



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

KÁSSIO LEONARDO DA SILVA MACHADO

**ROTEAMENTO MULTICAMADA BASEADO EM
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DE
ENLACE PARA REDES DE SENSORES SEM FIO**

BELÉM-PA

Fev / 2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Machado, Kássio Leornado da Silva, 1987-
Roteamento multicamada baseado em eficiência
energética e qualidade de enlace para redes de
sensores sem fio / Kássio Leornado da Silva
Machado. - 2012.

Orientador: Eduardo Coelho Cerqueira.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,
2012.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2.
Comutação por pacotes (transmissão de dados).
3. Redes de sensores. I. Título.

CDD 22. ed. 621.38456

KÁSSIO LEONARDO DA SILVA MACHADO

**ROTEAMENTO MULTICAMADA BASEADO EM
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DE ENLACE
PARA REDES DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação submetida à banca julgadora na
Universidade Federal do Pará como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Mestre em
Computação Aplicada

Orientador: Dr. Eduardo Coelho Cerqueira

BELÉM-PA

Fev / 2012

KÁSSIO LEONARDO DA SILVA MACHADO

**ROTEAMENTO MULTICAMADA BASEADO EM
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DE
ENLACE PARA REDES DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação submetida à banca julgadora na
Universidade Federal do Pará como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Mestre
em Computação Aplicada

Aprovada em: --/--/----

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira
Universidade Federal do Pará
Orientador

Prof. Dr. Antonio Alfredo Ferreira Loureiro
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Eduardo Freire Nakamura
Universidade Federal do Amazonas

Às minhas famílias: de sangue e de amigos.

Agradecimentos

A pesquisa descrita nessa dissertação não seria possível sem a ajuda de inúmeras pessoas a minha volta, portanto eu gostaria de agradecer.

À Deus pelo dom da vida e todos os ensinamentos de valor. Agradeço a minha família por todo o suporte durante o tempo de estudos intensos para a realização deste trabalho, em especial a minha mãe Mara Machado que sempre esteve disposta a entender a minha ausência dentro de casa e nas reuniões de família, e ao meu pai Dr. José Saldanha que sempre incentivou e manteve a sua e a minha calma nos momentos mais difíceis, com seus conselhos sábios tem me dado um suporte de valor inestimável desde que nasci.

Agradeço também aos amigos de todas as horas, capazes de tudo por essa pesquisa como se fosse própria. Amigos como Alexandre Debona, Dionisio Ribeiro, Anderson Damasceno, Murilo Menezes e Diego Salim, que nunca pouparam esforços para contribuir de qualquer forma no meu desenvolvimento desde a graduação.

Ao laboratório GERCOM que forneceu todo o suporte de infraestrutura necessária para um acadêmico: computadores, café e bons amigos, sempre dispostos a contribuir e ajudar na jornada. Sou grato ao grupo de Redes Sem Fio com sua experiência e ao grupo de Redes de Sensores Sem Fio com seus excelentes membros que respiram entusiasmo, comprometimento e força de vontade. Obrigado aos amigos Denis do Rosário e Thiago Fernandes que são peças fundamentais da arquitetura desse trabalho.

Agradeço ao grande mentor e amigo, que dividiu comigo todos os desafios e vitórias, aquele que abriu inúmeras portas e grandes oportunidades, um dos melhores exemplos de ser humano e profissional que conheço, professor Dr. Eduardo Cerqueira.

Resumo

A pesquisa apresentada nesta dissertação descreve a elaboração de um protocolo de roteamento para aplicações de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) em cidade inteligentes com forte restrição de energia e alta densidade de nodos. Através do estudo dos principais objetivos da comunicação de dados e do levantamento do estado-da-arte sobre os protocolos de roteamento e tecnologias para RSSF, a proposta contempla requisitos como: vazão de dados, confiabilidade de entrega e eficiência energética. A pesquisa apresenta em detalhes o protocolo AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector), bem como sua relevância no contexto de RSSF devido a sua popularidade entre as plataformas de dispositivos comercializados. Além disso, são apresentados protocolos derivados do AODV, e a ausência de uma proposta robusta capaz de contemplar os requisitos levantados. O protocolo REL (Routing by Energy and Link Quality) é o resultado da pesquisa levantada e a proposta de solução para roteamento plano sob demanda baseado em eficiência energética e qualidade de enlace para prover um roteamento escalável, capaz de realizar balanceamento de carga e prolongar o tempo de vida da rede. O protocolo REL foi avaliado através de simulação e tesbed, a fim de garantir validação da proposta em ambiente real de escala reduzida e simulado de alta densidade. Os resultados mostraram que o protocolo REL apresenta considerável melhoria de entrega de dados através da escolha de enlaces confiáveis de transmissão e menos suscetíveis a erro, além de moderado consumo de energia capaz de prolongar o tempo de vida da rede, evitando a saturação prematura de nodos.

Abstract

Abstract of Dissertation presented to UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Applied Computing.

Multilayer Routing Based On Energy Efficiency and Link Quality for Wireless Sensor Networks

Advisor: Dr. Eduardo Coelho Cerqueira

Key words: Sensors Networks; Routing; Energy Efficiency; Link Quality.

This Thesis describes the development of a new routing protocol for Wireless Sensor Networks (WSN) for energy restriction and scenarios with high density of nodes. Through the study of the main goals of data communication and the state of the art on the routing protocols and technologies for WSN, this proposal has the following requirements throughput, reliability on data delivery and energy-efficiency. The study presents in detail the AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) protocol and its relevance in the context of WSN, due to the fact of its popularity among the devices. Additionally, it is presented the proposed extensions for AODV and their main drawbacks to provide the required goals. The REL (Routing by Link Energy and Quality) protocol is the result of this research and the proposed solution for on-demand routing protocol for plan architecture based on energy-efficiency and link quality, in order to provide scalability, load balancing and prolong the network lifetime. The REL protocol was evaluated by using simulation and tesbed experiments in order to show its impact and benefits in real and simulated scenarios. The results presents that REL increases the data delivery rate due to the use of reliable links with less probability of error. Additionally, it uses energy issues to select routes, which avoid the fast saturation of nodes and increase the network lifetime.

Sumário

1	Introdução	p. 2
1.1	Redes de Sensores Sem Fio	p. 2
1.1.1	Conceitos Básicos e Desafios	p. 3
1.1.1.1	Eficiência Energética	p. 3
1.1.1.2	Redes de Múltiplos Saltos	p. 4
1.1.1.3	Roteamento	p. 4
1.1.1.4	Multicamada	p. 6
1.1.1.5	Múltiplos Caminhos	p. 6
1.2	Objetivos	p. 6
1.3	Estrutura e organização	p. 7
2	Tecnologias Relacionadas	p. 8
2.1	Família IEEE 802	p. 8
2.2	Padrão IEEE 802.15.4	p. 9
2.2.1	Camada Física	p. 9
2.2.1.1	Link Quality Indicator	p. 11
2.2.2	Camada MAC (Medium Access Control)	p. 11
2.3	Padrões de Comunicação	p. 12
2.3.1	ZigBee	p. 12
2.3.2	WirelessHART	p. 13

2.3.3	Sun Microsystems	p. 14
2.4	Motes	p. 15
2.4.1	ZigBee - XBee	p. 15
2.4.2	MEMSIC	p. 15
2.4.3	SunSPOT	p. 16
2.4.4	Visão Geral	p. 17
2.4.5	Conclusão	p. 17
3	Trabalhos Relacionados	p. 19
3.1	Protocolo AODV	p. 19
3.1.1	Visão Geral	p. 19
3.1.2	Formato de Mensagens	p. 21
3.1.2.1	Route Request (RREQ)	p. 21
3.1.2.2	Route Reply (RREP)	p. 22
3.1.2.3	Route Error (RERR)	p. 23
3.1.2.4	Route Reply Ack	p. 24
3.2	Processo de Descoberta de Rotas	p. 24
3.2.0.5	Geração de RREQ	p. 24
3.2.0.6	Geração de RREP	p. 25
3.2.0.7	Controle de Erro e Mensagens RERR	p. 26
3.2.1	Conclusão	p. 27
3.3	Protocolo LABILE	p. 27
3.3.1	Limiares e Analisador Léxico	p. 28
3.3.2	Conclusão	p. 28
3.4	Protocolo GAODV	p. 29
3.4.1	Conclusão	p. 31
3.5	Energy-Efficient Unicast Routing Protocol	p. 31
3.5.1	Conclusão	p. 32
3.6	Conclusão	p. 33

