	29
4.2	(a) Topologia física. (b) Topologia lógica. (c) Reconfiguração.	31
4.3	Otimização para descobertas de rotas no AODV.	34
5.1	Estrutura de simulação no <i>Network Simulator 2.33</i>	36
5.2	Inicialização da rede: (a) Aleatória (b) Sequência.	37
5.3	Determinação do número de experimentos baseado em métricas estatísticas.	38
5.4	Confiabilidade da rede para inicialização aleatória.	40
5.5	Confiabilidade da rede para inicialização em sequência.	41
5.6	Número de colisão para inicialização aleatória.	42
5.7	Número de colisões para inicialização em sequência.	42
5.8	Número de pacotes de controle enviados.	43
5.9	Latência da rede baseado na inicialização aleatória.	44
5.10	Latência da rede baseado na inicialização em sequência.	45
5.11	Histograma do consumo de energia na rede.	46
5.12	Consumo de energia médio dos algoritmos de roteamento para a inicialização aleatória e sequencial.	46

Lista de Tabelas

3.1	Tamanho e duração dos slots e superframe para os possíveis valores de SO.	17
5.1	Configuração dos parâmetros de simulação.	39

Lista de Símbolos e Abreviaturas

6LoWPAN: IPv6 over Low Power Personal Area Networks

AODV: Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing

APS: Application Support Sub-Layer

BCP: Bombeio por Cavidades Progressivas

BCS: Bombeio Centrífugo Submerso

BI: Beacon Interval

BM: Bombeio Mecânico com hastes

CAP: Contention Access Period

CCA: Clear Channel Assessment

CFP: Contention Free Period

CSMA-CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

DPA: Dispositivo de Parada Automática

DSSS: Direct Sequency Spread Spectrum

ED: Energy Detection

GLC: Gas-Lift Contínuo

GLI: Gas-Lift Intermitente

IEFT: Internet Engineering Task Force

IHM: Interface Homem-Máquina

LQI: Link Quality Indication

RSSF: Redes de Sensores Sem Fio

SD: Superframe Duration

TDMA: Time Division Multiple Acces

Wifi: WIreless-FIdelity

ZDO: ZigBee Device Objects

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo introdutório, apresentaremos as principais características relacionadas com o monitoramento de poços petrolíferos terrestres. As técnicas de comunicação utilizadas e os desafios tecnológicos presentes no contexto dessa aplicação serão as características abordadas. No final do capítulo, são descritos a motivação e os objetivos do trabalho, além da organização estrutural dos outros capítulos.

1.1 Monitoramento industrial

Atualmente, devido à herança legada das tecnologias de comunicação, a grande maioria do monitoramento de informações em plantas industriais é realizada através de tecnologias cabeadas [Gungor & Lambert 2006]. O custo de instalação e manutenção dessas tecnologias consomem uma fatia considerável de um projeto de comunicação. Todavia, em aplicações *outdoor*, que é o caso de automação de poços petrolíferos terrestres, é bem mais usual a utilização de tecnologias de comunicação sem-fio (*wireless*). A adoção de uma solução *wireless* pode reduzir em até 90% os custos com esses procedimentos, conforme experimentos realizados por Krishnamurthy et al. (2005). Além disso, esta solução diminui os riscos dos operários em áreas classificadas (regiões com elevada probabilidade de ocorrências de acidentes) na medida que manutenções dos equipamentos são otimizadas.

O ponto inicial em um projeto de comunicação, em qualquer ambiente, começa pela listagem dos requisitos básicos da aplicação. A área de interesse deste trabalho relaciona-se com ambientes industriais de petróleo e gás natural, onde as aplicações necessitam de uma baixa latência, consumo de energia limitado, baixo custo e grande escalabilidade [Santos 2007]. Uma outra característica que deve ser levada em consideração é a interferência eletromagnética. Este fenômeno é um dos principais problemas para comunicações sem fio. Em soluções cabeadas é possível diminuir esse efeito através da utilização de ca-

bos trançados ou blindados, enquanto que nas soluções *wireless* este fenômeno é reduzido a partir da técnica de espalhamento espectral ou saltos de frequência. O escopo desse trabalho está relacionado com soluções que adotam comunicação sem fio.

Devido à grande quantidade de soluções *wireless* disponíveis, Bluetooth, Wi-Fi, Wi-max e as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), é preciso filtrar aquelas que se adequem melhor as características citadas anteriormente.

A tecnologia Bluetooth apresenta baixa taxa de transmissão (1Mbps) e pequeno alcance, porém a elevada latência introduzida para uma configuração com muitos dispositivos impede o uso no monitoramento de ambientes industriais. A tecnologia Wi-Fi possui uma maior largura de banda (11/54Mbps) do que a Bluetooth, entretanto o consumo de energia é bastante dispendioso e, dessa forma, não apresenta características favoráveis para aplicações de monitoramento remoto onde o fornecimento de energia não seja atendido.

Quando comparada com as tecnologias citadas anteriormente, o Wimax é a que apresenta maiores taxas de transmissão (32/132Mbps) e alcance (50km). A utilização dessa tecnologia é ideal para aplicações que exigem baixa latência, enlaces de comunicação geograficamente distantes e onde o fornecimento de energia não seja um problema. Por fim, acreditamos que as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) é a tecnologia *wireless* que apresenta maior vantagem para o monitoramento remoto em ambientes industriais de petróleo e gás natural devido sua flexibilidade e custo. Suas principais vantagens estão relacionadas com a relação custo-benefício das taxas de transmissão, reduzido consumo de energia, elevada escalabilidade, baixa latência, tolerância a falhas e mecanismos de segurança. Aliado a essas características, existe o fato de que as camadas inferiores do protocolo podem ser desenvolvidos por diferentes fabricantes mantendo-se o padrão.

1.2 Motivação

Grande parte do monitoramento de poços petrolíferos terrestres atualmente utiliza solução *wireless* [Santos 2007]. Todavia, através de uma pesquisa de campo realizada em ambientes industriais de petróleo e gás natural foi percebido que as soluções adotadas apresentam uma configuração defasada tecnologicamente na medida que são baseadas em rádios analógicos e topologias de comunicação ineficientes. Por outro lado, sabe-se [Roden 1991] que rádios digitais apresentam uma melhor cobertura, um consumo mais eficiente de energia e a capacidade de comunicar com diversos grupos simultaneamente em um mesmo local, enquanto que uma tecnologia analógica utiliza basicamente uma solução mestre-escravo.

Uma segunda característica que também encontra-se defasada tecnologicamente nas soluções adotadas no monitoramento de poços petrolíferos terrestres relaciona-se com a topologia da rede. Atualmente, as informações são transmitidas diretamente (sem roteamento) em enlaces geograficamente distantes até uma estação central de onde os dados coletados são processados por sistemas supervisórios. Entretanto, devido à utilização de rádios analógicos uma abordagem utilizando uma topologia tipo malha não pode ser adotada. Por outro lado, uma solução com topologia tipo malha apresenta grande flexibilidade na medida que rotas alternativas podem ser formadas, permitindo-se que caminhos mais eficientes e tolerantes a falhas possam ser usados. A utilização de rotas alternativas apresenta um excelente ganho do ponto de vista econômico em virtude de evitar que estruturas de comunicação, como por exemplo torres, sejam construídas para viabilizar a comunicação em áreas com obstáculos naturais (morros e montanhas). Uma outra vantagem na adoção de soluções com topologia em malha está relacionada com a agregação de diversas aplicações, como por exemplo a vigilância remota. Nas soluções atuais para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres, não é possível a agregação de novas aplicações devido a limitação da tecnologia de comunicação adotada.

1.3 Objetivos

Um dos objetivos deste trabalho é avaliar a aplicabilidade da tecnologia de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) no monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Nesse contexto avalia-se uma topologia tipo malha implementada através da tecnologia ZigBee. O outro objetivo do trabalho está relacionado com a avaliação das técnicas de roteamento mais adequadas para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres.

A estrutura proposta visa melhorar a eficiência dessa aplicação quanto à latência de transmissão, consumo de energia e tolerância a falhas. Para validação da proposta, será utilizado a ferramenta de simulação computacional NS-2 onde a topologia, técnicas de roteamento e os mecanismos de comunicação serão implementados. Um algoritmo de roteamento adaptado as características de monitoramento de poços petrolíferos baseados no clássico algoritmo de roteamento AODV também será proposto.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em 6 Capítulos. O Capítulo 2 apresenta as principais características relacionadas com o domínio de aplicação do monitoramento de poços pe-

trolíferos terrestres. No Capítulo 3, a tecnologia de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) é introduzida através do padrão IEEE 802.15.4. A proposta do trabalho relacionando as RSSF com o monitoramento de poços petrolíferos terrestres é descrita no Capítulo 4. Resultados dos experimentos desenvolvidos são encontrados no Capítulo 5. Por fim, o Capítulo 6 enumera as principais conclusões da proposta e indica direções para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Monitoramento de Poços Petrolíferos Terrestres

Neste capítulo, descrevem-se as principais características relacionadas com o monitoramento de poços petrolíferos terrestres, os desafios tecnológicos e as soluções encontradas atualmente. Devido fato deste trabalho estar relacionado com poços petrolíferos, os quais utilizam métodos de elevação artificial por bombeio mecânico, uma introdução sobre esse método também será apresentada.

2.1 Métodos de elevação

O princípio básico da extração de fluido nos poços petrolíferos é a diferença de pressão existente entre a superfície e o reservatório. Quando as pressões nos reservatórios são elevadas, a diferença de pressão existente entre a superfície e o reservatório faz com que o fluido localizado no interior do reservatório escoe naturalmente para a superfície. Quando isso ocorre, os poços do reservatório são chamados de surgentes. Por outro lado, quando a diferença de pressão não é suficiente para o fluido alcançar a superfície, métodos de elevação artificiais são utilizados. Segundo Thomas (2004), os principais métodos de elevação artificial encontrados na indústria de petróleo são:

- *gas-lift* Contínuo e Intermitente (GLC e GLI);
- bombeio Centrífugo Submerso (BCS);
- bombeio Mecânico com Hastes (BM) e
- bombeio por Cavidades Progressivas (BCP).

Para o escopo desse trabalho, os poços petrolíferos monitorados utilizam o método de bombeio mecânico com hastes.

2.1.1 Bombeio mecânico com hastes

Neste método de elevação artificial, o movimento rotativo de um motor elétrico ou de combustão interna é transformado em movimento alternativo por uma unidade de bombeio localizada próxima à cabeça do poço. Uma coluna de hastes transmite o movimento alternativo para o fundo do poço, acionando uma bomba que eleva os fluidos produzidos pelo reservatório para a superfície [Thomas 2004]. Dessa forma, o ciclo de bombeio é caracterizado pelo movimento ascendente e descendente da unidade de bombeio, chamados tecnicamente de cursos *Upstroke* e *Downstroke*. A figura 2.1 descreve um esquema simplificado desse método, onde os equipamentos no fundo do poço não foram ilustrados pois extrapolam o domínio desse trabalho.

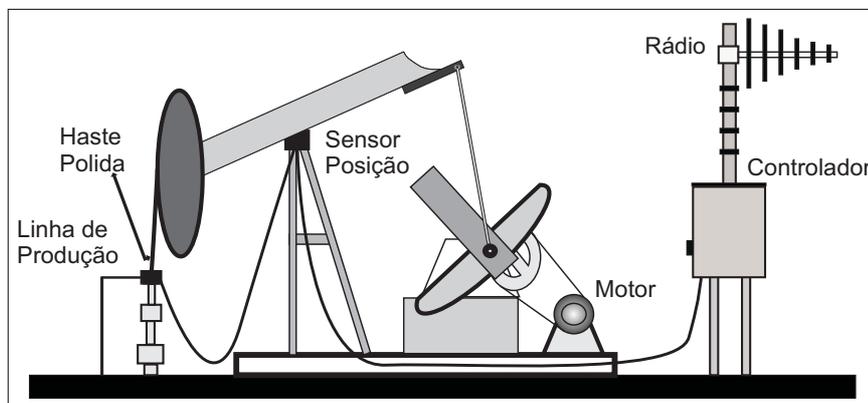


Figura 2.1: Unidade de bombeio.

Para o acompanhamento do processo de bombeio mecânico são utilizados cartas dinâmométricas. Os valores obtidos na carta vêm de um dinamômetro (medição de cargas) instalado na haste polida da unidade de bombeio. Os pares de valores de posição e força de tração na haste polida durante o ciclo de bombeio constituem a carta dinâmométrica de superfície. Já os pares de posição e força no pistão (localizado na bomba tubular dentro do poço) representam a carta dinâmométrica de fundo [Costa 2005]. Um exemplo de uma carta dinâmométrica fictícia é representada na figura 2.2. A partir da figura é possível analisar as cargas mínima e máxima na haste polida, bem como o ciclo de bombeio (*Upstroke* e *Downstroke*).

A automação do método de elevação por bombeio mecânico necessita de vários dispositivos: sensores de carga, posição, vazão, temperatura, pressão, chaves magnéticas, controladores, rádios, entre outros. Segundo Costa (2005), o processo de automação nesses poços é realizado a partir da vazão de óleo presente no poço, sendo as principais variáveis monitoradas listadas a seguir:

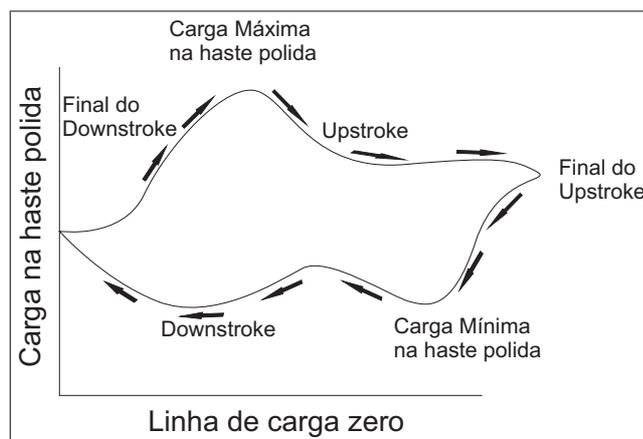


Figura 2.2: Exemplo de uma carta dinamométrica com dados fictícios.

- Ajuste automático do ciclo de bombeio baseado na carta dinamométrica;
- Nível de óleo no redutor (motor);
- Torque no eixo do redutor (motor);
- Telemetria de carga e posição;
- Níveis de vazão;
- DPA (Dispositivo de Parada Automática) e
- Alarmes em geral.

2.2 Desafios tecnológicos

Os constantes avanços presentes nas tecnologias de comunicação têm proporcionado a extração de informações em plantas industriais de uma forma mais eficiente e barata [Willig 2008]. O acoplamento dessas tecnologias com redes de controle e supervisão criam ferramentas poderosas para o gerenciamento remoto de todo processo produtivo.

Geralmente, essas ferramentas são divididas em 3 partes principais: supervisão, operação e controle. Durante a supervisão, as variáveis que compõem o processo produtivo podem ser visualizadas através de interfaces IHM (Interface Homem-Máquina), enquanto que durante a etapa de operação os equipamentos envolvidos no processo podem ser configurados. Na etapa de controle, mecanismos de ajustes dinâmicos são utilizados para manter valores das variáveis dentro de limites previamente configurados.

Neste trabalho, serão abordadas tecnologias de comunicação para transmissões de dados que são utilizados na etapa de supervisão em aplicações de monitoramento de poços petrolíferos terrestres. As principais variáveis manipuladas nessa etapa são os *sta-*

tus, alarmes, modos de operação, dados de produção e cartas dinamométricas dos poços [Nascimento 2005]. Por serem consideradas variáveis críticas para a planta industrial em aplicações de monitoramento, a relação entre o número de pacotes recebidos pelo número de pacotes enviados, também chamada de *throughput* relativo, deve ser tão próxima do valor unitário quanto possível.