4 Roteamento Multicamada Baseado em Energia e Qualidade de En-

lace	p. 34
4.1 Aplicabilidade e Definição	p. 34
4.2 Modo de Compatibilidade	p. 35
4.2.1 Requisição de Rotas	p. 35
4.2.1.1 Métrica WeakLinks	p. 35
4.2.2 Resposta e Seleção de Rotas	p. 37
4.2.2.1 Mensagem RREP e o Processo de Seleção de Rotas	p. 37
4.2.3 Mensagem de Controle RADV	p. 38
4.3 Modo Otimizado	p. 39
4.3.1 Diferenças e Melhorias	p. 39
4.3.2 Roteamento Multipath e Tabela de Rotas	p. 41
5 Resultados de Testbed e Simulações	p. 43
5.1 Testbed	p. 43
5.2 Simulação	p. 48
5.3 Conclusão	p. 51
6 Conclusões	p. 55
6.1 Perspectivas de Trabalhos Futuros	p. 56
6.1.1 Publicações e Disseminação de informação	p. 56
Referências	p. 57

Lista de Figuras

Figura 1	Canais e faixas de frequência do padrão IEEE 802.15.4[1]	10
Figura 2	Modos de operação da camada MAC [1]	11
Figura 3	Estrutura do <i>superframe</i> utilizado no modo <i>beacon-enable</i> [2]	12
Figura 4	Estrutura da pilha de protocolos segundo o padrão ZigBee [3]	13
Figura 5	Pilha de protocolos da arquitetura Sun Microsystems [4]	14
Figura 6	Mote XBee fabricado pela empresa Digi International	15
Figura 7	Mote MicaZ, TelosB e IRIS, respectivamente, fabricados pela empresa MEMSIC	16
Figura 8	Mote SunSPOT fabricado pela empresa Sun Microsystems [4]	17
Figura 9	Mensagem de requisição de rota (RREQ) do protocolo AODV	21
Figura 10	Mensagem de resposta de rota (RREP) do protocolo AODV	22
Figura 11	Mensagem de notificação de erro (RERR) do protocolo AODV	23

Figura 12	Mensagem de confirmação de recebimento do RREP (RREP-ACK) ...	24
Figura 13	Processamento das mensagens RREQ(a) e RREP(b), respectivamente	29
Figura 14	Analisador léxico para escolha de rotas	30
Figura 15	Períodos antes(a) e depois(b) do processo de definição de G_n	30
Figura 16	Processamento de mensagens RREQ segundo G-AODV	31
Figura 17	Mensagem de controle RREQ do protocolo REL	36
Figura 18	Processo de classificação dos enlaces da rota segundo a métrica WeakLinks	36
Figura 19	Mensagem de controle RREP do protocolo REL	37
Figura 20	Processo de seleção de rotas	38
Figura 21	Mensagem de controle RADV do protocolo REL	39
Figura 22	Mensagem RREQ segundo o protocolo REL otimizado	40
Figura 23	Mensagem RREP segundo o protocolo REL otimizado	41
Figura 24	Processamento da mensagem RADV	41
Figura 25	Experimento de LQI_{th} obtidos a partir de testbed utilizando o rádio CC2420	44
Figura 26	Topologia e disposição dos nodos no experimento de testbed	45
Figura 27	Energia residual durante o primeiro experimento utilizando os protocolos AODV e REL	46

Figura 28	Resultados de entrega de pacotes durante o primeiro experimento	.....	46
Figura 29	Energia residual durante o segundo experimento utilizando os protocolos AODV e REL	.....	47
Figura 30	Resultados de entrega de pacotes durante o segundo experimento	.....	47
Figura 31	Variação do limiar de número de saltos $HCdiff_{max_allow}$ para o cenário de 100 nodos	.....	49
Figura 32	Resultado de pacotes entregues para os cenários simulados	.....	53
Figura 33	Tempo de vida da rede obtidos através de simulação	.....	54

Lista de Tabelas

Tabela 1	Características dos principais <i>notes</i> comercializados	17
Tabela 2	Requisitos contemplados pelas propostas de trabalhos relacionados ...	33
Tabela 3	Parâmetros de simulação	48
Tabela 4	Resultados de latência obtidos através de simulação	51

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Redes de Sensores Sem Fio

As Redes de sensores sem fio (RSSF) são uma categoria de elementos computacionais formada por dispositivos de baixo custo, capazes de realizar o sensoriamento do ambiente ao qual estão inseridos[5][6][7]. Representam uma categoria promissora de tecnologia capaz de gerar um significativo impacto no cotidiano dos seus usuários por ser uma ferramenta fundamental da computação ubíqua e pervasiva[8][9]. Inúmeras aplicações hoje vistas como ficção científica, serão possíveis devido aos resultados de quase uma década de pesquisas nesse tipo de rede[10][11].

As RSSF são redes centradas em dados e fortemente acopladas ao ambiente e à aplicação que compõem, isto é, características como tráfego e hardware dos nodos são definidas conforme a necessidade da aplicação e exigências do ambiente. Seus nodos são consideravelmente diferentes dos nodos de uma rede convencional, são sistemas embarcados minimalistas, de baixa potência de transmissão e com reserva limitada de energia fornecida através de baterias[12].

Os nodos são divididos em quatro partes básicas definidas a seguir: (*i*) a camada de comunicação onde se encontra o rádio *transceptor* responsável pela comunicação sem fio, (*ii*) camada de sensoriamento onde os sensores são alocados para medição das grandezas físicas observadas, principal função dos nodos, (*iii*) a camada de processamento, responsável por realizar o processamento de sinais e controle total da aplicação através do *firmware* ou sistema operacional utilizado e a (*iv*) camada de energia ou alimentação, onde estão alocadas as fontes de alimentação como pilhas, baterias e células fotovoltaicas.

Os nodos são dispostos em uma área de atuação onde realizam atividades de monitoramento do ambiente através de sensores de temperatura, umidade, pressão, lu-

miniosidade, CO₂, presença, corrente, tensão, entre outros[13][14]. Os dados são coletados e preparados para o envio até o destino, que pode ser qualquer nodo da rede. Entretanto existem três padrões de comunicação: (i)MultiPonto-Ponto(MP2P), (ii)Ponto-MultiPonto(P2MP) e (iii)Ponto-a-Ponto(P2P)[10]. Em grande parte das aplicações, os dados são direcionados a uma categoria especial de nodo denominado sorvedouro ou estação-base (*basestation*). Esse nodo representa o *gateway* entre a RSSF e os usuários, outras tecnologias de acesso e a Internet[9][15][16].

Existem inúmeras aplicações e cenários propícios à utilização de RSSF. Destacam-se as aplicações: militares, monitoramento ambiental, *health-care* e de *smart-cities* ou cidades-inteligentes[17] [18][19][20][21][22][23][24][25]. Naturalmente, cada cenário impõe restrições e objetivos específicos, onde as características da aplicação são de fundamental relevância. Através do planejamento da aplicação e do conhecimento prévio do ambiente, é possível configurar parâmetros de funcionamento da rede como: vazão, função de agregação de dados, tipos de sensores, topologia e roteamento. Esse conhecimento prévio é importante e bastante explorado na proposta apresentada nesta dissertação, a fim de otimizar o tempo de vida da rede e a taxa de entrega de dados.

O roteamento é um dos principais focos de pesquisa para economia de energia na comunicação de dados em cenários de RSSF. Devido à variedade de aplicações deste tipo de rede, inúmeras propostas de protocolos, algoritmos de seleção de rotas, métricas de avaliação, arquiteturas, entre outras tecnologias, são desenvolvidas como tentativa de prolongar o tempo de vida da rede sem penalizar a comunicação.