Outro fator a ser analisado relaciona-se com a representação física dessas variáveis. Devido às limitações físicas dos dispositivos de campo, impostas pelas aplicações, a maioria das variáveis deve assumir valores que são manipulados através de poucos bytes. Entretanto, para representação das cartas dinamométricas, maiores espaços físicos de armazenamento são requeridos. Dessa forma, o mecanismo de transmissão imposto pela tecnologia de comunicação deve atender requisitos flexíveis para o tamanho de pacotes transmitidos.

O tempo de vida útil da aplicação é um outro aspecto a ser levado em consideração para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Em virtude dos dispositivos de campo localizarem-se em áreas relativamente inóspitas, o fornecimento de energia em algumas situações não ocorre por linhas de transmissões [Frederico 2006]. Dessa forma, fontes de energia alternativas, como por exemplo células fotoelétricas, são usadas em conjunto com baterias para fornecer carga útil aos dispositivos. Devido à limitação física de armazenamento das baterias e de condições climáticas adversas que impedem a absorção de carga, técnicas para otimização do consumo de energia devem ser adotadas para viabilizar a operação adequada dos dispositivos quando métodos alternativos de energia são utilizados [Silva et al. 2008].

2.3 Soluções atuais

Através de uma pesquisa de campo realizada em ambientes industriais de petróleo e gás natural foi observado que a maioria das aplicações de monitoramento de poços petrolíferos terrestres adota soluções de comunicação sem fio. Entretanto, apesar das soluções encontradas resolverem os problemas para os quais foram propostas, melhorias no desempenho das soluções são ineficientes na medida que os rádios analógicos adotados são tecnologicamente limitados para implementação de mecanismos de roteamentos mais robustos. Potência e taxa de transmissão dos rádios analógicos utilizados pelas soluções encontradas na pesquisa realizada demonstram resultados inferiores quando comparados com os rádios digitais disponíveis comercialmente para Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). Em geral, foram encontrados rádios analógicos com potência de 5W e taxas de transmissão variando entre 2-5kbps, enquanto que os rádios digitais nas RSSF, por

exemplo, possuem potências em escala de mW e taxas de transmissão de 250kbps.

Ainda através da pesquisa de campo, foi observado que uma topologia mestre/escravo com um mecanismo de *polling* é utilizado no monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Em geral, um ou dois dispositivos mestres, tecnicamente chamados de mestre-de-campo, controlam a comunicação de todos os poços em uma determinada área. Em média 500 a 1000 poços são monitorados. Basicamente, dispositivos mestre-de-campo enviam requisições para os dispositivos no campo e esperam uma resposta com as informações requeridas. Somente após uma resposta ser recebida é que o mestre-de-campo envia uma nova requisição para um outro dispositivo. O processo se repete até que todos os dispositivos no campo sejam lidos. Em geral, um ciclo de *polling* tem duração entre 8-12 minutos. O mecanismo de *polling* apenas é interrompido caso um usuário do sistema supervisorio necessite adquirir informações de um determinado poço. Nesse caso, uma requisição específica do mestre-de-campo é realizada. Resumidamente, o esquema de monitoramento dos poços é equivalente ao ilustrado na figura 2.1. Sensores de carga e posição enviam informações através de cabos para uma unidade de processamento, geralmente um controlador, para que as informações coletadas recebam um pré-processamento. Em seguida, a informação é transmitida pelo rádio até o mestre-de-campo.

Através da pesquisa de campo foi observado que os dados monitorados pelos poços podem ser classificados em 2 grupos de acordo com o tamanho médio dos pacotes transmitidos na rede. No primeiro grupo, com pacotes de tamanho médio de 90bytes, as seguintes informações são monitoradas:

- *status* da unidade de bombeio
 - Parado ou ligado.
- Alarmes em geral
- Modo de controle
 - Manual ou automático.
- Dados de produção do poço
 - Produção do dia;
 - Produção do dia anterior;
 - Número de ciclos do dia;
 - Número de ciclos do dia anterior;
 - Tempo de funcionamento do dia;
 - Tempo de funcionamento do dia anterior e
 - Velocidade de bombeio.

10 *CAPÍTULO 2. MONITORAMENTO DE POÇOS PETROLÍFEROS TERRESTRES*

No segundo grupo, os pacotes podem apresentar tamanhos de até 1kbytes. Em geral, as informações monitoradas nesse grupo estão restritas às cartas dinamométricas. Devido ao tamanho das cartas ser elevado, as informações são fragmentadas em dois ou mais pacotes. Durante um dia, no modo de funcionamento automático, 2 ou 3 cartas são transmitidas ao mestre-de-campo por poço.

Nesse capítulo foram abordados as principais características relacionadas com o monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Basicamente, uma topologia mestre-escravo com rádios analógicos é utilizada como tecnologias de comunicação. As taxas de transmissão variam entre 2-5kbps em intervalos de 8-12 minutos. O tamanho médio dos pacotes transmitidos na rede é de aproximadamente 90bytes. Nos próximos capítulos a tecnologia de RSSF será descrita como uma nova abordagem a ser utilizada no contexto dessa aplicação.

Capítulo 3

Redes de Sensores Sem Fio

Neste capítulo serão descritos as características principais das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). Especificamente, serão abordados: a pilha de protocolo ZigBee compreendendo as camadas de aplicação e rede, camada física e MAC do padrão IEEE 802.15.4, esquema de formação da rede e sentidos de comunicação. No final do capítulo são apresentados os principais trabalhos relacionados com RSSF para o monitoramento industrial.

3.1 Introdução

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são uma tecnologia pervasiva com a capacidade de conectar dispositivos em diversos ambientes. Sua estrutura física é formada por uma grande quantidade de dispositivos, chamados nós sensores, com limitada capacidade de processamento e tamanho físico bastante reduzido.

Para uma típica aplicação de monitoramento, por exemplo, os nós sensores realizam medições locais sobre uma determinada variável do ambiente e transmitem a informação para pontos centrais, chamados de nós *sink*, onde um processamento adequado sobre as informações coletadas é realizado. Os nós sensores podem interagir com o ambiente, comunicar com nós vizinhos dentro de um alcance limitado e executar um pré-processamento das informações coletadas [Sohraby et al. 2007]. A flexibilidade de instalação e configuração dessas redes fazem com que sua utilização apresente resultados bastante significativos quando comparados com outras tecnologias de comunicação [Gungor & Lambert 2006]. Essas características permitem que as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) possam ser utilizadas em diversas aplicações (robótica, agricultura, indústria, medicina).

Em relação aos protocolos de comunicação desenvolvidos para as RSSF, nesse trabalho será explorado a solução baseada em ZigBee. Este protocolo foi desenvolvido a partir de uma associação de várias empresas para padronização de uma tecnologia de comunicação *wireless*. Basicamente, este protocolo define as camadas superiores para as RSSF

enquanto que as camadas inferiores são baseadas no padrão IEEE 802.15.4. A figura 3.1 descreve um esquema da organização das diferentes camadas no protocolo ZigBee. Essas camadas serão descritas nas próximas seções.



Figura 3.1: Diferentes camadas do protocolo ZigBee.

3.2 Camada de Aplicação

Esta camada fornece diversos serviços para o gerenciamento de aplicações pelos usuários finais. A camada é dividida em três partes principais: subcamada de suporte a aplicação (APS), *framework* de aplicação e objeto de dispositivo (ZDO). A subcamada APS fornece uma interface entre a camada de rede e a camada de aplicação através de um conjunto padrão de serviços usados pelo objeto de dispositivo (ZDO). Por outro lado, o *framework* de aplicação é responsável por ligar objetos da aplicação para dispositivos ZigBee. O protocolo ZigBee suporta até 240 diferentes objetos da aplicação por dispositivo, tornando possível a existência de 240 diferentes aplicações em um mesmo dispositivo. O *framework* da aplicação também é responsável por criar perfis de funcionamento nos

dispositivos, cuja configuração determina o formato padrão das mensagens trocadas pelas aplicações. Em relação aos objetos de dispositivos (ZDO), as principais responsabilidades estão voltadas para o interfaceamento entre os objetos da aplicação e a subcamada APS. O ZDO atua nos requisitos básicos de todas operações das aplicações na pilha do protocolo ZigBee, sendo uma das principais tarefas o gerenciamento da segurança.

3.3 Camada de Rede

A camada de rede fornece funcionalidades para manter a correta operação dos serviços oferecidos pela camada MAC e servir de intermediador entre as camadas superiores e inferiores. As principais funções gerenciadas pela camada de rede são: gerenciamento de novos dispositivos, inicialização da rede, entrada e saída de dispositivos, endereçamento, localização de dispositivos, descobertas de rotas, controle de recepção e roteamento.

Em relação as topologias suportadas por esta camada, podemos destacar três diferentes modelos: estrela, árvore e malha. Na topologia em estrela, a rede é controlada por apenas um dispositivo, chamado de coordenador. O coordenador é responsável por inicializar e manter os outros dispositivos na rede, cuja comunicação ocorre apenas para o coordenador em enlaces ponto-a-ponto. Nas topologias em árvore e malha, o coordenador além de ter as mesmas responsabilidades de um coordenador na topologia em estrela, deve atribuir para alguns dispositivos a capacidade de roteamento. Na topologia em árvore, dispositivos roteadores transmitem dados e mensagens de controle na rede usando uma abordagem de roteamento hierárquico. Por outro lado, nas topologias em malha os dispositivos podem se comunicarem com qualquer outro dispositivo utilizando um enlace ponto-a-ponto completo.

3.4 Padrão IEEE 802.15.4

Atualmente, RSSF utilizam protocolos proprietários ou de padronização aberta. Existem muitos protocolos relacionados com as camadas superiores da tecnologia (ZigBee (2007), Hart (2007), ISA100 (2007)), entretanto o protocolo IEEE 802.15.4 [IEEE 2006] é um padrão *de facto* para as camadas inferiores. O protocolo IEEE 802.15.4 define as características para a camada física e o controle de acesso ao meio das LR-WPAN (*low-rate wireless personal area network*). O padrão foi criado em 2003 e em 2006 foi revisado para atender melhorias na camada física e em aspectos de segurança. Nas próximas seções, será apresentado as principais características sobre a camada física e a camada de

enlace para o protocolo IEEE 802.15.4.

3.4.1 Camada física

A camada física pode operar em 3 faixas de frequência: 2450MHz (amplamente utilizada e adotada pelo Brasil) com 16 canais, 915 MHz (apenas nos USA) com 10 canais e 868MHz com apenas 1 canal (padrão Europeu e Japonês). A forma como os canais estão organizados permite a coexistência do padrão IEEE 802.15.4 com outros padrões, como por exemplo o IEEE 802.11b, em um mesmo ambiente. Um exemplo dessa compatibilidade é descrita na figura 3.2 [IEEE 2006]. Observe que apesar do IEEE 802.11b utilizar uma porcentagem grande da faixa de frequência disponível, a utilização dos canais 15,20,25,26 do IEEE 802.15.4 ainda é permitida.

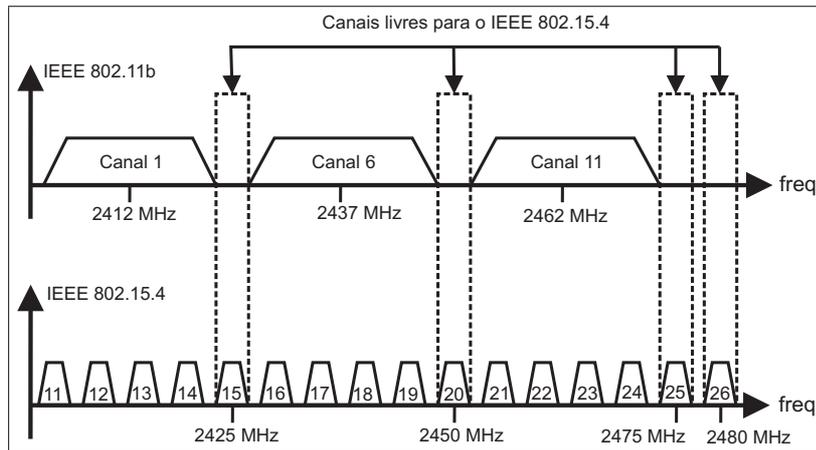


Figura 3.2: Seleção de canais de comunicação para um ambiente na presença do IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11b.

Todas as frequências utilizadas pelo padrão IEEE 802.15.4 suportam espalhamento espectral com seqüenciamento direto (DSSS - Direct Sequency Spread Spectrum) para o modo de acesso ao canal de comunicação. Com relação à modulação digital, o padrão define que para a frequência de 2450MHz a técnica O-QPSK (*Orthogonal Quadrature Phase Shift Keying*) deve ser utilizada, enquanto que as frequências de 868/915MHz devem utilizar a técnica BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Com relação às taxas de transmissão, é definida pela norma a taxa de 250kbps para a frequência de 2450MHz, taxas de 250kbps e 40kbps para a frequência de 915MHz e taxas de 100kbps e 20kbps para a frequência de 868MHz.

Além dessas características, a camada física é responsável por uma série de serviços, tais como a ativação e desativação do rádio, detecção de níveis de energia no canal (ED),

medição da qualidade do enlace (LQI) para os pacotes recebidos, verificação da ocupação do canal (CCA) para evitar colisões (CSMA-CA), seleção da frequência do canal, transmissão e recepção de informações.

3.4.2 Camada de enlace

O padrão IEEE 802.15.4 define o controle de acesso ao meio (MAC) como parte da camada de enlace. A subcamada MAC define dois tipos básicos de dispositivos, RFD (*reduced function device*) e FFD (*full function device*). RFDs são equipados com um conjunto limitado de funcionalidade da subcamada MAC. RFDs podem funcionar apenas como dispositivos finais que coletam dados e transmitem a informação para seus vizinhos. Sua comunicação é restrita a dispositivos FFDs. Por outro lado, dispositivos FFDs são equipados com um conjunto completo de funcionalidades da subcamada MAC. Eles podem atuar como dispositivos finais, roteadores ou coordenadores da rede. Neste caso não há limitação de comunicação com determinados tipos de dispositivos.

O padrão IEEE 802.15.4 também define dois modos de operação baseados ou não na estrutura de *superframe*. Os modos de operação são utilizados para controlar a comunicação na rede. No primeiro caso, uma estrutura de *superframe* é usada para sincronizar a comunicação entre os dispositivos. A estrutura do *superframe* é representada pela figura 3.3.

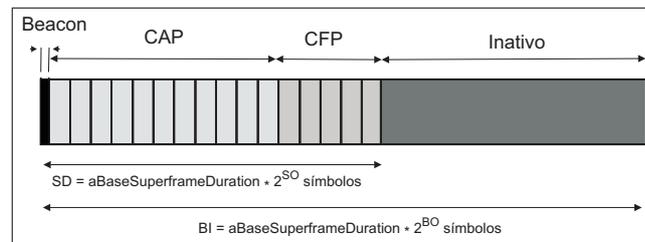


Figura 3.3: Estrutura do *superframe* utilizado pelo padrão IEEE 802.15.4.

Para que os dispositivos possam determinar o início do *superframe* é usado uma área de sincronização chamado de *beacon*. Como se pode perceber através da figura 3.3, a estrutura do *superframe* é dividida em uma parte ativa (CAP (*Contention Access Period*)) e CFP (*Contention Free Period*)) e outra inativa. Na parte ativa, a estrutura é dividida em 16 partes igualmente espaçadas chamadas de *slots*. Os nós sensores competem pelo acesso ao canal de comunicação (adquirir um *slot*) utilizando o algoritmo CSMA-CA *slotted* durante o período de contenção (CAP). Entretanto, para aplicações com requisitos de baixa latência, o uso do período livre de contenção (CFP) é desejável para se obter o

acesso ao canal de comunicação livre de colisões. Durante a porção inativa da estrutura do *superframe*, nós sensores entram em modo de hibernação para economizar energia. Bougard et al. (2005) realizaram um estudo sobre o modo de hibernação em nós sensores e foi verificado que a energia consumida nessa operação é da ordem de 10^{-9} joules.

As durações do *superframe* (parte ativa) e do *beacon* (partes ativa + inativa) são definidas pelo padrão a partir de 2 variáveis básicas: SO (*macSuperframeOrder*) e BO (*macBeaconOrder*), respectivamente. A duração do superframe (SD - *Superframe Duration*) é representada a partir da equação 3.1 enquanto que a duração do beacon (BI - *Beacon Interval*) é representada pela equação 3.2. Em ambas as equações, SO e BO seguem a relação: $0 \leq SO \leq BO \leq 14$. Perceba que para valores iguais de SO e BO, a duração do *superframe* será igual a duração do *beacon* e nesse caso não existirá a parte inativa do *superframe*.

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \quad (3.1)$$

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \quad (3.2)$$

A partir da equação 3.1 pode-se determinar a duração mínima do *superframe* (parte ativa) para $SO = 0$. Levando-se em consideração a frequência de 2.4GHz, taxa de transmissão de 250kbps e o valor de *aBaseSuperframeDuration* definido no padrão IEEE 802.15.4 de 960 símbolos (1 símbolo corresponde a 4bits), é possível calcular a duração mínima do *superframe* a partir da equação 3.3.

$$SD_{min} = \frac{960 * 4bits}{250kbps} = 15.36ms \quad (3.3)$$

Sabendo que o *superframe* é organizado em 16 *slots* igualmente divididos, a partir da equação 3.3 encontra-se que o a duração e o tamanho mínimo de um slot é de $960\mu s$ e 30bytes, respectivamente. A tabela 3.1 descreve os outros possíveis valores para a duração e tamanho do *superframe* e *slots*. Perceba que a duração máxima do *superframe* é de 4.18 minutos enquanto que a duração máxima do *slot* é de 15.72 segundos. Em relação ao tamanho do *slot*, pode-se perceber através da tabela 3.1 que o máximo valor é de aproximadamente 491kbytes.

Para ativar a abordagem de comunicação que não é baseada na estrutura do *superframe*, configura-se a variável BO para o valor 15. Para o escopo desse trabalho, essa configuração é de grande importância para os experimentos realizados devido não ter sido utilizado a estrutura do *superframe* em nossas simulações.

Tabela 3.1: Tamanho e duração dos slots e superframe para os possíveis valores de SO.

SO	Duração do superframe (ms)	Duração do slot (ms)	Tamanho do slot (bytes)
0	15.36	0.96	30
1	30.72	1.92	60
2	61.44	3.84	120
3	122.88	7.68	240
4	245.76	15.36	480
5	491.52	30.72	960
6	983.04	61.44	1920
7	1966.08	122.88	3840
8	3932.16	245.76	7680
9	7864.32	491.52	15360
10	15728.64	983.04	30720
11	31457.28	1966.08	61440
12	62914.56	3932.16	122880
13	125829.12	7864.32	245760
14	251658.24	15728.64	491520

3.4.3 Sentidos de comunicação

O padrão IEEE 802.15.4 define 3 sentidos de comunicação para as RSSF nos modos de operação com ou sem a estrutura do *superframe*. No primeiro caso, a orientação da comunicação ocorre de um dispositivo na rede para o coordenador. No segundo caso, a comunicação ocorre de forma inversa. No terceiro caso, a orientação da comunicação pode ocorrer em qualquer sentido para qualquer tipo de dispositivo. Em uma topologia em estrela os dois primeiros casos são utilizados, enquanto que em uma topologia em malha todos os casos podem ser usados.

No primeiro caso, para o modo de operação com a estrutura do *superframe* habilitada, quando um dispositivo desejar enviar dados para um coordenador, primeiramente deve-se esperar o recebimento de um *beacon* para que ocorra a sincronização com o *superframe*. Em um tempo apropriado, a informação coletada na rede é transmitida para o coordenador usando o CSMA-CA *slotted*. O coordenador, opcionalmente, pode enviar uma mensagem de reconhecimento para garantir que o pacote chegou corretamente. Este procedimento é ilustrado na figura 3.4(a). Entretanto, quando a estrutura do *superframe* não é habilitada, um dispositivo não necessita esperar o recebimento de um *beacon* para enviar uma informação. Em um tempo apropriado, a informação é transmitida utilizando o CSMA-CA sem *slots*, conforme descrito na figura 3.4(b). Nesse modo de comunicação, o dispositivo verifica se o meio está ocioso antes de iniciar a transmissão com o intuito de diminuir a probabilidade de colisões. Quando uma colisão é detectada, o dispositivo aguarda um

intervalo de tempo antes de tentar retransmitir o pacote novamente.

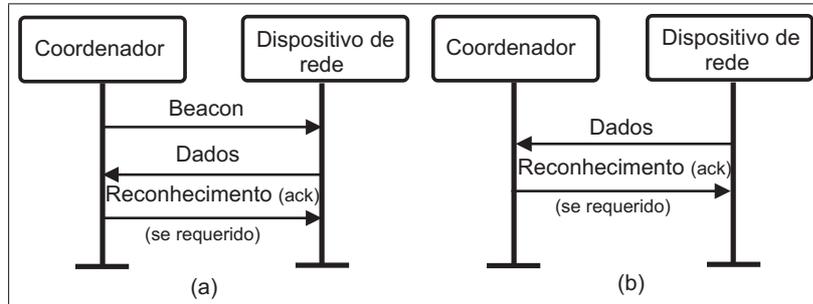


Figura 3.4: Comunicação de um dispositivo de rede para o coordenador, baseado(a) ou não(b) na estrutura do *superframe*.

No segundo caso, para o modo de operação com a estrutura do *superframe* habilitada, quando um coordenador desejar enviar dados para um dispositivo na rede ele indica explicitamente no *beacon* sua intenção de transmissão. Ao receber um *beacon* um dispositivo de rede percebe que uma mensagem está pendente e dessa forma envia uma requisição para o coordenador, autorizando-o a transmitir a informação. Ao receber a autorização, o coordenador envia uma mensagem de reconhecimento informando que a autorização chegou corretamente e em seguida a informação pendente é transmitida utilizando-se o CSMA-CA *slotted*. Este procedimento é ilustrado na figura 3.5(a). Entretanto, quando a estrutura do *superframe* não está habilitada, o procedimento é ligeiramente diferente. No caso, dispositivos de rede são configurados para enviarem periodicamente mensagens ao coordenador para saber se informações estão pendentes. Caso alguma informação esteja pendente, o coordenador as envia para os dispositivos conforme a descrição da figura 3.5(b).

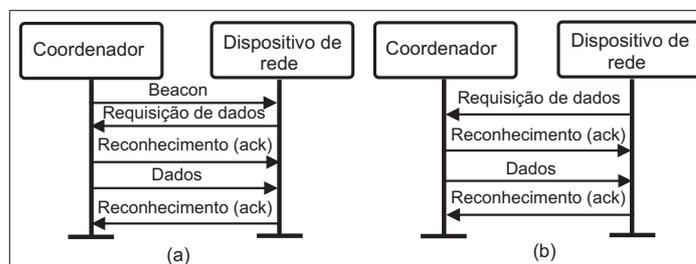


Figura 3.5: Comunicação do coordenador para um dispositivo de rede, baseado(a) ou não(b) na estrutura do *superframe*.

3.4.4 Formação da rede

Uma outra atribuição do padrão IEEE 802.15.4 relaciona-se com os mecanismos necessários para a formação da rede. Mesmo que o modo de transmissão baseado na estrutura do *superframe* esteja desabilitado, na fase de formação da rede as trocas de mensagens utilizam o *superframe*.

O mecanismo é inicializado após o coordenador principal da rede (nó *sink*) ser configurado. Este dispositivo servirá de destino para os pacotes gerados na rede. Após um nó sensor ser inicializado, uma verificação nos canais de comunicação é realizada com a finalidade de encontrar *beacons* enviados pelo coordenador principal ou por outros dispositivos que já conseguiram entrar na rede. Sem perda de generalidade, podemos classificar um dispositivo que já entrou na rede como um coordenador.

No momento que um dispositivo encontra um coordenador da rede, uma série de mensagens é trocada visando a entrada na rede por parte do dispositivo, conforme ilustrado na figura 3.6.

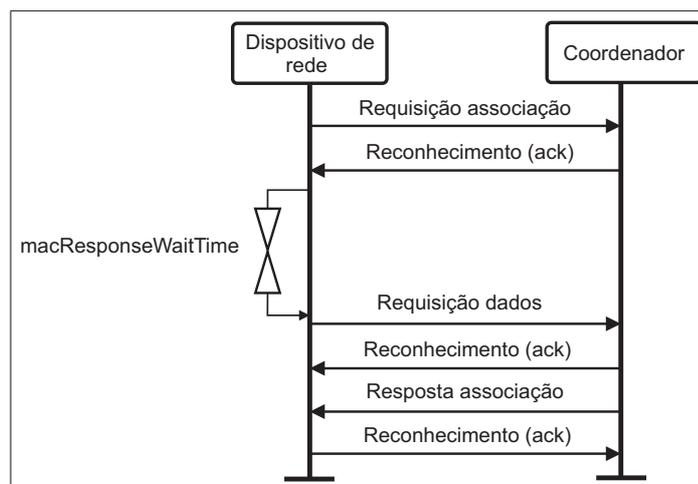


Figura 3.6: Mecanismo de formação da rede definido pelo IEEE 802.15.4.

Inicialmente, o dispositivo envia uma mensagem ao coordenador solicitando a entrada na rede. O coordenador, ao receber esta mensagem, responde com uma mensagem de reconhecimento. Nesse momento, o coordenador tem um tempo limite (*macResponseWaitTime*) para verificar a possibilidade da entrada do dispositivo na rede. Por outro lado, quando o dispositivo recebe a mensagem de reconhecimento, um atraso de (*macResponseWaitTime*) ticks ocorre. Após esse tempo, o dispositivo envia uma requisição de dados com a finalidade de confirmar a disponibilidade do coordenador em adicionar o dispositivo na rede. Em seguida mensagens de confirmação são enviadas pelo coordenador para

confirmar a entrada na rede.

Na próxima seção, as características discutidas anteriormente serão comparadas com o problema do monitoramento de poços petrolíferos terrestres.

3.5 Trabalhos relacionados

Devido o domínio do trabalho estar relacionado com o monitoramento de poços petrolíferos terrestres, nesta seção descreveremos os principais trabalhos da literatura que relacionam as Redes de Sensores Sem Fio com monitoramento industrial.

Skavhaug et al. (2008) realizaram um estudo sobre a viabilidade técnica da adoção de tecnologias *wireless* em ambientes industriais de petróleo e gás natural. Experimentos foram realizados com Redes de Sensores Sem Fio através de protocolos proprietários (*WirelessHart* e *ISA100*) e não-proprietários (*ZigBee*) em aplicações de monitoramento. Os resultados mostraram a viabilidade de utilização desta tecnologia em ambientes ruidosos na presença de outros sinais de rádios, com por exemplo, o *Wi-Fi* (*Wireless-Fidelity*).

Em Petersen et al. (2007), foi realizado um levantamento sobre os requisitos necessários para transição entre tecnologias de comunicação cabeadas e *wireless* para aplicações em ambientes industriais de petróleo e gás natural. Segurança, confiabilidade, consumo de energia, instalação, manutenção e integração com sistemas já implementados foram as métricas utilizadas pelos autores para validar a proposta. Seus experimentos, realizados com uma topologia em malha reduzida, mostraram um excelente nível de confiabilidade da rede com um consumo de energia bastante pequeno para soluções que adotaram as Redes de Sensores Sem Fio como tecnologia de comunicação.

Johnstone et al. (2007) realizaram experimentos com Redes de Sensores Sem Fio em ambientes industriais de petróleo e gás natural no monitoramento de sensores e atuadores em um controlador distribuído. Taxa de transmissão e o atraso de comunicação na rede foram as principais métricas abordadas pelos autores. Resultados mostraram que o atraso de comunicação entre 80-250ms com a solução proposta pode ser problemático para controladores PID distribuídos, entretanto para situações de malha aberta o atraso foi considerado aceitável.

Vitturi et al. (2007) conduziram um estudo sobre a introdução de tecnologias de comunicação *wireless* em ambientes industriais. Os autores desenvolveram um protocolo na camada de aplicação para avaliação dos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11. Em seus experimentos, foram adotados como métricas os intervalos de transmissão, atrasos de comunicação, introdução de ruído e a porcentagem de pacotes entregues com sucesso. Os resultados mostraram que para pequenos intervalos de transmissão a tecnologia *Wi-Fi*

demonstrou-se mais eficiente enquanto que as Redes de Sensores Sem Fio desmostraram ser mais eficientes para ambientes ruidosos.

Carlsen, Petersen & Skavhaug (2008) propuseram mudanças na camada de aplicação para as Redes de Sensores Sem Fio em aplicações de monitoramento na área de petróleo e gás natural. Os estudos realizados pelos autores visaram melhorar a integração de sistemas *wireless* com a infra-estrutura já instalada nas plantas industriais.

Krishnamurthy et al. (2005) desenvolveram uma aplicação com Redes de Sensores Sem Fio para o monitoramento de motores em navios petroleiros. Foi abordada uma topologia em malha onde falhas de dispositivos foram simuladas para que resultados relacionados com tolerância a falhas pudessem ser realizados. Confiabilidade, consumo de energia e interferência eletromagnéticas foram as outras métricas utilizadas pelos autores para validação da aplicação.

Jawhar et al. (2008) implementaram uma aplicação de monitoramento de dutos em ambientes industriais de petróleo e gás natural com a utilização de Redes de Sensores Sem Fio. Devido às limitações imposta pela aplicação, uma técnica de roteamento em linha foi adotada nos experimentos com a finalidade de reduzir os custos de instalação e manutenção dos equipamentos. O algoritmo de roteamento utilizado pelos autores é baseado na localização física dos nós sensores. Alguns dispositivos apresentam GPS enquanto que a maioria dos nós sensores descobrem suas localizações baseadas na energia do sinal recebido. Através de simulações os autores demonstraram que a estrutura proposta apresenta uma elevada porcentagem de pacotes transmitidos com sucesso além do balanceamento do consumo de energia na rede.

Munro (2007) realizou um estudo sobre o estado da arte na adoção de tecnologias *wireless* para ambientes industriais de petróleo e gás natural. Segundo o autor, soluções que adotam tecnologias de comunicação digitais para esses ambientes apresentam um aumento na produção de 10% quando comparados com as soluções que adotam tecnologias de comunicação analógica. O estudo também mostra que a adoção de soluções *wireless* pode reduzir custos operacionais anuais de aproximadamente US\$ 8 bilhões.

Carlsen, Skavhaug, Petersen & Doyle (2008) desenvolveram uma aplicação com Redes de Sensores Sem Fio para o monitoramento de uma linha de produção em uma plataforma *offshore*. Sensores de temperatura foram distribuídos ao longo da linha de produção para determinarem a diminuição do fluxo de fluidos. A diminuição da produção é um fator de grande impacto financeiro devido à elevada logística necessária para manter a produção constante. Experimentos foram realizados em laboratório com 5 nós sensores e 1 nó sink durante um período de 40 horas. Os nós sensores foram organizados em uma topologia tipo malha com uma distância máxima entre os dispositivos de 35 metros. Foi

observado nos experimentos que o número de pacotes entregues com sucesso foi de aproximadamente 100% com apenas 3-5% de pacotes retransmitidos enquanto que a latência de comunicação foi em média de 2 segundos.

Em resumo, é possível perceber que na maioria dos trabalhos relacionados com RSSF em ambientes industriais de petróleo e gás natural, a confiabilidade da rede assume um fator de grande necessidade. A relação entre o número de pacotes recebidos e enviados deve ser tão próxima do valor unitário quanto possível. Os outros fatores que também estão presentes nos trabalhos relacionados são o atraso de comunicação, tolerância a falhas e redução de custos operacionais.