1.1.1 Conceitos Básicos e Desafios

1.1.1.1 Eficiência Energética

A maioria dos nodos disponíveis no mercado são alimentados através de pilhas AA ou baterias internas equivalentes. Devido a essa limitada fonte de energia, o tempo de vida da rede é um dos fatores mais críticos e representa um grande desafio aos pesquisadores de RSSF[6][11][12][26]. O rádio *transceptor* utilizado na comunicação sem fio é responsável pela maior parte da energia total consumida por um nodo, portanto, o uso adequado desse dispositivo, além de protocolos energeticamente eficientes são altamente recomendados[14]. Muitas técnicas foram desenvolvidas para amenizar esse problema, onde o desligamento do rádio, a redução do número de mensagens e a seleção de rotas com maior energia residual são algumas das alternativas criadas para contornar o problema.

Propostas para otimização do consumo de energia podem compreender basicamente os seguintes tópicos[12][5]:

- **Disposição dos nodos:** em RSSF as topologias são uma característica de alto dinamismo, a implantação determinística ou randômica dos nodos afeta diretamente outras características da rede como: mobilidade, potência do rádio, roteamento, área

de atuação e mapa de energia.

- **Modelo de transmissão de dados:** a necessidade de entrega confiável dos dados de sensoriamento em tempo hábil resulta na criação de modelos otimizados de transmissão de dados. Esses modelos representam a periodicidade com a qual os dados devem ser enviados ao nodo destino, podendo entregar dados continuamente, ou baseando-se em eventos e consultas.
- **Agregação de dados:** em aplicações de alta densidade, os nodos sensores apresentam massiva redundância de dados de sensoriamento, portanto, modelos de compressão e agregação de dados são utilizados para a combinação de dados de diferentes fontes, de acordo com determinada função de agregação. Através dessa técnica, nodos específicos são responsáveis por agregar a informação de nodos vizinhos e filtrar os dados a serem reencaminhados através da rede.
- **Roteamento:** o roteamento em RSSF representa fundamental importância por somar às suas funcionalidades outras propostas com informação adicional à escolha de rotas (energia residual, qualidade de enlace e localização, por exemplo). Através da escolha eficiente de rotas, é possível realizar o balanceamento de carga, agregação de dados, gerência de topologia, entre outras técnicas para economia de energia e aumento do tempo de vida da rede.

1.1.1.2 Redes de Múltiplos Saltos

Em aplicações de alta densidade de nodos e extensas áreas de monitoramento, a comunicação através de um único salto não representa a solução mais adequada. Pois nodos mais distantes não conseguirão comunicar-se utilizando rádios de baixa potência, o que confronta a principal característica das RSSF. Logo, é observada a necessidade de uma comunicação de múltiplos saltos, entretanto essa configuração exige alto índice de conectividade, um fator que implica diretamente no consumo de energia dos nodos e, conseqüentemente, o tempo de vida da rede.

Protocolos de roteamento, como o clássico LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*)[27], assumem que todos os nodos são acessíveis a partir da estação-base, sobretudo essa é uma característica dificilmente atingida pela grande maioria das aplicações reais. Dessa forma, é difícil conciliar os resultados obtidos em simulação e *test-bed*. As redes de múltiplos saltos são a alternativa para solução desse problema, além de fornecer um elevado número de rotas alternativas comumente utilizadas no balanceamento de carga.

1.1.1.3 Roteamento

O roteamento representa uma das mais importantes alternativas para se alcançar eficiência energética na comunicação em RSSF. Suas configurações podem ser ajustadas a

fim de produzir menor gasto com sinalização, escolha de rotas baseadas em energia, qualidade de enlace, distância, dados de sensoriamento, entre outras métricas. Os protocolos de roteamento são definidos conforme as três estruturas básicas de RSSF:

- **Planas:** são redes clássicas de múltiplos saltos, onde todos os nodos exercem o mesmo papel e colaboram para a realização da tarefa em conjunto. Comumente, os nodos são homogêneos e não apresentam nenhum nível hierárquico. São propostas de propósito geral e utilizadas na especificação do roteamento em redes de baixa potência[28], com importante papel em cenários do paradigma de Internet das Coisas (*Internet of Things*)[8][10][9].
- **Hierárquicas:** são uma categoria de RSSF em que os nodos são reunidos em grupos (*clusters*), onde um líder do grupo (*cluster-head*) é eleito segundo determinada função de escolha e a este cabe a responsabilidade de entregar os dados de sensoriamento do grupo correspondente. Comumente, os nodos possuem diferentes configurações de hardware, sendo os líderes mais robustos ou dotados de fonte alternativa de energia.
- **Baseadas em localização:** nesta estrutura de rede, os nodos são dispostos segundo planejamento prévio da topologia ou segundo a informação de localização dada pelo próprio nodo através de GPS (*Global Position System*), triangulação de sinal, entre outras técnicas de localização baseadas em potência de sinal.

Além da classificação segundo sua estrutura, as RSSF podem ser classificadas segundo o modo de operação, que implica diretamente nas características do tráfego. Os principais modos de operação são:

- **Múltiplos Caminhos (Multipath):** são a contrapartida dos protocolos simplistas de apenas uma rota para determinado destino,. Através de múltiplas rotas é possível realizar o balanceamento de carga e aumentar o grau de tolerância à falha.
- **Baseado em Consulta:** nesta categoria, os protocolos obtêm os dados de sensoriamento por difusão de uma consulta/interesse através da rede, a consulta especifica qual o dado de sensoriamento desejado e os nodos detentores dessa informação respondem à consulta.
- **Baseado em negociação:** uma vez que a ideia principal desta proposta é suprimir o envio de dados duplicados e eliminar dados redundantes, esses protocolos fazem vasto uso de descritores de recursos.
- **Baseado em QoS (*Quality of Service*):** protocolos baseados em QoS devem equilibrar entre o consumo de energia e qualidade do tráfego de dados. Seu objetivo principal é satisfazer métricas de QoS como vazão, atraso e *jitter*, garantindo a entrega de dados ao nodo destino.

- **Coerente e Não Coerente:** o processamento de sinal é um importante componente em RSSF. Os protocolos de roteamento não coerentes realizam o processamento do sinal recebido localmente para depois realizarem o envio, em contrapartida, os protocolos coerentes realizam apenas o processamento mínimo antes de enviar aos nodos agregadores.

1.1.1.4 Multicamada

Grande parte das propostas de economia de energia em RSSF atua diretamente no comportamento da comunicação entre os nodos, aplicando técnicas variadas em todas as camadas da pilha de protocolos, sobretudo propostas robustas utilizam técnicas compostas por informações de múltiplas camadas, extraíndo métricas e executando ações capazes de otimizar a comunicação sem prejudicar o consumo de energia.

Através de padronizações como IEEE 802.15.4[2][29][30][31][32], que fornecem um grupo de especificações rigidamente obedecidas pelos fabricantes, é possível obter métricas capazes de estimar a qualidade do enlace, nível de sinal recebido e até o nível do ruído causado pelo ambiente. Essas informações podem ser utilizadas em qualquer camada da pilha e assim é feito, especialmente durante a tomada de decisão de rotas em propostas baseadas em múltiplas camadas ou *multilayer*[30][33][34].

1.1.1.5 Múltiplos Caminhos

O roteamento baseado em múltiplos caminhos, é uma importante técnica empregada no processo de seleção de rotas. A eficiência do consumo de energia pode ser otimizada através do uso de rotas alternativas existentes na tabela de roteamento, sem o processo de descoberta de rotas ocorra novamente[5]. Em aplicações onde a entrega de dados é uma fator crítico, como aplicações multimídia[35], é comum o uso de rotas alternativas para envio de dados redundantes aumentando a tolerância a falhas.

O uso desta categoria de roteamento representam um desafio para cenários de restrição energética, o emprego da técnica em situações de redundância de dados apresenta maior consumo de energia, em contrapartida o emprego em situações de balanceamento de carga são mais suscetíveis a erros, e conseqüentemente, apresentam menor desempenho de entrega de dados.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é propor uma solução de protocolo de roteamento para RSSF capaz de contornar ou amenizar problemas de balanceamento de carga e entrega confiável de dados, além de otimizar o consumo de energia estendendo o tempo de vida da rede em aplicações de alta densidade e monitoramento urbano. Os objetivos específicos compreendem os seguintes tópicos:

- Realizar o levantamento do estado-da-arte sobre algoritmos de roteamento em RSSF planas e reativas a fim de embasar a pesquisa desenvolvida.
- Desenvolver um mecanismo de seleção de rotas adaptativo capaz de realizar balanceamento de carga, eficiência energética e entrega confiável de dados.
- Implementar o mecanismo de seleção em um protocolo de roteamento para RSSF.
- Permitir a compatibilidade com as principais tecnologias existentes em cenários de RSSF.
- Implementar e validar a proposta através de experimentos de avaliação de desempenho em simuladores de redes e infraestrutura de *testbed* capazes de emular cenários urbanos de grande densidade e de cidades inteligentes.