Entretanto, para os trabalhos descritos anteriormente a quantidade de dispositivos utilizados nas soluções não apresentam grande escalabilidade. A quantidade de dispositivos é um fator de grande importância para as técnicas de roteamento a ser utilizadas nas soluções devido estar diretamente relacionado com o número de colisões na rede. Uma outra característica não abordada nos trabalhos descritos anteriormente foi a avaliação das técnicas de roteamento que mais se adequam aos problemas propostos. Na proposta sugerida nesse trabalho, a dificuldade de realizar experimentos com uma grande quantidade de dispositivos reais foi superada através da utilização de ferramentas computacionais onde todo o funcionamento da rede pode ser simulado. Dessa forma, a avaliação das técnicas de roteamento mais adequadas à aplicação de monitoramento de poços petrolíferos terrestres pode ser otimizada.

Capítulo 4

Proposta do trabalho

Neste capítulo será descrita a nossa proposta de trabalho no contexto das aplicações de monitoramento de poços petrolíferos terrestres com a introdução da tecnologia de Redes de Sensores Sem Fio.

A partir das características básicas da aplicação, introduzidas no Capítulo 2, pode-se perceber que a maioria das soluções atuais utiliza tecnologia *wireless* para transmitir as informações coletadas no campo até os mestres-de-campo. Entretanto, devido à utilização de rádios analógicos, um mecanismo ineficiente de comunicação mestre-escravo é utilizado. Nesse contexto, a tecnologia de Redes de Sensores Sem Fio é a principal candidata para a melhoria da eficiência dessa aplicação. Um outro pressuposto é a utilização de uma topologia em malha, que parece ser a solução de roteamento mais adequada para criar rotas alternativas com a finalidade de fornecer requisitos de tolerância a falhas. Entretanto, devido às restrições físicas dos nós sensores, mecanismos para economia do consumo de energia nas baterias também devem ser utilizados. Nesse sentido, aqui propõe-se a avaliação de técnicas de roteamento em RSSF para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres.

4.1 Estado da arte para roteamento em RSSF

Antes de inicializar nossa discussão sobre algoritmos de roteamento para RSSF, é importante dizer que esta seção não é um completo *survey* sobre o assunto, apresenta-se apenas uma breve descrição sobre os algoritmos de roteamento em RSSF adequados ao monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Para uma descrição completa sobre o assunto, as seguintes referências podem ser analisadas: [Al-Karaki & Kamal 2004, Akkaya & Younis 2005].

Roteamento em RSSF é uma área de pesquisa bastante motivadora devido às diferentes características que a distinguem das técnicas tradicionais de roteamento para comunica-

ções *wireless*. As principais diferenças estão relacionadas com o endereçamento, fluxo de dados, restrições físicas dos dispositivos e os cenários de aplicações.

Endereçamento é um tópico de elevado dinamismo para as RSSF devido às mudanças de paradigmas nos últimos anos. Tradicionalmente não tem sido sugerida a utilização do protocolo IP para RSSF devido ao elevado custo computacional imposto pelo tamanho dos cabeçalhos para os nós sensores [Al-Karaki & Kamal 2004]. Entretanto, trabalhos recentes [Sa Silva et al. 2008, Hui & Culler 2008] têm demonstrado a possibilidade de inserção do protocolo IP para as RSSF. Um grupo do IETF (*Internet Engineering Task Force*), 6LoWPAN (*IPv6 over Low Power Personal Area Networks*), introduziu uma camada adaptativa entre a pilha de protocolos IP e a camada de rede para tornar possível a transmissão de datagramas IPv6 sobre a pilha de protocolos do IEEE 802.15.4. A técnica reduz a sobrecarga do protocolo IP através da compressão dos cabeçalhos das camadas de rede e transporte.

O fluxo de dados é uma outra característica diferente presente nas RSSF quando comparada com as técnicas de comunicação tradicionais. Em RSSF, geralmente os sentidos de comunicação ocorrem entre vários nós sensores fontes para um específico nó sensor chamado *sink*. Na maioria das aplicações apenas um *sink* é utilizado, entretanto para aplicações com uma grande quantidade de dispositivos, múltiplos *sinks* podem ser adotados para criarem rotas mais curtas e conseqüentemente minimizar o consumo de energia na rede [Vincze et al. 2007]. Devido à limitada capacidade física dos nós sensores, gerenciamento de recursos deve ser implementada pelas técnicas de roteamento para estender o tempo de vida útil das aplicações.

Uma outra importante característica para as técnicas de roteamento em RSSF está relacionada com os cenários de aplicação. Em algumas situações os nós sensores podem apresentar mobilidade e em outras podem ser estacionários. Esses fatores dependem dos requisitos da aplicação.

4.1.1 Tópicos relevantes para roteamento em RSSF

Dependendo dos requisitos da aplicação, diferentes restrições são implementadas pelas técnicas de roteamento em RSSF. Uma das principais restrições relaciona-se com o fato de transmitir o maior número de informação possível com o menor consumo de energia. Sabendo que o desempenho dos algoritmos de roteamento para as RSSF é determinado pela mudança no dinamismo da rede, instalação dos nós sensores, consumo de energia, modelos de entrega de pacotes, capacidade física dos nós sensores e agregação de dados [Akkaya & Younis 2005], é de grande importância comparar essas restrições

com as características básicas do monitoramento de poços petrolíferos terrestres.

Dinamismo da rede

Existem 3 tipos básicos de dispositivos em RSSF: nós sensores, nós roteadores e *sink*. Geralmente estes dispositivos são estacionários, entretanto suporte à mobilidade pode ser explorado para otimizar o consumo de energia em algumas situações onde o tamanho das rotas para o *sink* pode ser reduzidas. Para o contexto de aplicação desse trabalho, todos os dispositivos na rede são considerados estacionários.

Instalação dos dispositivos

Essa característica está relacionada com a maneira como os dispositivos na rede são instalados no ambiente. A instalação pode ser determinística ou auto-organizável. Na primeira abordagem os nós sensores são instalados em posições previamente estabelecidas, enquanto que na abordagem auto-organizável os nós sensores são instalados aleatoriamente no ambiente. Em aplicações de monitoramento para ambientes industriais a instalação dos dispositivos ocorrem em locais previamente estabelecidos [Krishnamurthy et al. 2005, Petersen et al. 2007].

Consumo de energia

A operação que consome mais energia nos dispositivos em RSSF é a transmissão de dados. Experimentos realizados em cenários densos [Bougard et al. 2005] mostram que a transmissão de dados consome aproximadamente 50% de toda energia na rede. Portanto, soluções para otimizar a transmissão de dados devem ser implementadas para minimizar o consumo de energia. Sabendo-se que o consumo de energia para a transmissão de dados é proporcional ao quadrado da distância, a adoção de técnicas de roteamento baseado em múltiplos saltos pode ser bastante atrativo para minimização do consumo de energia, já que transmissões ficam restritas a pequenas distâncias. Essa técnica também pode ser utilizada para criar múltiplos caminhos entre a fonte e o destino.

Transmissão de dados

A transmissão de dados em RSSF é orientada a aplicação. Dependendo dos requisitos da aplicação, a transmissão de dados pode ser classificada em 4 categorias de acordo com o intervalo de comunicação, em: contínuo, dirigido a evento, dirigido a requisição

e híbrido. Para o intervalo de comunicação contínuo, informações são enviadas periodicamente para o *sink*. Intervalos de comunicação dirigidos a evento e requisição são dependentes da ocorrência de anormalidades na rede ou de requisições do *sink*, respectivamente. O intervalo de comunicação híbrido utiliza uma combinação das 3 técnicas anteriores. Para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres, intervalos de comunicação contínuo e híbrido são utilizados. Na maior parte do tempo as informações são transmitidas periodicamente dos nós sensores para o *sink*, entretanto 2 ou 3 vezes ao dia intervalos de comunicação dirigidos a requisição podem ser utilizados.

Funcionalidades dos dispositivos

Baseado nas funcionalidades dos dispositivos, as RSSF podem ser classificadas em 2 grupos distintos: homogêneos e heterogêneos. Em uma RSSF homogênea, os nós sensores são equipados com os mesmas funcionalidades físicas. O objetivo dessas redes está relacionado com a coleta e transmissão de dados para o *sink*. Trabalhos tradicionais [Su & Zhang 2006] com RSSF homogêneas procuram estender o tempo de vida útil da rede através de protocolos que minimizam o consumo de energia distribuindo a comunicação entre todos os dispositivos na rede. Por outro lado, em RSSF heterogêneas os nós sensores são equipados com diferentes funcionalidades. A principal meta dessas redes está relacionada com a combinação de características específicas de uma grande densidade de nós sensores baratos com uma pequena quantidade de nós sensores com grande potencial computacional [Marin-Perianu et al. 2008]. Para o contexto de aplicação desse trabalho, uma RSSF homogênea é usada para coletar e disseminar informações dos nós sensores para o *sink* devido os dispositivos apresentarem as mesmas características de hardware.

Agregação de dados

Agregação de dados em RSSF é considerado um tópico de grande importância devido à capacidade de minimizar o consumo de energia na rede. A união de pacotes similares provenientes de diferentes nós sensores pode reduzir consideravelmente a transmissão de dados e conseqüentemente o consumo de energia. Em [Hua & Yum 2008], o conhecimento que as informações coletadas entre nós sensores vizinhos são freqüentemente correlacionadas foram utilizados para criar agregação entre nós intermediários e conseqüentemente estender o tempo útil da rede. Para o contexto de aplicação desse trabalho, não existe um procedimento de agregação distribuída na rede. Um típico dispositivo para o processo de monitoramento de poços petrolíferos terrestres apresenta sensores de diversos tipos (temperatura, pressão, vazão, humidade e vibração). No momento da transmissão,

as informações coletadas são transportadas no mesmo pacote de dados.

4.2 Classificação dos algoritmos de roteamento em RSSF

Algoritmos de roteamento em RSSF são classificados de acordo com a maneira como os nós sensores adquirem rotas para o *sink* ou baseados na estrutura da rede [Jiang & Manivannan 2004]. Na primeira classificação, os algoritmos de roteamentos podem ser divididos em proativos, reativos ou híbridos. Nas técnicas proativas, as rotas são computadas antecipadamente e na maioria das vezes antes delas serem realmente necessárias. Por outro lado, nas técnicas reativas as rotas são computadas sob demanda. As técnicas híbridas utilizam uma combinação das 2 técnicas anteriores.

Assim como na primeira classificação dos algoritmos de roteamento, a segunda categoria é dividida em 3 protocolos [Al-Karaki & Kamal 2004]: planos, hierárquicos e baseados em localização. Na técnica de roteamento plano, todos os nós sensores são considerados com as mesmas funcionalidades e prioridades. Nos algoritmos hierárquicos, os nós sensores podem ser organizados em grupos e possuem diferentes funcionalidades. Por fim, os algoritmos baseados em localização utilizam a posição física dos nós sensores para criarem rotas válidas ao *sink*.

Devido à característica de ser dirigida a aplicação, em RSSF a estrutura da rede apresenta grande dependência da aplicação. Portanto, a maneira como os nós sensores descobrem rotas é diretamente influenciada por esse contexto. Baseado nessas características, nesse trabalho a estrutura da rede foi utilizada como métrica para organizar os protocolos de roteamento.

4.2.1 Roteamento plano

Nos algoritmos de roteamento plano todos dispositivos apresentam a mesma funcionalidade e comportamento. A principal meta é a transmissão de informações dos nós sensores para o *sink* através de múltiplos saltos. A maioria dos trabalhos relacionados com roteamento plano [Al-Karaki & Kamal 2004, Akkaya & Younis 2005, Jiang & Manivannan 2004, Lee & Lee 2008] em RSSF indicam que atribuir identificadores globais para todos os nós sensores é impraticável devido à grande quantidade de dispositivos existentes em uma aplicação típica. Dessa forma, mudanças no paradigma de roteamento baseado em endereçamento para roteamento orientado a dados devem ser usados para encontrar eficientes rotas. Vários trabalhos têm desenvolvido algoritmos de roteamento orientados a dados, como: *SPIN*, *Directed Diffusion*, *Rumor*, *MCFA* e *GBR* [Al-Karaki &

Kamal 2004]. Por outro lado, para o contexto de aplicação desse trabalho, os nós sensores são compostos por diferentes sensores e conseqüentemente o identificador de cada sensor não é realmente necessário porque todas as informações dos sensores são transmitidas em apenas um pacote em cada nó sensor. Dessa forma, cada nó sensor pode ser globalmente identificado utilizando roteamento baseado em endereçamento. Uma solução típica baseada em roteamento plano dirigido a endereçamento é o clássico algoritmo AODV (*Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing*) [Perkins & Royer 1999].

O AODV é um algoritmo de roteamento que pode ser classificado como um protocolo reativo. Foi desenvolvido para operar inicialmente sobre redes *ad hoc* onde as topologias são dinamicamente alteradas devido à mobilidade dos dispositivos ou falhas nos equipamentos. Para o contexto de aplicação desse trabalho, todos nós sensores no ambiente são considerados estacionários. Dessa forma, o dinamismo na rede é caracterizado apenas por falhas nos dispositivos.

Nesse protocolo, um mecanismo de descoberta de rotas é usado para encontrar caminhos através de mensagens em *broadcasting*. Basicamente, quando um dispositivo tem informação pendente para ser transmitida e não existe uma rota válida em sua tabela de roteamento para o destino, mensagens de requisição de rotas (RREQ) são enviadas para todos os nós vizinhos. Mensagens RREQ são encaminhadas na rede entre os dispositivos até que uma rota para o destino seja encontrada. Dispositivos intermediários aprendem dinamicamente as rotas para os destinos e armazenam as rotas reversas das mensagens RREQ em suas tabelas de roteamento. Esta operação é descrita na figura 4.1a. Após o destino ser alcançado, uma mensagem de resposta (RREP) é enviada para o dispositivo que gerou a mensagem RREQ através da rota reversa. Diferentes mensagens RREP podem ser recebidas pela fonte onde a rota que apresentar o menor custo será escolhida. Esta operação é descrita na figura 4.1b.

Devido ao algoritmo AODV ter sido projetado para operar em redes com propriedade de mobilidade e topologia dinâmica, mecanismos para verificar se uma determinada rota está ativa foi desenvolvido em Perkins & Royer (1999). Mensagens definidas como “HELLO” são enviadas para todos dispositivos ao longo das rotas com a finalidade de manutenção, como descrito na figura 4.1c. Durante um determinado intervalo de tempo, se nenhuma mensagem HELLO foi recebida por um dispositivo em uma determinada rota, é considerado que uma falha no enlace ocorreu. Para propagar essa informação na rede, dispositivos enviam mensagens de advertência (ERR) em *broadcasting* como descrito na figura 4.1d. Após receber uma mensagem ERR, um dispositivo atualiza sua tabela de roteamento.

As mensagens de controle HELLO e ERR podem facilmente inundar a rede e con-

seqüentemente, elevar o consumo de energia relacionado com o processo de transmissão. Para o contexto das RSSF, essas mensagens não são adequadas devido à limitação física dos nós sensores. Mensagens de controle do padrão IEEE 802.15.4 [IEEE 2006] relacionadas com a mudança no estado dos dispositivos de órfão para ativos podem ser usados com a finalidade de eliminar a necessidade das mensagens HELLO e ERR. Um dispositivo é considerado órfão no padrão IEEE 802.15.4 quando a contatado com o *sink* é perdido. A camada MAC utiliza a variável *macMaxFrameRetries* (valor padrão é 3) para determinar o número de mensagens de reconhecimento (ACK) não recebidas. Quando o valor dessa variável é alcançado, o estado órfão é ativado e novas rotas para o *sink* devem ser processadas.

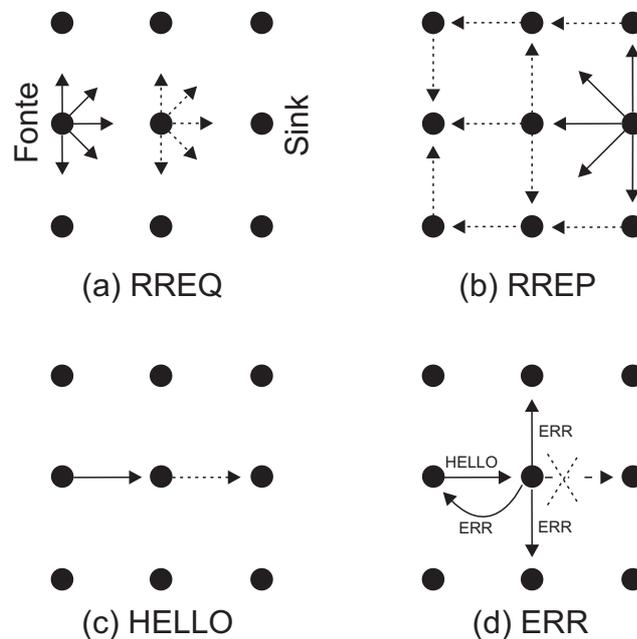


Figura 4.1: Mensagens de controle para o algoritmo AODV.

4.2.2 Roteamento hierárquico

Ao contrário dos algoritmos de roteamento plano, no roteamento hierárquico alguns dispositivos na rede podem assumir diferentes funcionalidades [Lee & Lee 2008]. Um algoritmo típico de roteamento hierárquico divide a rede em grupos. Dispositivos específicos, chamados nós líderes, controlam a operação dentro de cada grupo. Geralmente a comunicação entre dispositivos em um grupo e o líder ocorre através de um único salto. Dispositivos líderes podem agregar informações dos outros dispositivos no grupo e enviar os dados para o *sink* através de uma comunicação ponto a ponto. Devida essas caracterís-

ticas, os algoritmos de roteamento hierárquico também são chamados de algoritmos em duas camadas. Sabendo que os dispositivos líderes são os que mais atuam na rede, métodos de escolha aleatório dos líderes podem ser implementadas para otimizar o consumo de energia na rede.

Um dos primeiros algoritmos de roteamento hierárquico proposto para as RSSF foi o LEACH (*Low-energy adaptive clustering hierarchy*) [Heinzelman et al. 2000]. O principal objetivo desse protocolo é formar grupos de dispositivos na rede de uma maneira auto-organizável. A técnica é baseada em rodadas de tempo onde a rede é dinamicamente modificada para distribuir os dispositivos líderes nos grupos. Os autores tem estimado que apenas 5% dos nós sensores precisam ser líderes na rede.

O mecanismo que controla as operações no LEACH é organizado em 4 fases bem definidas: anúncio, instalação do grupo, escalonamento, transmissão de dados. Na fase de anúncio, os dispositivos líderes são escolhidos. Cada nó sensor escolhe um número aleatório entre 0 e 1. Um nó sensor se torna líder se o número escolhido é menor do que a seguinte relação:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p * (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{se } n \in G, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

onde p é a porcentagem de nós sensores que podem ser líderes, r é o número atual de rodadas e G é o conjunto de nós sensores que ainda não foram selecionados para líder nas últimas $1/p$ rodadas. Após um nó sensor ter sido selecionado como líder, mensagens de anúncio são enviadas em *broadcasting* na rede. Na fase de instalação do grupo, todos os dispositivos que não se tornaram líderes decidem em qual grupo se juntar baseado na força do sinal das mensagens de anúncio. Na fase de escalonamento, os dispositivos líderes sincronizam os tempos de transmissão dos nós sensores baseados em técnicas de TDMA (*Time Division Multiple Acces*). Finalmente, na fase de transmissão o líder de um grupo agrega todas as informações dos nós sensores e enviam os dados para o *sink* através de uma comunicação ponto a ponto.

Para o contexto de aplicação desse trabalho, todos nós sensores são considerados homogêneos. Todos os dispositivos apresentam as mesmas características de hardware e limitações físicas. Dessa forma, sabendo que os nós líderes no algoritmo LEACH adotam comunicação ponto a ponto para transmitir informações ao *sink*, o consumo de energia para a transmissão de dados pode ser proibitivo para grandes distâncias.

Ao contrário das técnicas de roteamento baseado em grupos, os algoritmos de roteamento baseados em estrutura de árvore podem fornecer uma melhor eficiência energética

em relação a transmissão de dados. Nessa abordagem apenas é permitido comunicação entre dispositivos localizados próximos um dos outros. Um típico algoritmo de roteamento baseado em árvore para RSSF é o HERA (*Hierarchical Routing Algorithm*) [Cuomo et al. 2007]. Este algoritmo utiliza as mensagens de formação da rede no padrão IEEE 802.15.4 para criar uma dependência pai-filho entre os dispositivos. Quando um nó sensor é ligado, uma varredura automática para descobertas de coordenadores é executada. Sem perda de generalidade, um coordenador pode ser o *sink* ou qualquer outro dispositivo que já conseguiu entrar na rede. Mensagens de associação são enviadas em *broadcasting* até um coordenador ser encontrado. Trocas de mensagens entre o coordenador e o dispositivo ocorrem até o nó sensor entrar na rede.

A figura 4.2 descreve um exemplo do algoritmo de roteamento HERA. Inicialmente os nós sensores são instalados no ambiente conforme descrito na figura 4.2a. Em seguida, o algoritmo HERA utiliza as mensagens do padrão IEEE 802.15.4 para criar a topologia lógica baseada na estrutura de árvore como descrito na figura 4.2b. Nesse exemplo, foi considerado que o nó sensor indexado com o valor 5 é considerado o *sink* e que a maneira como os nós sensores conseguem entrar na rede é aleatória.

Mecanismo de tolerância a falhas sugerido ao HERA

Uma característica que ainda não tem sido explorada no algoritmo HERA está relacionada com as propriedades de tolerância a falhas. Nessa seção sugerimos uma solução para essa abordagem.

Como este algoritmo usa as mensagens de controle do padrão IEEE 802.15.4, o estado de órfão nos dispositivos pode ser utilizado para determinar falhas de comunicação na rede. Por exemplo, na figura 4.2b a comunicação entre os nós sensores 2 e 5 foi quebrada devido à falha no nó 2. Conseqüentemente, o nó 1 perdeu a rota para o *sink*. Após o número máximo de tentativas de retransmissão (*macMaxFrameRetries*), o nó sensor 1 configura seu estado para órfão. Novas mensagens de associação baseadas no padrão IEEE 802.15.4 são enviadas pelo nó sensor 1 modificando a topologia da rede conforme descrito na figura 4.2c.

4.2.3 Roteamento baseado em localização

Nessa categoria de algoritmos de roteamento, nós sensores utilizam informações de suas posições físicas com a finalidade de descobrirem rotas para o *sink* [Akkaya & Younis 2005].

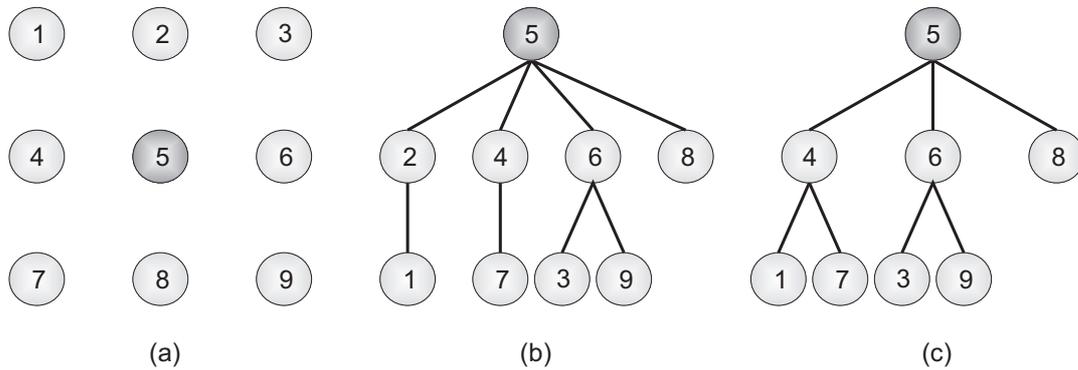


Figura 4.2: (a) Topologia física. (b) Topologia lógica. (c) Reconfiguração.

Segundo Boukerche et al. (2007), para esse grupo de algoritmos de roteamento, os nós sensores podem ser classificados em 3 categorias de acordo com o conhecimento e a maneira como conseguem adquirir informações de suas posições em: terminais desconhecidos, resolvidos e âncoras. Os terminais desconhecidos são os nós sensores que apresentam nenhuma informação sobre sua localização física. A maneira como esses dispositivos estimam sua posições tem influência direta nos sistemas de localização. Os nós sensores resolvidos são aqueles que utilizam técnicas de sistemas de comunicação para estimar suas posições físicas. Por fim, os dispositivos âncoras são aqueles que dispensam o uso de técnicas de localização pois apresentam dispositivos de posicionamento global, como por exemplo, GPS.

Ainda seguindo a classificação proposta por Boukerche et al. (2007) mais relacionando os componentes dos sistemas de localização, temos que os principais fatores levados em consideração pelos algoritmos baseados em posição são: distância e ângulo entre os dispositivos.

A distância e o ângulo entre dois dispositivos são bastante importantes para estimação da posição física. Diferentes métodos podem ser usados para estimar os valores dessas duas variáveis. Os principais métodos são os baseados no tempo de propagação, ângulo de chegada e potência de transmissão. Alguns métodos são mais precisos (tempo de propagação e ângulo de chegada), porém apresentam um custo computacional maior e necessitam de *hardware* adicional, enquanto que outras técnicas apresentam resultados menos confiáveis porém com um custo computacional reduzido (potência recebida) sem a necessidade de *hardware* adicional. Segundo Moreira (2007), os métodos baseados nessas três variáveis apresentam resultados ruidosos devido às distorções existentes no canal de comunicação. O ruído dos dados faz com que a estimação da posição física dos dispositivos apresentem erros consideráveis.

Para os diferentes algoritmos de roteamento baseado em localização, pode-se perce-

ber em Akkaya & Younis (2005), que a grande maioria das soluções (APS, RPE, MECN, GAF e GEAR) utilizam apenas alguns poucos sensores dotados de GPS. Os dispositivos que não apresentam GPS procuram estimar a posição física baseado em técnicas de intersecção que mapeiam o alcance de comunicação em zonas de intersecção com figuras geométricas (triângulos, círculos e quadrados).

No contexto de aplicação desse trabalho, nenhuma informação sobre a posição física dos nós sensores são fornecida, bem como hardware adicional para o cálculo do ângulo e tempo de propagação entre os dispositivos na rede. Dessa forma, não é sugerido a utilização de algoritmos baseados em localização em nosso trabalho.

4.3 Algoritmo de roteamento AODV modificado

O principal problema do algoritmo de roteamento AODV está relacionado com o grande *overhead* de mensagens de controle transmitidas na rede. Para o contexto das Redes de Sensores Sem Fio, essas mensagens podem ser proibitivas em relação ao consumo de energia já que a transmissão de dados é a operação mais custosa do ponto de vista energético.

Uma maneira de minimizar a carga imposta pelas mensagens de controle no algoritmo AODV está relacionada com a otimização no procedimento de descobertas de rotas. Nesse trabalho, um procedimento para o relaxamento do mecanismo de descobertas de rotas é proposto. Nessa nova abordagem, mensagens de controle RREQ não são propagadas na rede caso um dispositivo não apresente em sua tabela de rotas um caminho válido para o *sink*. Os dispositivos apenas transmitem mensagens de controle RREQ para seus vizinhos como descrito na figura 4.3a. Esse procedimento faz com que um dispositivo só consiga rota para o *sink* quando pelo menos um dos seus vizinhos tenha uma rota válida. Em consequência, os dispositivos localizados mais próximos do *sink* recebem mensagens RREP primeiro que os outros dispositivos localizados em zonas mais distantes conforme descrito na figura 4.3b. Um dispositivo é configurado para enviar mensagens de controle RREQ periodicamente até receber uma mensagens RREP confirmando a descoberta da rota. Assim como no algoritmo AODV original, várias mensagens RREP podem ser recebidas, entretanto a mensagem com o menor custo (algoritmo de menor caminho) será escolhida para satisfazer a rota desejada. A figura 4.3c mostra um exemplo para retransmissão de mensagens de controle RREQ.

No próximo capítulo, serão apresentados os resultados das simulações de cenários para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres com a utilização das RSSF. Para tal, serão comparados o desempenho de três algoritmos de roteamento: AODV, AODV

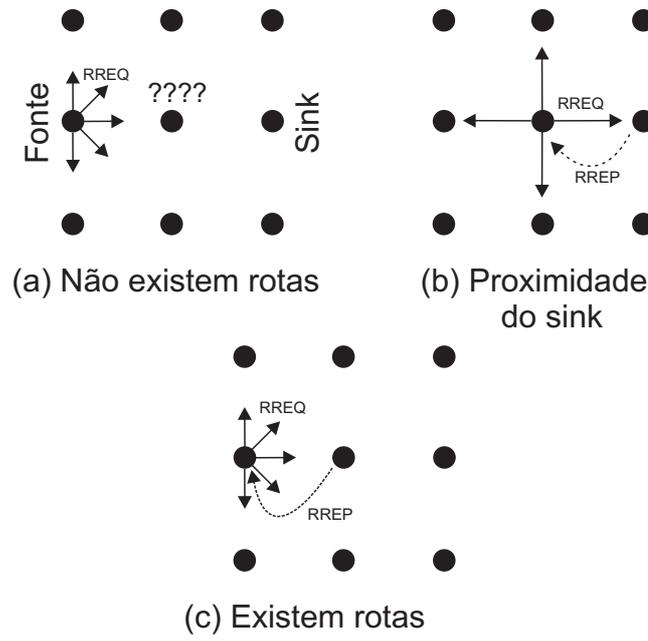


Figura 4.3: Otimização para descobertas de rotas no AODV.

modificado (proposto nessa dissertação) e o HERA.

Capítulo 5

Simulações e Análise dos Resultados

Neste capítulo serão descritos os resultados obtidos com a introdução das RSSF na aplicação de monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Todos os resultados foram produzidos através de simulações computacionais realizadas na ferramenta *Network Simulator 2.33* [Fall & Varadhan 2008] (NS-2).

5.1 Introdução sobre a ferramenta de simulação NS-2

NS-2 é um simulador de redes *OpenSource* baseado em eventos discretos. Implementado em C++ e na linguagem de *script* OTcl, o NS-2 não oferece suporte nativo para as RSSF. A implementação do padrão IEEE 802.15.4 na ferramenta foi realizada por Jianliang & Myung (2004). Esse módulo é largamente utilizado no meio científico.

O procedimento básico de utilização da ferramenta NS-2 é ilustrado na figura 5.1. Inicialmente devem ser criados a topologia e o padrão de tráfego da rede. Em seguida, parâmetros de *hardware* devem ser configurações tais como modelo de antenas, tipo de propagação do rádio, tamanho dos *buffers* de recepção e transmissão, alcance do rádio, potência de transmissão e recepção, tipo dos nós sensores (RFD ou FFD), tipo de comunicação (baseada ou não em *beacon*) e a frequência de transmissão.

Todas essas configurações são introduzidas em um *script* OTcl, onde uma instância do simulador é executada. Um arquivo de *log* contendo todos os eventos gerados durante a simulação e animações gráficas correspondentes a esses eventos são gerados a partir da execução do simulador. Por fim, dados estatísticos podem ser extraídos dos arquivos de *log* a partir de um *script* para processamento de texto.

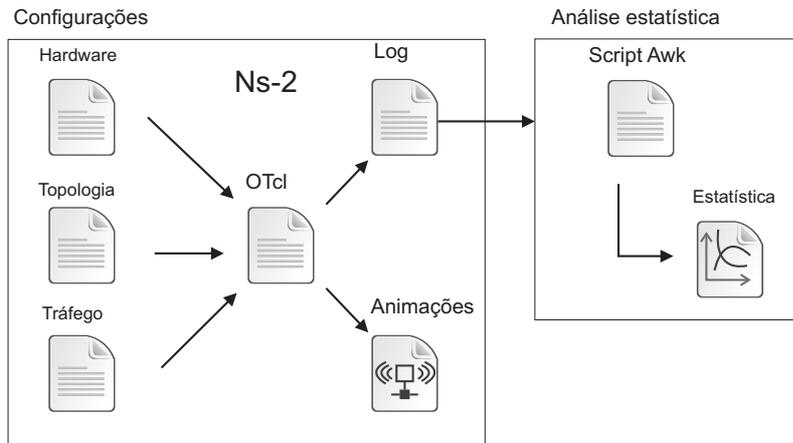


Figura 5.1: Estrutura de simulação no *Network Simulator 2.33*.