1.3 Estrutura e organização

A pesquisa descrita nesta dissertação é organizada conforme a sequência: o Capítulo 2 descreve as principais tecnologias relacionadas ao desenvolvimento de aplicações de RSSF, introduzindo padronizações e modelos de nodos comumente utilizados. O Capítulo 3 apresenta os trabalhos relacionados a roteamento plano e reativo desenvolvidos e publicados pela comunidade de pesquisa. Posteriormente, os Capítulos 4 e 5 apresentam respectivamente a solução de protocolo proposto nesta dissertação e os resultados de avaliação de desempenho. Os trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 6, bem como as conclusões da pesquisa realizada.

CAPÍTULO 2

Tecnologias Relacionadas

Neste capítulo, serão introduzidas ferramentas relacionadas ao desenvolvimento de aplicações de RSSF, abordando e destacando as principais tecnologias atualmente utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa. Serão apresentadas as padronizações concernentes às RSSF e os modelos de nodos sensores (*motest*) amplamente empregados.

2.1 Família IEEE 802

O órgão de padronização de normas técnicas IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) estabelece um conjunto de regras baseada em de pesquisas organizadas a partir de grupos de interesse. As padronizações do grupo IEEE 802 referem-se às redes locais e metropolitanas, e definem a regulamentação segundo o modelo OSI (Open Systems Interconnections) para as camadas:

- **Física (PHY)**: responsável por todo o processo de iniciação manutenção e finalização de conexões a nível mais baixo, determina a transmissão e codificação de *bits* no meio físico.
- **Controle de Acesso ao Meio (MAC)**: responsável por definir a metodologia e organização pela qual os nodos disputam e utilizam o meio físico de transmissão.
- **Controle de Enlace Lógico (LLC)**: responsável pela definição do controle de erros, multiplexação e de fluxo de dados.

2.2 Padrão IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 é responsável pela solução de redes de baixa potência, baixo consumo energético e limitada largura de banda, com potenciais aplicações em RSSF, automação residencial, identificadores inteligentes, suporte a dispositivos de latência crítica como *joysticks*, entre outras [36].

O padrão tem sua rede constituída por dois tipos de nodos: *Full-Function Device (FFD)* e *Reduced-Function Device (RFD)*. Nodos do tipo RFD são dispositivos finais que implementam parcialmente o padrão, podem associar-se apenas a um dispositivo FFD por vez e são normalmente utilizados em aplicações simples onde não há grande demanda de dados como sensores infra vermelho passivos ou interruptores.

Os dispositivos FFD são mais robustos e possuem três modos de operação listados a seguir.

- **Personal Area Network Coordinator (Coordenador PAN):** é o nodo coordenador de toda a rede PAN, portanto o nodo mais sofisticado. Esse dispositivo cria, identifica e configura sua própria rede para que outros dispositivos possam conectar-se.
- **Coordinator (Coordenador):** é o nodo que não pode criar sua própria rede PAN, apenas associar-se a uma existente. É um nodo intermediário entre os nodos do tipo *End Device* e Coordenador PAN, usado para garantir comunicação através de múltiplos saltos e responsável por prover os serviços de sincronia através do uso de *beacons*.
- **End Device (Dispositivo Final):** atua como um nodo sensor que envia os dados de sensoriamento a um nodo coordenador. Essa categoria não implementa as funcionalidades dos nodos coordenadores e necessita associar-se a um coordenador antes de interagir com a rede.

2.2.1 Camada Física

A camada física do padrão especifica a transmissão e recepção de dados através de um canal de acordo com determinada técnica de modulação e espalhamento espectral. O padrão oferece três faixas de frequência de operação: 2.4GHz, 915MHz e 868MHz (Figura 1). Na faixa de frequência de 868Mhz a 868.6Mhz existe apenas um canal com largura de banda máxima de 20kbps, diferentemente da faixa de 902Mhz a 928Mhz onde existem 10 canais de até 40kbps. A maioria dos dispositivos de RSSF comercializados utilizam a faixa de frequência de 2.4Ghz a 2.483Ghz operando em velocidades de até 250kbps.

A padronização também fornece serviços como: *Energy Detection (ED)* e *Link Quality Indicator (LQI)* como indicadores de qualidade do sinal e enlace, respectivamente, além dos serviços de ativação/desativação de rádio *transceptor*, seleção de canal e *Clear*

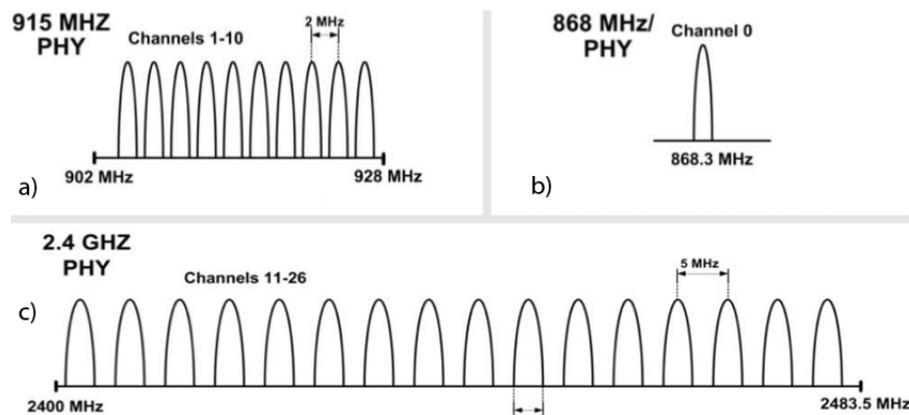


Figura 1: Canais e faixas de frequência do padrão IEEE 802.15.4[1]

Channel Assessment (CCA). Em conformidade com o padrão, os serviços são descritos a seguir.

- **Energy Detection:** este serviço provê um estimador de potência de sinal recebido dentro do canal IEEE 802.15.4, é utilizado também na camada de rede em algoritmos de seleção de canal, além de identificação e decodificação de sinal.
- **Link Quality Indicator:** é uma métrica de avaliação de qualidade do enlace calculada a partir da recepção de um pacote, comumente utilizada na camada de rede como parâmetro do algoritmo de roteamento, possuindo valores que variam entre 0 (ruim) e 255 (bom).
- **Ativação/Desativação do rádio transceptor:** este é um serviço auxiliar à necessidade de eficiência energética, o rádio pode operar em um dos três modos: transmitindo, recebendo ou desligado a partir de uma requisição da camada MAC.
- **Seleção de canal:** a camada física poderá selecionar o canal de operação mediante uma requisição da camada superior. O padrão prove o total de 27 canais disponíveis em três faixas de frequência, contudo uma rede pode suportar somente uma faixa disponível e o rádio deve ser capaz de sintonizar um canal específico.
- **Clear Channel Assessment:** serviço de avaliação de atividade do meio capaz de determinar o estado de ocupado ou ocioso. O estado do meio pode ser definido por três formas: (i) por detecção de energia, o CCA define o estado como ocupado se o nível de energia do meio ultrapassar o limiar de ED, (ii) modo *Carrier Sense* que determina como ocupado apenas se detectar um sinal com espalhamento e modulação IEEE 802.15.4 e (iii) modo híbrido que emprega as duas técnicas, o canal é considerado ocupado apenas se a detecção de energia do meio ultrapassa o limiar e o sinal possui características do padrão.

2.2.1.1 Link Quality Indicator

A métrica de qualidade de enlace LQI é calculada a partir do valor de RSSI (*Radio Signal Strength Indicator*), SNR (*Signal Noise Ratio*) ou a combinação de ambos. O *chip* de rádio CC2420 [37] é um padrão de fato da implementação do padrão IEEE 802.15.4, e calcula o valor de RSSI baseado nos oito primeiros símbolos do pacote recebido. Sobretudo o uso do RSSI para calcular o valor de LQI pode levar à geração de dados espúrios, portanto o CC2420 provê um indicador baseado também nos primeiros oito símbolos de um pacote recebido denominado valor de correlação (CORR).