5.2 Cenário de simulação

Para validação do trabalho, foi utilizado uma topologia real de unidades de produção de petróleo baseado em bombeio mecânico, construída a partir de imagens de satélite. Cada ponto na figura 5.2 representa uma unidade de bombeio como ilustrada na figura 2.1, enquanto que o ponto maior ao centro representa o mestre de campo. A topologia é formada por 116 poços. A distância entre os poços varia entre 40-300 metros. Para o contexto desse trabalho, cada poço é representado como um nó sensor, enquanto que o mestre de campo funciona com um nó sink. Os rádios dos nós sensores foram configurados para um alcance máximo de 250 metros com potências de transmissão e recepção, respectivamente, de 61mW e 44mW. Essas configurações são baseadas no rádio CC2520 [CC2520 2008] da Texas Instruments.

Para avaliação dos algoritmos de roteamentos mais adequados para o contexto da aplicação desse trabalho, foram implementados na ferramenta de simulação ns-2 os algoritmos de roteamento AODV, AODV modificado e o HERA. A avaliação foi baseada nas seguintes métricas: *throughput* relativo (relação entre o número de pacotes recebidos e enviados), atraso fim-a-fim (intervalo de tempo entre um pacote ser enviado pela fonte e ser recebido pelo destino), número de colisões, número de mensagens de controle para descobertas de rotas e o consumo de energia nos dispositivos.

Basicamente, quando um nó sensor é ligado nesses algoritmos de roteamento, um procedimento de descoberta de rotas para o nó sink é inicializado como descrito no Capítulo 4. A ordem de inicialização dos nós sensores podem ser exploradas para melhorar o desempenho de descoberta de rotas para o nó sink. Nesse trabalho foram adotadas duas

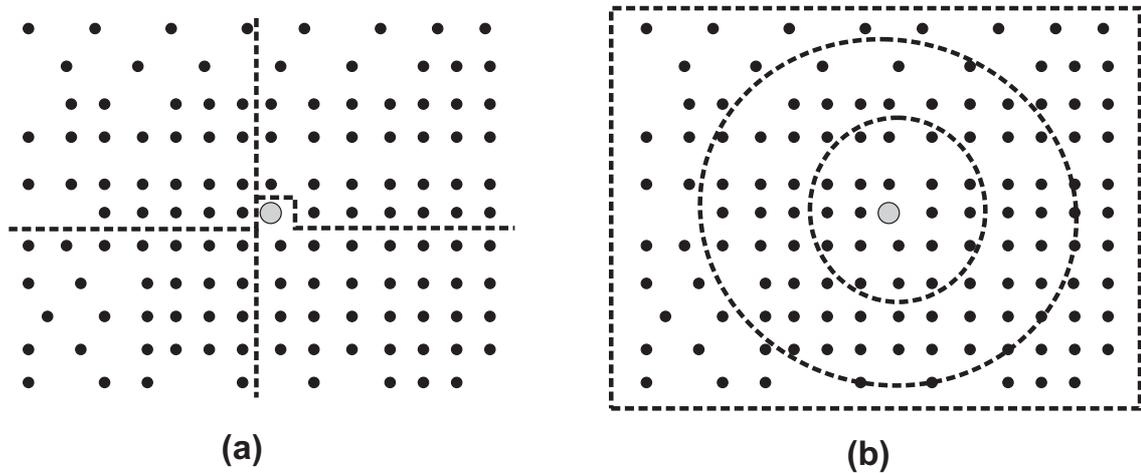


Figura 5.2: Inicialização da rede: (a) Aleatória (b) Sequência.

abordagem de inicialização: aleatória e seqüencial. Na primeira técnica, a topologia é dividida em 4 regiões onde os nós sensores são aleatoriamente inicializados. Esta técnica é representada na figura 5.2a. Por outro lado, na segunda técnica os nós sensores mais próximos do nó sink são inicializados primeiro, enquanto que os nós sensores mais distantes do nó sink são inicializados por último, conforme descrito na figura 5.2b.

Antes de começar a discursão sobre os experimentos realizados é preciso avaliar o número de simulações necessárias para obter resultados estatísticos confiáveis. A métrica adotada em nossos experimentos foi o *throughput* relativo, que corresponde à relação entre o número de pacotes recebidos e enviados. Essa métrica foi escolhida pois é muito importante para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres ter uma grande porcentagem de pacotes entregues com sucesso. A ferramenta estatística utilizada foi o desvio padrão por ser uma boa métrica para avaliação do índice de variabilidade dos dados.

Diferentes simulações foram realizadas onde pode-se perceber através da figura 5.3 que a partir de 25 simulações por configuração a métrica estatística adotada apresenta variação desprezível. Dessa forma, para todos os experimentos realizados nesse trabalho foram feitos 25 simulações para cada configuração diferente.

As outras configurações dos experimentos estão relacionadas com o intervalo de transmissão, tamanho dos pacotes de dados e duração das simulações. Todas essas informações foram baseadas em pesquisa de campo realizada em aplicações reais de monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Nas soluções atuais para essas aplicações, a transmissão de dados ocorre em intervalos de 12 minutos. Intervalos menores não são suportados devido à limitação da tecnologia de comunicação adotada. Dessa forma, nos experimentos realizados diferentes intervalos de comunicação foram explorados. O tamanho dos pacotes

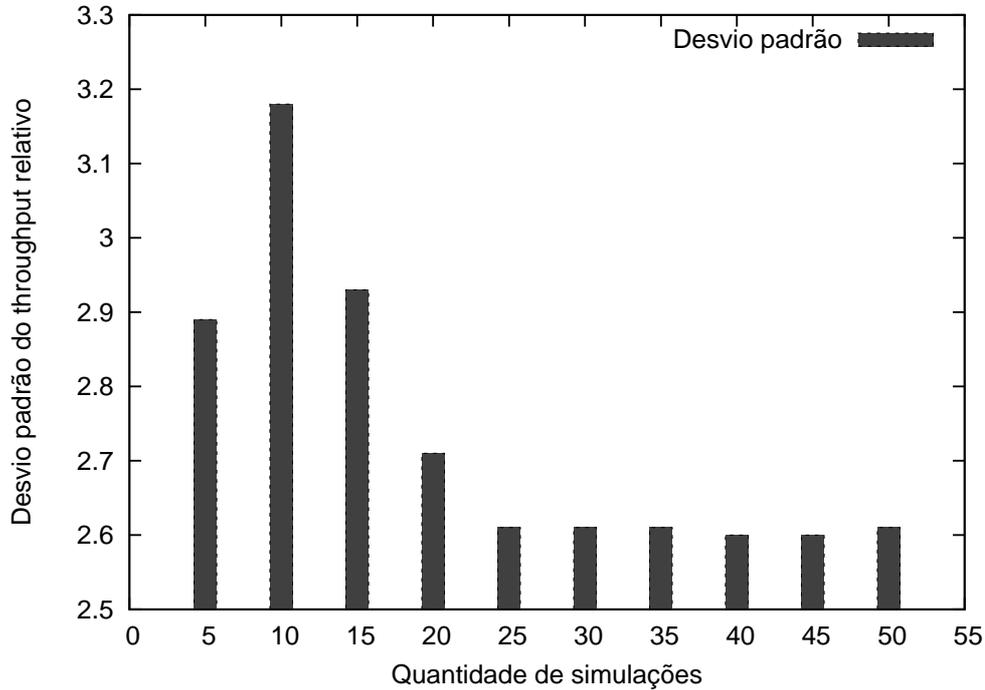


Figura 5.3: Determinação do número de experimentos baseado em métricas estatísticas.

de dados foram configurados para o tamanho padrão de 90bytes, conforme descrição encontrada na pesquisa de campo realizada. A duração de cada experimento realizado nesse trabalho foi de 50000 segundos. Esse valor corresponde a um intervalo de monitoramento cujos dados foram obtidos na pesquisa de campo realizada. A tabela 5.1 descreve a configuração das principais variáveis na ferramenta de simulação NS-2 para as simulações realizadas.

Tabela 5.1: Configuração dos parâmetros de simulação.

Configuração de <i>Hardware</i>	
Canal de comunicação	Channel/WirelessChannel
Modelo de propagação	Propagation/TwoRayGround
Tipo da fila	Queue/DropTail/PriQueue
Tamanho da fila	50
Camada Física	Phy/WirelessPhy/802_15_4
Camada MAC	Phy/WirelessPhy/802_15_4
CSThresh	6.25e-17
RXThresh	36.25e-17
Frequência	2.4GHz
Consumo de energia	
Potência de transmissão	61.92 mW
Potência de recepção	44.40 mW
Idle	2.40 μ W
Sleep	1.44 nW
Parâmetros da topologia	
Algoritmo de roteamento	AODV,AODV-modificado,HERA
Área	1420m x 1000m
Alcance	250m
Topologia	Malha
Número de dispositivos	117
Trafégo de dados	
Taxa constante	15s - 720s
Tamanho do pacote	90bytes
Tempo de simulação	50000s
Parâmetros do algoritmo AODV e AODV modificado	
Expiração da rota	10000s
Tentativas de mensagens RREQ	3
Expiração de RREQ	10s
TTL inicial	5
TTL incremento	2
TTL limite	15
Diâmetro da rede	30
Hello intervalo	10s
Expiração RREP	15s
Dados estatísticos	
Tempo média de uma simulação	10minutos
Tamanho médio do log	800MB

5.3 Resultados

5.3.1 Throughput relativo

O primeiro resultado a ser discutido está relacionado com o throughput relativo. Em geral, os pacotes não são entregues por causa de colisões na rede. Devido ao grande *overhead* proporcionado pelo algoritmo AODV para descobertas de rotas observa-se que a porcentagem de pacotes entregues com sucesso é muito inferior aos demais algoritmos de roteamento. Para a abordagem com inicialização aleatório dos nós sensores, é possível perceber através da figura 5.4 que o algoritmo HERA apresenta melhor desempenho em relação ao número de pacotes entregues com sucesso do que as outras técnicas de roteamento analisadas. Este fato é decorrente do baixo *overhead* para descobertas de rotas proposto pelo algoritmo. Em relação à modificação sugerida ao AODV, pode-se perceber que o relaxamento do mecanismo para descobertas de rotas resulta em um desempenho superior em relação à porcentagem de pacotes entregues com sucesso quando comparado com o AODV original.

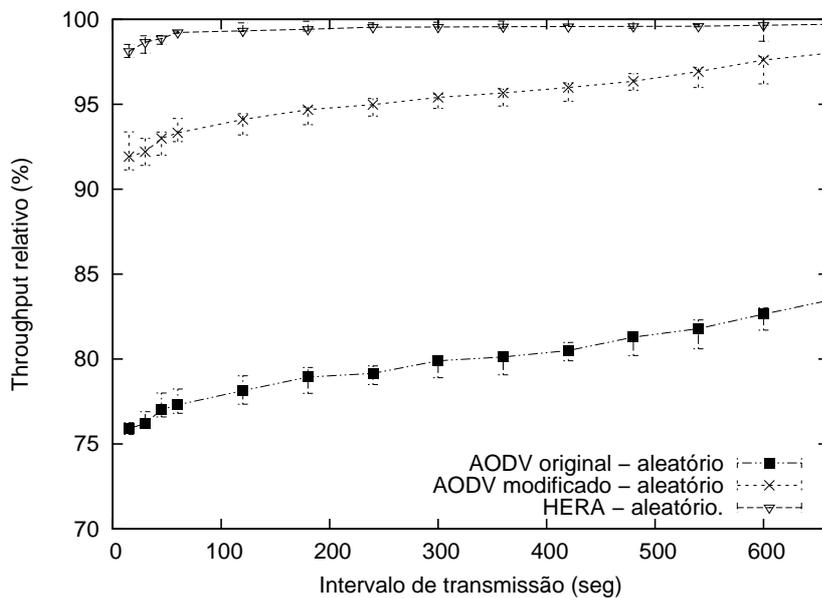


Figura 5.4: Confiabilidade da rede para inicialização aleatória.

Para abordagem que utiliza inicialização dos nós sensores em seqüência, pode-se perceber que há uma melhoria para os três algoritmos em relação à porcentagem de pacotes entregues com sucesso (figura 5.5). As melhorias são mais perceptíveis nos algoritmos baseados em AODV. O fato dos nós sensores mais próximos do nó *sink* serem inicializados primeiros faz com que o *overhead* para descoberta de rotas seja relaxado, já que ao

iniciar um nó sensor existe grande probabilidade de ter um vizinho com uma rota para o nó *sink*. Para este tipo de abordagem, a modificação sugerida ao AODV apresenta desempenho similar ao algoritmo HERA.

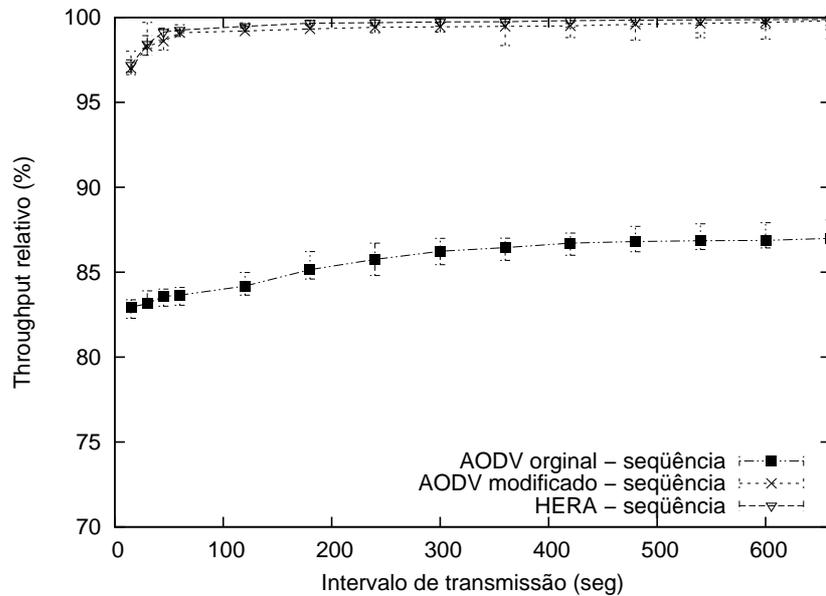


Figura 5.5: Confiabilidade da rede para inicialização em seqüência.

5.3.2 Número de colisões

Em relação ao número de colisões, para a abordagem com inicialização aleatória é esperado um maior número de colisões devido à pequena probabilidade de se ter um vizinho com uma rota para o nó *sink* ao se iniciar a configuração da rede. As técnicas baseadas em AODV apresentam um maior número de colisões, de acordo com a figura 5.6, do que as obtidas com o algoritmo HERA. Este resultado é devido principalmente ao grande *overhead* relacionado à descoberta de rotas proporcionado pelas técnicas baseadas no AODV. Entretanto, é possível notar que as mudanças sugeridas no algoritmo AODV proporcionam um menor número de colisões quando comparado à técnica AODV original, pois isto se deve ao relaxamento no procedimento de descobertas de rotas.