O valor CORR varia entre 50 e 110, sendo 50 o pior e 110 o resultado máximo de qualidade do *frame* recebido. O fabricante do rádio recomenda o uso de conversão linear do valor de CORR para a escala de 0 à 255 utilizando métodos empíricos [30].

2.2.2 Camada MAC (Medium Access Control)

O suporte da subcamada MAC é definido basicamente por dois modos de operação: os modos *beacon-enable* e *non beacon-enable* (Figura 2).

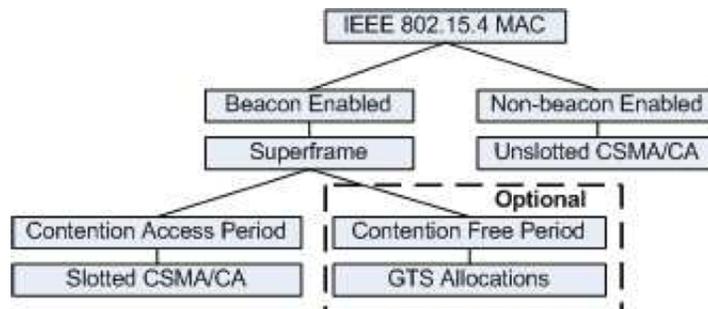


Figura 2: Modos de operação da camada MAC [1]

- **Beacon-enable:** neste modo há mensagens de *beacons* enviadas periodicamente pelos coordenadores para sincronizar os nodos associados e identificar a rede PAN. Um *frame beacon* marca o início de um *superframe* (Figura 3) que contém 16 *slots* que dividem o tempo para as transmissões de cada nodo. O tempo total entre dois *beacons* é denominado *Contention Access Period* (CAP) onde os nodos disputam o acesso através do mecanismo CSMA/CA *Slotted*.
- **Non beacon-enable:** neste modo não há difusão de mensagens de *beacons*, portanto não há *superframes* e o acesso ao meio é regido através do mecanismo CSMA/CA independente de sincronismos do nodo coordenador.

O modo *Non beacon-enable* permite ao nodo coordenador entrar em modo de baixo-consumo de energia durante o período opcional de inatividade, além de possuir o mecanismo chamado *Guaranteed Time Slots* (GTS) utilizado em aplicações que requerem

garantia de largura de banda. Ao final do *superframe*, durante o período opcional do *Contention-Free Period* (CFP), um nodo pode acessar o meio sem contenção através deste mecanismo e o coordenador pode alocar mais de um *slot* para um único GTS. Cada nodo que transmite durante o período de um GTS garante que sua transação será concluída antes do início do próximo GTS ou do final do CFP.

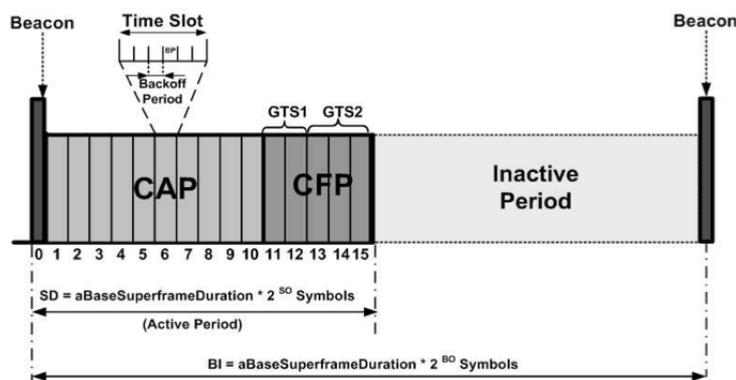


Figura 3: Estrutura do *superframe* utilizado no modo *beacon-enable* [2]

2.3 Padrões de Comunicação

2.3.1 ZigBee

O padrão ZigBee [38] é resultado de pesquisas promovidas pelo consórcio de empresas chamado *ZigBee Alliance*. É composto por um conjunto de protocolos para rádios de baixo custo e potência limitada utilizados em redes WPAN. ZigBee incorpora o padrão IEEE 802.15.4 e, portanto, fornece funcionalidades às camadas superiores deste padrão. A relação entre o padrão IEEE 802.15.4 e o ZigBee é similar à relação entre IEEE 802.11 e WiFi Alliance [39].

O termo ZigBee é uma marca registrada do consórcio e não somente a padronização, embora estejam diretamente ligados e disponibilizados sob licença da própria *ZigBee Alliance* [38]. Para objetivos não-comerciais, a especificação é disponibilizada através de licença GNU (*General Public License*) [40]. Para a criação e comercialização de produtos utilizando a padronização, é necessário registrar-se à ZigBee Alliance dentro os diversos perfis de desenvolvedores disponíveis:

- ZigBee Home Automation.
- ZigBee Smart Energy 1.0.
- ZigBee Telecommunication Services.
- ZigBee Health Care.

- ZigBee RF4CE - Remote Control.

Segundo a pilha ZigBee (Figura 4), acima das camadas do padrão IEEE 802.15.4 há apenas as camadas de rede (NWK) e de aplicação (APL) do modelo OSI. A camada de rede é responsável por (i) estabelecer uma rede nova, (ii) ingressar ou deixar uma rede existente, (iii) configurar um novo dispositivo, (iv) endereçamento aos dispositivos que ingressam à rede, (v) sincronização no modo *beacon enable* e (vi) roteamento.

A camada APL ZigBee possui duas subcamadas denominadas APS (*Application Support*) e ZDO (*ZigBee Device Object*). A APS é uma interface fundamental para controle e gerência de serviços, ela fornece a ligação entre a camada NWK e os outros componentes da APL, mantendo atualizada uma base de dados das ligações entre as camadas utilizadas, que pode ser empregada para encontrar os dispositivos e serviços. A ZDO busca novos dispositivos de rede e define suas características para então estabelecer a conexão segura para uso dos serviços oferecidos. A ZDO também é atribuída a função de definir se o dispositivo é um nodo coordenador ou dispositivo final.

Os *motes* que implementam o padrão normalmente são adquiridos e utilizados através de circuito adicional. Atualmente, o maior fabricante desses *motes* é a empresa Digi International [3]. Uma das dificuldades no uso da tecnologia em pesquisas acadêmicas ocorre devido aos conflitos de licença e não possibilidade de regravação de *firmware*, o que resulta na utilização sem modificações na maioria das aplicações.

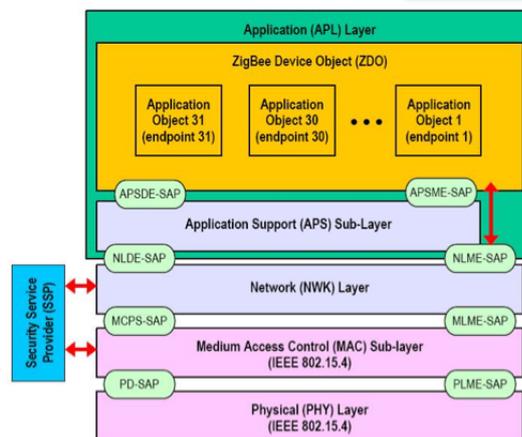


Figura 4: Estrutura da pilha de protocolos segundo o padrão ZigBee [3]

2.3.2 WirelessHART

A padronização WirelessHART [41][42] advém do protocolo HART (Highway Addressable Remote Transducer Protocol). Seu uso e criação estão fortemente ligados a aplicações industriais e de ambientes hostis, portanto, suas características agregam confiabilidade, segurança, compatibilidade e baixo consumo de energia. A fim de garantir

confiabilidade ao padrão, o WirelessHART emprega um esquema de escalonamento de canais e envio de dados redundantes através de rotas alternativas.

As redes que implementam o padrão WirelessHART são dotadas de três dispositivos fundamentais: (i) *Wireless Field Devices* são os tradicionais dispositivos de campo responsáveis pelos sensores e o processo monitorado, o equipamento (ii) *Gateway* realiza a comunicação entre as aplicações do usuário e outras tecnologias de redes de acesso e o (iii) *Network Manager* é o gerente com todas as atribuições de monitoramento da rede e seu tempo de vida, entre outras.