Por outro lado, quando os nós sensores são inicializados em seqüência, pode-se perceber que o número de colisões diminuiu nas três abordagens (figura 5.7). Mais uma vez o resultado está diretamente relacionado com o procedimento para descobertas de rotas. Para esta configuração a modificação sugerida ao AODV teve um resultado minimamente superior ao HERA para pequenos intervalos de transmissão. Essa pequena diferença está

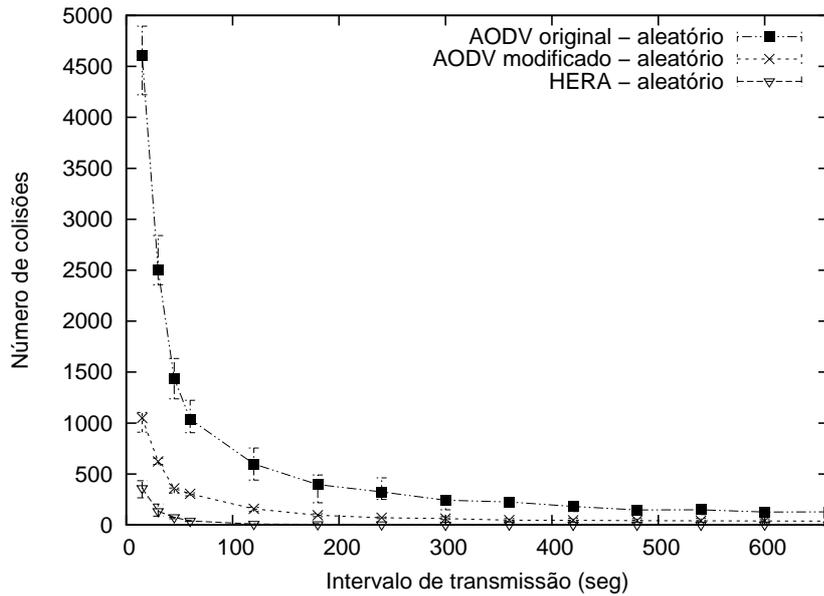


Figura 5.6: Número de colisão para inicialização aleatória.

relacionada com o fato que as mudanças sugeridas ao AODV usam como métrica de descobertas de rotas o menor caminho, enquanto que o HERA é baseado na primeira resposta de rota. Perceba que o número de colisões está de acordo com os resultados do *throughput* relativo, onde os melhores resultados foram relacionados com os menores números de colisões.

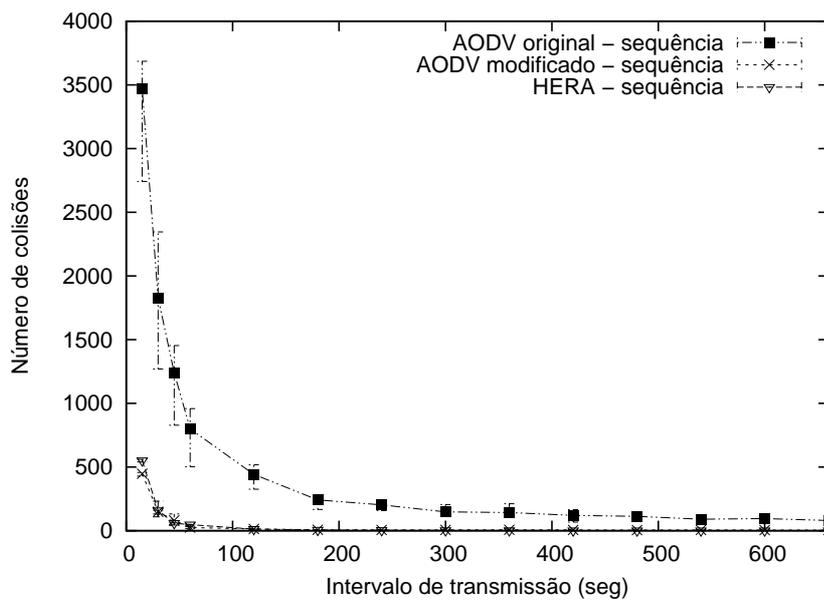


Figura 5.7: Número de colisões para inicialização em sequência.

5.3.3 Mensagens de controle

Devido à grande influência das mensagens de controle nos algoritmos de roteamento baseado em AODV, é necessário avaliar o *overhead* de mensagens em cada algoritmo. Uma avaliação dessas mensagens para o algoritmo HERA não é necessário devido à quantidade de mensagens trocadas pelos nós sensores baseadas no IEEE 802.14.5 ser muito pequena quando comparada com as baseadas em AODV. A figura 5.8 mostra o número de pacotes de controle enviados na rede para os algoritmos de roteamento baseado em AODV.

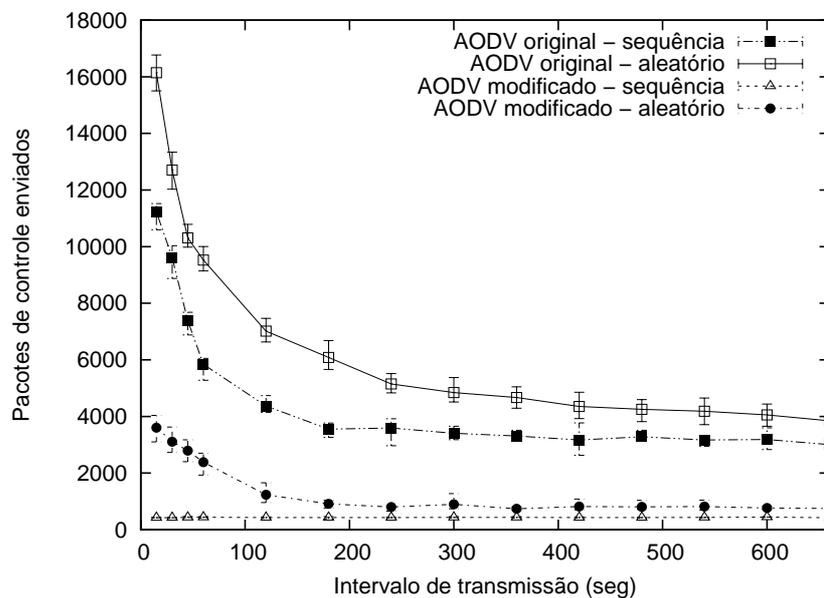


Figura 5.8: Número de pacotes de controle enviados.

Para a abordagem baseada na inicialização aleatória, o *overhead* do algoritmo AODV original é em média 5 vezes maior do que o algoritmo com as modificações sugeridas. Por outro lado, quando a abordagem de inicialização baseada em seqüência foi utilizada, o *overhead* imposto pelo algoritmo AODV original é em média 11 vezes maior. Esse resultado mostra claramente a redução do número de pacotes de controle na rede quando o relaxamento para o descobrimento de rotas foi implementado no algoritmo de roteamento AODV.

5.3.4 Atraso fim-a-fim

Uma outra importante característica em um algoritmo de roteamento é o atraso fim-a-fim. Quando a abordagem baseada na inicialização aleatório foi utilizada, pode-se perce-

ber através da figura 5.9 que as técnicas de roteamento AODV apresentam um desempenho bastante inferior quando comparado ao HERA, devido principalmente ao *overhead* de mensagens proporcionado por esses algoritmos. Em relação à modificação sugerida ao AODV, pode-se perceber que o atraso fim-a-fim é superior ao AODV original. Este resultado é devido principalmente ao relaxamento do procedimento para descobertas de rotas onde mensagens de descoberta de rotas não são enviadas em *broadcasting*. Nesse contexto, no AODV modificado um nó sensor ao ser inicializado leva algum tempo para descobrir uma rota devido à aleatoriedade de inicialização dos seus vizinhos.

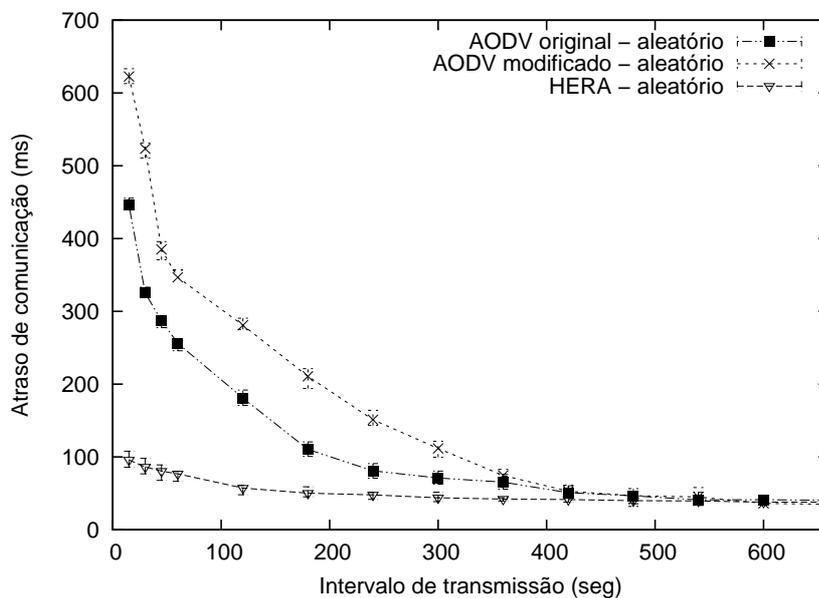


Figura 5.9: Latência da rede baseado na inicialização aleatória.

Entretanto, quando a abordagem de inicialização baseada em seqüência foi utilizada, pode-se perceber através da figura 5.10 que o atraso fim-a-fim das 3 técnicas apresentam um desempenho superior quando comparado com a abordagem de inicialização aleatória. Por outro lado, para esse contexto o algoritmo HERA apresenta um atraso fim-a-fim superior aos algoritmos baseado em AODV, devido ao fato de não ser utilizado a métrica do menor caminho para descobertas de rotas. A exceção ocorre para os intervalos de comunicação inferiores a 30 segundos, onde o algoritmo AODV original apresenta grande atraso fim-a-fim em decorrência do *overhead* de troca de mensagens. Os menores atrasos fim-a-fim foram observados no algoritmo com as mudanças sugeridas ao AODV. Assim, quando os nós sensores são inicializados em seqüência o relaxamento do mecanismo para descobertas de rotas apresenta uma excelente adaptação.

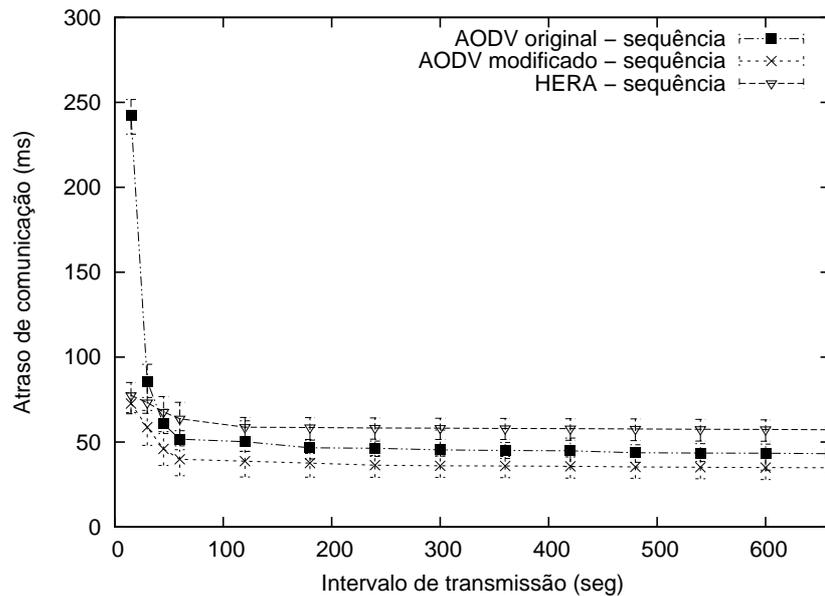


Figura 5.10: Latência da rede baseado na inicialização em sequência.

5.3.5 Consumo de energia

A última métrica analisada em nossos experimentos está relacionada com o consumo de energia na rede para os três algoritmos de roteamento estudados. A figura 5.11 descreve um histograma do consumo de energia em cada nó sensor, cuja identificação é baseada em um endereço de 1 byte. Os nós sensores com identificação entre 20 e 80 estão localizados mais próximos do nó sink (endereço 53).

Independente da forma como os nós sensores são inicializados, pode-se perceber através da figura 5.11 que os três algoritmos de roteamento analisados concentram o consumo de energia para os nós sensores localizados próximos do nó sink. Esse resultado já era esperado pois a existência de apenas um destino na rede (nó sink) faz com que os dispositivos próximos ao nó sink apresentem alta probabilidade de participação em rotas de comunicação.

Quando o consumo médio de energia foi analisado na rede, o algoritmo HERA apresentou um desempenho inferior quando comparado com os algoritmos baseados em AODV como descrito na figura 5.12. Este resultado é devido à métrica de melhor caminho e um mecanismo dinâmico de descobertas de rotas não ser utilizado no algoritmo, fazendo-se com que alguns dispositivos sempre participem de determinadas rotas. Em relação aos algoritmos baseados no AODV, foi observado que o algoritmo com as mudanças propostas apresentou um consumo médio de energia inferior ao AODV original. Este resultado é devido ao relaxamento para descobertas de rotas que elimina a necessidade de trans-

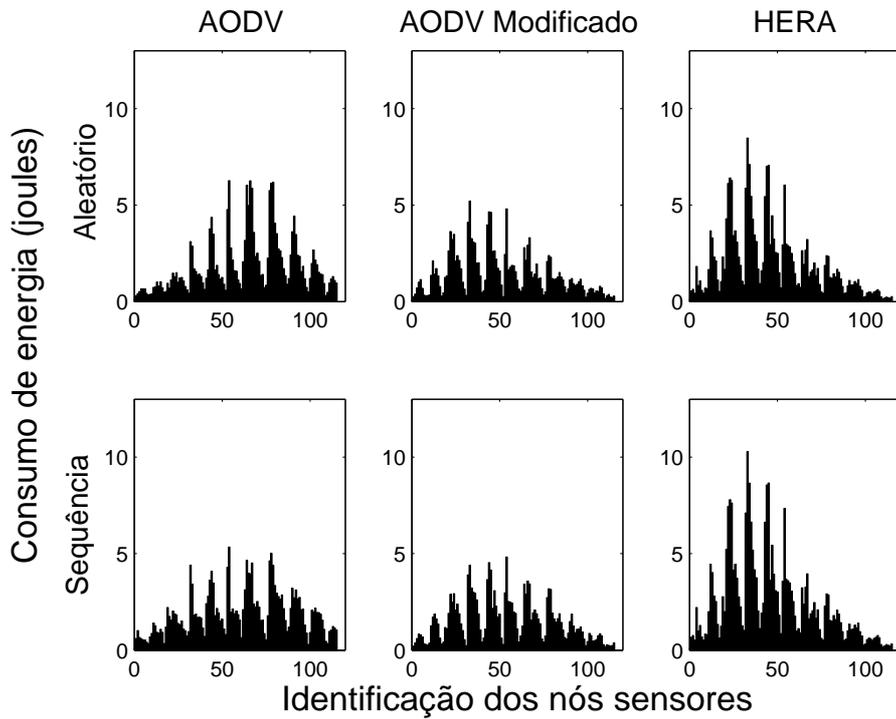


Figura 5.11: Histograma do consumo de energia na rede.

missão de descobertas de rotas completas e conseqüentemente minimiza o consumo de energia.

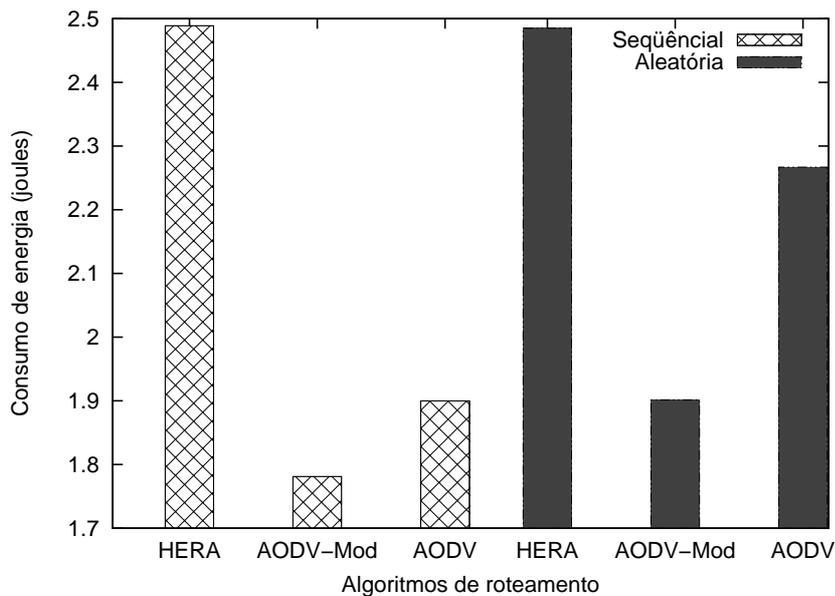


Figura 5.12: Consumo de energia médio dos algoritmos de roteamento para a inicialização aleatória e seqüencial.