O WirelessHART utiliza a padronização IEEE 802.15.4 para a camada física sob a faixa de frequência de 2.4Ghz, entretanto a camada MAC utiliza o mecanismo de TDMA sincronizado, onde todas as comunicações entre dispositivos são feitas em um *slot* de tempo pré-agendado que garante uma comunicação com baixos índices de colisão [42]. É possível utilizar uma abordagem alternativa assíncrona, porém não há garantias de economia de energia e QoS.

2.3.3 Sun Microsystems

A empresa *Sun Microsystems* não possui uma padronização reconhecida por um órgão regulamentador. Sua arquitetura de protocolos compreende apenas os seus produtos (descrito na Seção 2.4.3), sobretudo sua tecnologia é bastante aceita e empregada academicamente. A arquitetura proposta pela empresa contempla o padrão IEEE 802.15.4 completamente e adiciona as camadas de rede, transporte e aplicação, conforme a Figura 5.

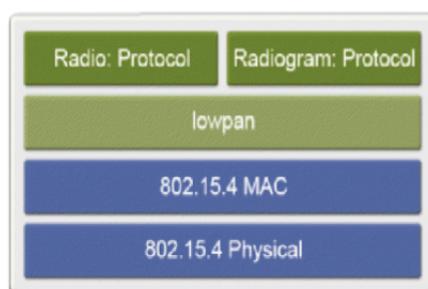


Figura 5: Pilha de protocolos da arquitetura Sun Microsystems [4]

A camada de aplicação é uma camada convencional aberta ao usuário, possui suporte aos protocolos HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), permitindo uso de *Web Services*, entre outras aplicações. A camada de transporte possui dois protocolos fundamentais que fornecem os serviços básicos de transferências de dados. O protocolo *Radiostream* é baseado em conexões *sockets* ponto-a-ponto e provê transferência confiável de dados através de mecanismos de *buffer* e sequenciamento que auxiliam na retransmissão de pacotes perdidos e ordenação.

O *Radiogram* é um protocolo baseado em datagrama que oferece o serviço de

entrega baseada em melhor esforço, provê confirmação de entrega de pacotes apenas para comunicações de um único salto, sua comunicação é apenas no sentido cliente-servidor. A camada de rede é uma implementação do *draft* de redes LoWPAN [43][44][45], portanto, é compatível com serviços de fragmentação, roteamento *mesh*, TCP e UDP.

2.4 Motes

2.4.1 ZigBee - XBee

O XBee [3] (Figura 6) é o módulo de rádio mais famoso capaz de executar a pilha de protocolos do padrão ZigBee. Desenvolvido pela empresa Digi International, é o único dispositivo oficial da marca registrada. Suas características apresentam baixo consumo de energia e grande aceitação na indústria. Devido a limitações do módulo, necessita de circuito adicional para alimentação e sensores através de pinos de pinos de propósito geral capazes de alocar um sensor diretamente ao módulo.

Os módulos XBee possuem muitas variações entre os modelos comercializados, possuem modelos de 1mW até 500mW operacionais em todas as faixas de frequência do padrão IEEE 802.15.4, sobretudo os primeiros modelos não possuem integração com versões mais novas. Módulos da série 1 são incompatíveis com os de série 2 devido à ausência de roteamento *mesh* nos primeiros módulos. São programados e utilizados a partir de comandos *Attention Commands* (AT) [46][47] ou em modo API (*Application Programming Interface*). Utilizam o protocolo de roteamento AODV com suporte a 6LoWPAN. Características de hardware são detalhadas na Tabela 1.



Figura 6: Mote XBee fabricado pela empresa Digi International

2.4.2 MEMSIC

A empresa MEMSIC produz os *motes* mais populares dentro da academia: os modelos IRIS [48], TelosB [49] e MicaZ [50] (Figura 7) são amplamente difundidos e utilizados em muitos projetos de *testbed* [23][22].

O modelo TelosB possui grande diferença de processamento e memória de programa em relação ao MicaZ, o que o torna mais robusto e mais recomendado para aplicações mais complexas. Uma das principais diferenças entre o TelosB e outros mode-

los fabricados pela MEMSIC reside na gravação *onboard* deste modelo e na presença de sensores de fábrica. Os *motes* não possuem sensores instalados de fábrica nativamente e a opção de gravação sem circuito adicional, somente o modelo TelosB possibilita a gravação do *firmware* da aplicação através da porta USB (*Universal Serial Bus*) sem auxílio de hardware adicional de gravação.

O *mote* IRIS possui hardware mais robusto dentre os principais modelos do fabricante (Tabela 1), assim como o modelo MicaZ foi desenvolvido para atuar em aplicações *indoor* de segurança, monitoramento, multimídia, de tráfego robusto e redes de alta densidade. Todos os *motes* MEMSIC mencionados utilizam a faixa de frequência de 2.4Ghz e disponibilizam pinos de propósito geral para adição de mais sensores, além disso, utilizam o sistema operacional TinyOS [51], um sistema operacional disponível sob licença BSD (Berkeley Software Distribution) [52] que utiliza o protocolo AODV, compatível com 6LoWPAN [15][16] e implementa inúmeros *drafts* em andamento no IETF (*Internet Engineering Task Force*) [10].

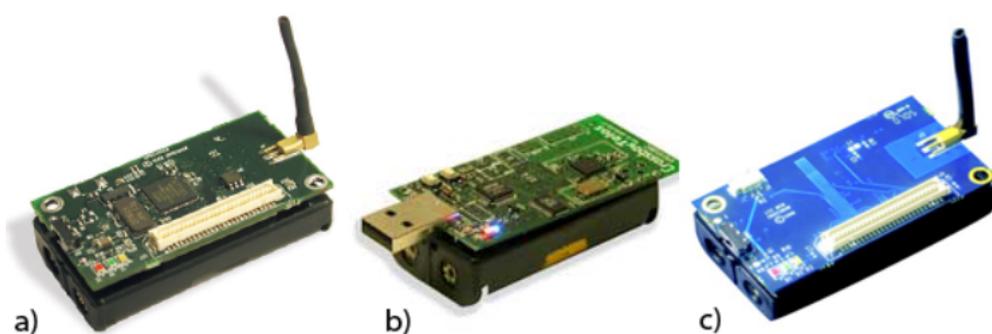


Figura 7: Mote MicaZ, TelosB e IRIS, respectivamente, fabricados pela empresa MEMSIC

Os *motes* desenvolvidos pela MEMSIC também são usualmente utilizados com outros sistemas operacionais similares e derivados do TinyOS como NanoRK [53] e Contiki [54].

2.4.3 SunSPOT

O *mote* SunSPOT (*Sun Small Programmable Object Technology*) fabricado pela empresa Sun Microsystems é o modelo com hardware mais robusto do mercado, possuindo maior poder de processamento e memória, além de sensores e alimentação integrados ao *mote*.

A aplicação embarcada funciona a partir de um ambiente de execução Java (*Java Runtime Environment*) sem a camada de sistema operacional. Todo o projeto incluindo hardware e software são distribuídos sob licença GNU, onde a máquina virtual denominada Squawk utiliza a API *Java Mobile Edition* (J2ME) [55], a plataforma Java para dispositivos móveis limitados como telefones celulares e *smartphones*. O protocolo de roteamento padrão utilizado é o AODV na pilha de protocolos descrita na Seção 2.3.3.

Possui três modos de hibernação para economia de energia, além de suporte aos protocolos 6LoWPAN e OTA (Over The Air) para reprogramação de *firmware* remotamente.



Figura 8: Mote SunSPOT fabricado pela empresa Sun Microsystems [4]

2.4.4 Visão Geral

Todos os modelos de *motes* apresentados nesta seção apresentam características particulares devido à gama de potenciais aplicações das RSSF. Essas características devem ser levadas em consideração durante a elaboração de projetos desse tipo rede. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais características dos *motes* mais difundidos.

Mote	XBee PRO	MicaZ	TelosB	IRIS	SunSPOT
Processador	HCS08	ATMegaL128	MSP430	ATMega1281	ARM920T
Mem. de Prog.	32Kb	128Kb	48Kb	128Kb	8Mb
Mem. RAM	2Kb	4Kb	10Kb	8Kb	1Mb
Consumo	62mA	8mA	1.8mA	8mA	104mA
Consumo(sleep)	4uA	15uA	5.1uA	8uA	33uA
Bateria	X	Pilhas AA	Pilhas AA	Pilhas AA	Bateria Interna
Rádio	X	CC2420	CC2420	CC2420	CC2420
Sist. Operacional	X	TinyOS	TinyOS	TinyOS	Squawk JVM
Licença	ZigBee	BSD	BSD	BSD	GNU

Tabela 1: Características dos principais *motes* comercializados

2.4.5 Conclusão

As principais características apresentadas nesse capítulo destacam importantes semelhanças entre as tecnologias descritas. O uso do *chip* de rádio CC2420 [37] e a sua consolidação como o equipamento padrão de fato da implementação do padrão IEEE 802.15.4. Outra importante conclusão é a heterogeneidade das pilhas de protocolos, onde os fabricantes de *motes* possuem total liberdade para apresentação de novos protocolos e otimizações. Contudo o uso comum do protocolo AODV como mecanismo de roteamento de mensagens indica o uso de roteamento plano em cenários de propósito geral. O protocolo 6LoWPAN tem total aceitação entre as plataformas de *motes* mais populares comprovando a tendência do seu uso em RSSF.

O uso de um protocolo de roteamento de amplamente difundido como o AODV, aliado ao uso do protocolo 6LoWPAN provido pelas tecnologias de *motes* apresentadas, proporciona uma arquitetura escalável e similar às redes sem fio convencionais, além de facilitar a integração entre estas.

CAPÍTULO 3

Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta os principais conceitos, abordagens e assuntos relacionados aos trabalhos similares no qual esta dissertação é baseada. O protocolo AODV é apresentado em detalhes, além dos protocolos LABILE, GADODV e EEURP que estendem as funcionalidades do AODV.

3.1 Protocolo AODV

O protocolo de roteamento AODV (*Ad hoc On Demand Distance Vector*) é o resultado da parceria entre o Centro de Pesquisa Nokia, Universidade da Califórnia em Santa Bárbara e Universidade de Cincinnati. O protocolo foi definido através da RFC 3561 [56] e destina o seu uso a nodos móveis de redes *ad hoc*, oferecendo rápida adaptação às condições dinâmicas dos enlaces, baixo *overhead* e baixo uso de memória, além de solucionar o problema clássico de "contagem para o infinito" [57] associado a protocolos baseados em vetor de distância. É capaz de operar em ambientes de baixa, moderada e alta mobilidade, redes de alta densidade de até dezenas de milhares de nodos, bem como uma variedade de níveis de tráfego.

3.1.1 Visão Geral

O protocolo AODV provê roteamento auto-gerenciável através de múltiplos saltos entre nodos móveis que desejam estabelecer e manter uma rede *ad hoc*. Permite aos nodos obter rotas rapidamente para novos destinos e não requer o armazenamento de rotas para destinos com comunicação inativa. Um conjunto de mensagens específicas definem o funcionamento do protocolo. As mensagens de RREQ (*Route Request*), RREP (*Route Reply*) e RERR (*Route Error*) realizam a sinalização dos serviços básicos do protocolo.

O comportamento de atuação sob demanda obriga que novas rotas sejam criadas apenas quando necessárias, o que garante o não desperdício de recursos de rede com sinalização potencialmente desnecessária. Quando uma rota para um novo destino é necessária, o nodo faz essa requisição através da difusão de uma mensagem de RREQ, a rota pode ser determinada ao alcançar, através de múltiplos saltos, o próprio nodo destino ou um nodo intermediário com uma rota recente para o destino requerido.

Uma rota recente é um registro/entrada válida na tabela de roteamento e possui o número de sequência equivalente ao número de sequência da mensagem RREQ. A nova rota encontrada é descrita por meio de uma mensagem RREP enviada através de *unicast* ao nodo que originou o RREQ. Cada nodo que recebe o RREQ armazena uma rota ao nodo originário da mensagem a fim de encaminhar a mensagem RREP ao longo de todos os saltos.

Os nodos monitoram o funcionamento do enlace das rotas em uso. Portanto, quando um enlace falha, causando perda de conectividade, o protocolo detecta a ocorrência e difunde a mensagem de RERR a fim de notificar a outros nodos a falha ocorrida. A mensagem de RERR indica os destinos que não estão mais disponíveis devido à falha ocorrida. Para que esse mecanismo de relatórios funcione adequadamente, a tabela de roteamento mantém uma lista de nodos destinos e o endereço do próximo salto utilizado para alcançar tal destino.

As informações da tabela de rotas gerenciadas pelo protocolo AODV devem ser mantidas mesmo para rotas de curta duração, como rotas criadas para reencaminhar pacotes RREP. O protocolo armazena os seguintes campos para cada registro de rota na tabela.

- Endereço IP do destino
- Número de sequência do destino
- *Flag* válida do número de sequência do destino
- Outras *flags* de estado de roteamento (ex: válida, inválida, reparável, iniciando reparação)
- Interface de rede
- Número de saltos até o destino
- Endereço IP do próximo salto
- Lista de precursores
- Tempo de vida

Um registro de rota tem seu campo de Tempo de Vida inicializado segundo a constante de `ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT`. Cada vez que a rota é utilizada para encaminhar pacotes

de dados, o campo Tempo de Vida da rota é atualizado nos nodos de origem, próximo salto e destino, subtraindo o tempo decorrido e somando o valor da constante novamente. Cada rota válida mantida por um nodo possui uma entrada na tabela de roteamento. O nodo também mantém uma lista de precursores, que são outros nodos capazes de encaminhar os pacotes através da rota. Os nodos precursores são notificados caso ocorra um evento de falha em um enlace.

Um nodo pode fornecer informações de conectividade através do uso da difusão de mensagens locais chamadas *Hello Messages*. Um nodo deve usar as *Hello Messages* somente como parte do tráfego em uma rota ativa. O nodo deve verificar se existem rotas ativas durante a periodicidade definida pela constante HELLO_INTERVAL. Caso o intervalo de tempo tenha sido satisfeito o nodo difunde em *broadcast* uma mensagem RREP com Tempo de Vida da rota igual ao resultado da multiplicação das constantes ALLOWED_HELLO_LOSS e HELLO_INTERVAL e configura o campo TTL (*Time To Live*) do cabeçalho do protocolo IP igual a 1.

3.1.2 Formato de Mensagens

A metodologia e o mecanismo do uso das mensagens especificadas abaixo são descritos na Seção 3.2.

3.1.2.1 Route Request (RREQ)

A mensagem RREQ corresponde ao início do processo de busca de rotas e contém informações do nodo destino e nodo requerente. A Figura 9 apresenta os campos que compõem a mensagem.

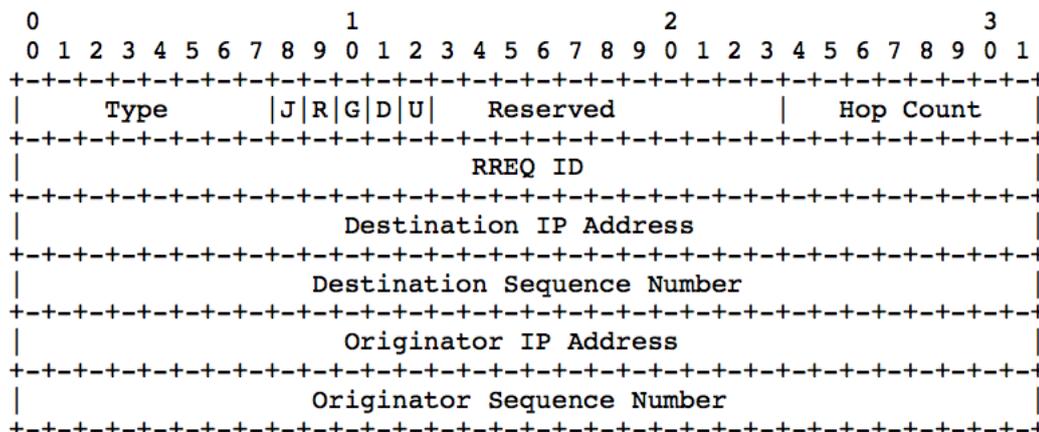


Figura 9: Mensagem de requisição de rota (RREQ) do protocolo AODV

- **Type:** Identificador de tipo da mensagem. Mensagens RREQ são marcadas com valor igual a 1.