É interessante observar a influência na forma como os dispositivos são inicializados no consumo médio de energia na rede. Percebe-se através da figura 5.12 que o algoritmo HERA apresentou um desempenho semelhante para o consumo médio de energia nas duas formas de inicialização da rede enquanto que os algoritmos baseados em AODV teve seus desempenhos modificados. O algoritmo HERA apresentou resultados semelhantes devido a forma como a estrutura da rede é criada. Com a utilização das mensagens padrões do IEEE 802.15.4, independente da forma como os dispositivos são inicializados, os nós sensores mais próximos do *sink* entram na rede primeiro que os nós sensores localizados em zonas mais distantes. Por outro lado, os algoritmos baseados em AODV apresentaram melhores resultados para a inicialização em seqüência. A forma como os nós sensores são inicializados faz com que o procedimento de descobertas de rotas nesses algoritmos sejam otimizados e conseqüentemente o consumo de energia é minimizado, pois algumas mensagens de controle não necessitam ser transmitidas.

Capítulo 6

Conclusão

Nesse trabalho foram avaliados os principais requisitos relacionados com uma aplicação de monitoramento de poços petrolíferos terrestres para as Redes de Sensores Sem Fio. Através de uma pesquisa de campo realizada em ambientes industriais de petróleo e gás natural foram obtidos dados reais sobre o domínio dessa aplicação. Foi percebido que as soluções atuais adotam rádios e técnicas de roteamento ineficientes para o monitoramento dos dados. Rádios analógicos utilizados impedem que vários dispositivos de campo enviem informação ao mesmo tempo. Técnicas de roteamento utilizadas adotam comunicação ponto-a-ponto onde nenhum mecanismo de tolerância a falhas é suportado.

Dentro desse contexto, diferentes técnicas de roteamento para RSSF foram analisadas baseadas nas características peculiares dessa aplicação. Os algoritmos que mais se adequaram as restrições impostas pela aplicação foram o AODV e HERA. Uma modificação relacionada com o relaxamento para a descobertas de rotas foi proposto ao algoritmo AODV com a finalidade de diminuir o número de colisões e otimizar o consumo de energia na rede. Na avaliação dos algoritmos foram utilizadas as seguintes métricas: forma como os dispositivos são inicializados, *throughput* relativo, número de colisões, atraso fim-a-fim, quantidade de mensagens de controle transmitidas e a distribuição do consumo de energia na rede.

Em geral, o algoritmo AODV apresentou resultados ineficientes para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres devido à baixa porcentagem de pacotes entregues com sucesso independente da forma como os nós sensores são inicializados. A grande quantidade de colisões provocadas pelo *overhead* de mensagens para descoberta de rotas fazem com que este algoritmo apresente um desempenho inferior quando comparado com os outros algoritmos de roteamento estudados. Por outro lado, as mudanças sugeridas no procedimento para descobertas de rotas podem diminuir o *overhead* das mensagens de controle e conseqüentemente melhorar a eficiência do algoritmo AODV.

Os resultados mostram que o algoritmo AODV modificado e o algoritmo HERA apre-

sentam características conflitantes dependendo da maneira como os nós sensores são inicializados. Quando os nós sensores são inicializados de uma forma aleatória, o algoritmo HERA apresenta um desempenho superior do que o algoritmo AODV modificado em relação à porcentagem de pacotes entregues com sucesso e o atraso fim-a-fim da rede. Por outro lado, quando os nós sensores são inicializados em seqüência a porcentagem de pacotes entregues com sucesso para o algoritmo HERA e o algoritmo AODV modificado apresentaram resultados similares. Entretanto, para o atraso fim-a-fim da rede, o algoritmo AODV modificado apresentou melhores resultados que o HERA. Este resultado é devido ao fato do algoritmo HERA não utilizar a métrica de menor caminho para o procedimento de descoberta de rotas.

Em relação ao consumo de energia na rede, o algoritmo HERA apresentou os piores resultados independente da forma como os nós sensores são inicializados. Este resultado demonstra que o relaxamento no procedimento para descobertas de rotas para o AODV modificado pode ser explorado para economizar a energia dos nós sensores. Entretanto, em ambos protocolos, nós sensores localizados próximos do nó sink apresentam um consumo de energia mais acentuado quando comparado com nós sensores localizados em zonas mais distantes.

No geral, os resultados obtidos mostram que a tecnologia de RSSF é bastante viável para prover comunicação em aplicações de monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Em termos específicos, os algoritmos HERA e o AODV modificado foram os que obtiveram os melhores resultados para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Os resultados também indicaram que a forma como os dispositivos são inicializados tem impacto no desempenho dos algoritmos. Na inicialização aleatória, o algoritmo HERA se mostrou mais adequado devido à alta porcentagem de pacotes entregues com sucesso, apesar de apresentar um maior consumo de energia. Porém, para o contexto de aplicação desse trabalho, a porcentagem de pacotes entregues com sucesso é o índice mais importante. Por outro lado, quando a inicialização em seqüência for utilizada, o algoritmo AODV modificado foi a técnica que obteve os melhores resultados em virtude da excelente relação entre atraso, confiabilidade e consumo de energia.

Fazendo uma comparação com a solução atual, baseada em rádios analógicos, para o problema de monitoramento de poços petrolíferos terrestres, podemos perceber que a introdução do algoritmo HERA e do AODV modificado com uma topologia em malha pode viabilizar intervalos de comunicação menores do que os encontrados atualmente. Nos experimentos realizados foi observado que o número de pacotes entregues com sucesso foram superiores a 95% para intervalos de comunicação inferiores a 1 minuto. Atualmente, devido à limitação física das soluções analógicas adotadas, o intervalo de comunicação

apresenta uma média de 12 minutos.

Como sugestão para trabalhos futuros, a introdução de técnicas para compressão de dados pode ser adotada nos dispositivos com a finalidade de eliminar a necessidade de transmitir informações redundantes para a aplicação. Dessa forma, o consumo de energia na rede pode ser minimizado já que o processo de transmissão é otimizado.

6.1 Publicações

Para consolidação da proposta sugerida neste trabalho, duas publicações em conferências e um trabalho a ser submetido a uma revista foram realizadas. Na primeira publicação abordou-se a avaliação do consumo de energia nas RSSF através da adoção de um algoritmo de compressão enquanto que na segunda publicação explorou-se os aspectos da aplicação de monitoramento de poços petrolíferos terrestres com a utilização das RSSF. A terceira publicação relaciona as técnicas de roteamento em RSSF para a aplicação de monitoramento em ambientes industriais de petróleo e gás natural.

1. Ivanovitch Silva, Luiz Affonso, Francisco Vasques. Performance Evaluation of a Compression Algorithm for Wireless Sensor Networks in Monitoring Applications. *13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 15-18 Setembro de 2008, Hamburg, Germany.
2. Ivanovitch Silva, Luiz Affonso. Aplicações de Redes de Sensores Sem Fio em Monitoramento de Poços Petrolíferos Terrestres. Rio Oil & Gas Expo and Conference, 15-18 Setembro de 2008, Rio de Janeiro.
3. Ivanovitch Silva, Luiz Affonso, Francisco Vasques. Wireless Sensor Network Application for Monitoring Oil & Gas Environment. Revista a ser definida.

Referências Bibliográficas

- Akkaya, Kemal & Mohamed F. Younis (2005), 'A survey on routing protocols for wireless sensor networks', *Ad Hoc Networks* **3**(3), 325–349.
- Al-Karaki, J. N. & A. E. Kamal (2004), 'Routing techniques in wireless sensor networks: a survey', *IEEE Wireless Communications* **11**(6), 6–28.
- Bougard, Bruno, Francky Catthoor, Denis C. Daly, Anantha Chandrakasan & Wim Dehaene (2005), Energy efficiency of the iee 802.15.4 standard in dense wireless micro-sensor networks: Modeling and improvement perspectives, *em 'DATE '05: Proceedings of the conference on Design, Automation and Test in Europe'*, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, pp. 196–201.
- Boukerche, A., H.A.B. Oliveira, E.F. Nakamura & A.A.F. Loureiro (2007), 'Localization systems for wireless sensor networks', *Wireless Communications, IEEE* **14**(6), 6–12.
- Carlsen, S., S. Petersen & A. Skavhaug (2008), Layered software challenge of wireless technology in the oil and gas industry, *em 'Software Engineering, 2008. ASWEC 2008. 19th Australian Conference on'*, pp. 37–46.
- Carlsen, Simon, Amund Skavhaug, Stig Petersen & Paula Doyle (2008), 'Using wireless sensor networks to enable increased oil recovery', *Emerging Technologies and Factory Automation, 2008. ETFA 2008. IEEE International Conference on* pp. 1039–1048.
- CC2520 (2008), *CC2520 Datasheet: 2.4GHz IEEE 802.15.4/ZigBee RF Transceiver*, TEXAS INSTRUMENTS.
URL: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2520.pdf>
- Costa, Rutácio Oliveira (2005), *Curso de bombeio mecânico*, 2ª edição, Petrobras.
- Cuomo, F., S. Della Luna, U. Monaco & F. Melodia (2007), 'Routing in zigbee: Benefits from exploiting the iee 802.15.4 association tree', *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on* pp. 3271–3276.

- Fall, K. & K. Varadhan (2008), *The ns manual (formerly ns notes and documentation)*.
- Frederico, Carlo Pereira de Siqueira Campos (2006), Estudo e especificação de um sistema de instrumentação para unidades de elevação de petróleo utilizando tecnologia sem fio, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN.
- Gungor, V. C. & F. C. Lambert (2006), 'A survey on communication networks for electric system automation', *Comput. Netw.* **50**(7), 877–897.
- Hart, Wireless (2007), *HART Field Communication Protocol Specification, Revision 7.0*, HART Communication Foundation,.
- Heinzelman, W.R., A. Chandrakasan & H. Balakrishnan (2000), 'Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks', *System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on* pp. 10 pp. vol.2–.
- Hua, Cunqing & T.-S.P. Yum (2008), 'Optimal routing and data aggregation for maximizing lifetime of wireless sensor networks', *Networking, IEEE/ACM Transactions on* **16**(4), 892–903.
- Hui, J.W. & D.E. Culler (2008), 'Extending IP to low-power, wireless personal area networks', *Internet Computing, IEEE* **12**(4), 37–45.
- IEEE, Standard (2006), *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE Computer Society, Revision of IEEE Std 802.15.4-2003.
- ISA100 (2007), *ISA100.11a, Release 1 - An Update on the First Wireless Standard Emerging from the Industry for the Industry*, ISA100 Standards Committee.
- Jawhar, I., N. Mohamed, M.M. Mohamed & J. Aziz (2008), 'A routing protocol and addressing scheme for oil, gas, and water pipeline monitoring using wireless sensor networks', *Wireless and Optical Communications Networks, 2008. WOCN '08. 5th IFIP International Conference on* pp. 1–5.
- Jiang, Qiangfeng & D. Manivannan (2004), 'Routing protocols for sensor networks', *Consumer Communications and Networking Conference, 2004. CCNC 2004. First IEEE* pp. 93–98.

- Jianliang, Zheng & J. Lee Myung (2004), 'A comprehensive performance study of IEEE 802.15.4', *IEEE Press. Book* .
- Johnstone, Ian, James Nicholson, Babar Shehzad & Jeff Slipp (2007), Experiences from a wireless sensor network deployment in a petroleum environment, *em 'IWCMC '07: Proceedings of the 2007 international conference on Wireless communications and mobile computing'*, ACM, New York, NY, USA, pp. 382–387.
- Krishnamurthy, Lakshman, Robert Adler, Phil Buonadonna, Jasmeet Chhabra, Mick Flanagan, Nandakishore Kushalnagar, Lama Nachman & Mark Yarvis (2005), Design and deployment of industrial sensor networks: experiences from a semiconductor plant and the north sea, *em 'SenSys '05: Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems'*, ACM, New York, NY, USA, pp. 64–75.
- Lee, Heesang & Kyuhong Lee (2008), 'Energy minimization for flat routing and hierarchical routing for wireless sensor networks', *Sensor Technologies and Applications, 2008. SENSORCOMM '08. Second International Conference on* pp. 735–742.
- Marin-Perianu, R. S., J. Scholten, P. J. M. Havinga & P. H. Hartel (2008), 'Cluster-based service discovery for heterogeneous wireless sensor networks', *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems* **23**(4), 325–346.
- Moreira, Rafael Barbosa (2007), Análise de técnicas de localização em redes de sensores sem fio, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP.
- Munro, M. (2007), 'First mile wireless and beyond: Future applications for wireless in oil and gas', *EUROCON, 2007. The International Conference on "Computer as a Tool"* pp. 2659–2662.
- Nascimento, João Maria Araújo (2005), Simulador computacional para poços de petróleo com método de elevação artificial por bombeio mecânico, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN.
- Perkins, Charles E. & Elizabeth M. Royer (1999), Ad-hoc on-demand distance vector routing, *em 'In Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications'*, pp. 90–100.

- Petersen, S, P. Doyle, S. Vatland & Dag Sjong (2007), 'Requirements, drivers and analysis of wireless sensor network solutions for the oil and gas industry', *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation* pp. 219–226.
- Roden, Martin S. (1991), *Analog and digital communication systems (3rd ed.)*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- Sa Silva, J., R. Ruivo, T. Camilo, G. Pereira & F. Boavida (2008), 'Ip in wireless sensor networks issues and lessons learnt', *Communication Systems Software and Middleware and Workshops, 2008. COMSWARE 2008. 3rd International Conference on* pp. 496–502.
- Santos, Sergio Torres (2007), *Redes de sensores sem fio em monitoramento e controle*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Silva, Ivanovitch M. D., Luiz Affonso Guedes & Francisco Vasques (2008), 'Performance evaluation of a compression algorithm for wireless sensor networks in monitoring applications', *Emerging Technologies and Factory Automation, 2008. ETFA 2008. IEEE International Conference on* pp. 672–678.
- Skavhaug, A., Myhre B., Dag Sjong, Mikkelsen E., Jan Hendrik, Sansom M., Paula Doyle, Simon Carlsen & Stig Petersen (2008), A survey of wireless technology for the oil and gas industry, *em* 'Intelligent Energy', Society of Petroleum Engineers, Amsterdam, RAI.
- Sohraby, Kazem, Daniel Minoli & Taieb Znati (2007), *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*, Wiley-Interscience.
- Su, Hang & Xi Zhang (2006), 'Power-efficiency data gathering schemes for wireless sensor networks', *Computer Communications and Networks, 2006. ICCCN 2006. Proceedings. 15th International Conference on* pp. 328–333.
- Thomas, José Eduardo (2004), *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, 2ª edição, Interciência, Rio de Janeiro, RJ.
- Vincze, Zoltan, Rolland Vida & Attila Vidacs (2007), 'Deploying multiple sinks in multi-hop wireless sensor networks', *Pervasive Services, IEEE International Conference on* pp. 55–63.

- Vitturi, S., I. Carreras, D. Miorandi, L. Schenato & A. Sona (2007), Experimental evaluation of an industrial application layer protocol over wireless systems, *em 'Industrial Informatics, IEEE Transactions on'*, pp. 275 – 288.
- Willig, A. (2008), 'Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection', *Industrial Informatics, IEEE Transactions on* **4**(2), 102–124.
- ZigBee (2007), *ZigBee PRO Specification*, ZigBee Alliance.