- **J**: Join Flag; reservada para uso em comunicação *multicast*.
- **R**: Repair Flag; reservada para uso em comunicação *multicast*.
- **G**: Gratuitous RREP Flag; indica se uma mensagem RREP deve ser enviada diretamente ao nodo especificado no campo endereço IP destino.
- **D**: Destination Only Flag; indica que apenas o destino deverá responder a este RREQ.
- **U**: Unknown sequence number; indica que o número de sequência do nodo destino é desconhecido.
- **Reserved**: Se o valor da *flag* for igual a zero, esta mensagem deverá ser ignorada pelo receptor.
- **Hop Count**: Representa o número de saltos desde o nodo de origem da mensagem até o nodo corrente.
- **RREQ ID**: Número de sequência identificador da mensagem RREQ em particular.
- **Destination IP Address**: Endereço IP do nodo destino requerido.
- **Destination Sequence Number**: Último número de sequência recebido pelo nodo de origem para qualquer rota em direção ao destino.
- **Originator IP Address**: Endereço IP do nodo de origem da requisição.
- **Originator Sequence Number**: Número de sequência atual a ser utilizada no registro da rota junto a tabela de rotas referente ao nodo de origem.

3.1.2.2 Route Reply (RREP)

A mensagem RREP faz parte do processo de descoberta de rotas e representa uma resposta a uma requisição, contendo informações que descrevem a rota procurada. A Figura 10 apresenta os campos que compõem a mensagem.

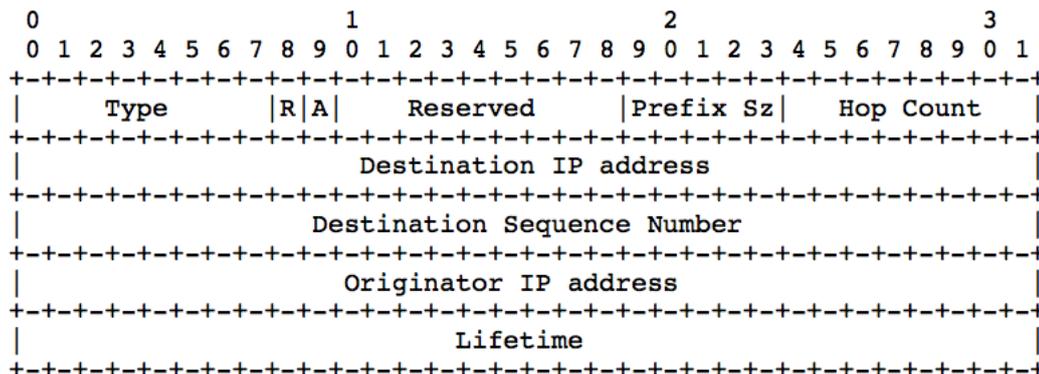


Figura 10: Mensagem de resposta de rota (RREP) do protocolo AODV

- **Type:** Identificador de tipo da mensagem. Mensagens RREP são marcadas com valor igual a 2.
- **R:** Repair Flag; reservada para uso em comunicação *multicast*.
- **A:** Acknowledgment Flag; obriga o receptor a enviar uma mensagem RREP-ACK.
- **Reserved:** Se o valor da *flag* for igual a zero, esta mensagem deverá ser ignorada pelo receptor.
- **Prefix Size:** Indica que o próximo salto (*Next Hop*) pode ser usado por qualquer nodo com o mesmo prefixo como destino solicitado.
- **Hop Count:** Representa o número de saltos desde o nodo de origem da mensagem até o nodo corrente.
- **Destination IP Address:** Endereço IP do nodo destino requerido.
- **Destination Sequence Number:** Último número de sequência recebido pelo nodo de origem para qualquer rota em direção ao destino.
- **Originator IP Address:** Endereço IP do nodo de origem da requisição.
- **LifeTime:** Tempo de vida que o nodo receptor deve considerar a rota como válida.

3.1.2.3 Route Error (RERR)

Quando uma falha ocorre no enlace de comunicação entre os nodos de uma rota, uma mensagem RERR é difundida para notificação da falha. A Figura 11 apresenta os campos que compõem a mensagem. O mecanismo que emprega o uso da mensagem RERR é descrito em detalhes na Seção 3.2.0.7.

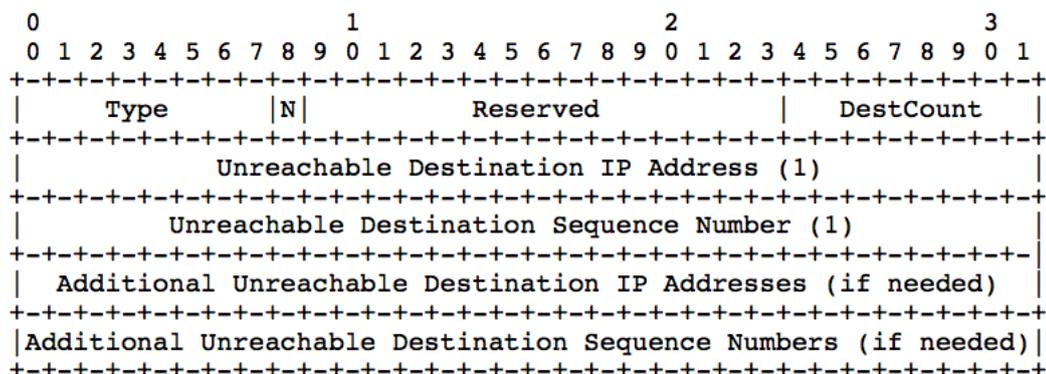


Figura 11: Mensagem de notificação de erro (RERR) do protocolo AODV

- **Type:** Identificador de tipo da mensagem. Mensagens RERR são marcadas com valor igual a 3.

- **N**: Usado quando um nodo realiza um reparo no enlace, notifica os nodos vizinhos a não remover o registro da rota.
- **Reserved**: Se o valor da *flag* for igual a zero esta mensagem deverá ser ignorada pelo receptor.
- **DestCount**: Número de destinos inacessíveis.
- **Unreachable Destination IP Address**: Endereço IP do nodo destino inacessível.
- **Unreachable Destination Sequence Number**: Número de sequência armazenado no registro da tabela de rotas para o destino inacessível.

3.1.2.4 Route Reply Ack

A mensagem de RREP-ACK deve ser enviada em resposta a uma mensagem RREP marcada com a *flag* A (*Acknowledgment Flag*). Tipicamente utilizada em comunicações unidirecionais com altos índices de falha que impedem a conclusão do processo de descoberta de rotas (Seção 3.2). A Figura 12 apresenta os campos que compõem a mensagem.

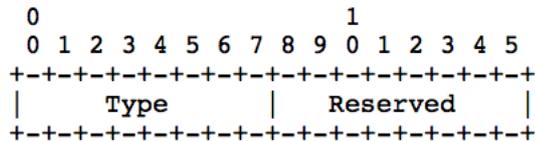


Figura 12: Mensagem de confirmação de recebimento do RREP (RREP-ACK)

- **Type**: Identificador de tipo da mensagem. Mensagens RREP-ACK são marcadas com valor igual a 4.
- **Reserved**: Se o valor da *flag* for igual a zero esta mensagem deverá ser ignorada pelo receptor.

3.2 Processo de Descoberta de Rotas

3.2.0.5 Geração de RREQ

Um nodo dissemina uma mensagem RREQ quando necessita enviar pacotes de dados a um destino ao qual não há uma rota disponível em sua tabela, situação que ocorre com destinos previamente desconhecidos ou quando uma rota previamente utilizada foi marcada como inválida ou atingiu o limite do seu Tempo de Vida (*LifeTime*). O campo de número de sequência do nodo destino deve conter o último número de sequência conhecido referente ao nodo destino, esse campo deve sempre estar sincronizado com a tabela de rotas. Quando o valor não é conhecido, deve-se informar através da *flag* U (*Unknown*).

Após o envio da mensagem RREQ, o nodo de origem deve armazenar o valor do campo RREQ ID e do Endereço IP de Origem (seu próprio endereço), a fim de evitar o reenvio da mensagem após recebê-la através do reencaminhamento feito pelos nodos vizinhos. Se nenhuma mensagem RREP for recebida em resposta dentro do tempo configurado pelo parâmetro NET_TRANSVERSAL_TIME, o nodo pode realizar novas tentativas até o limite estabelecido pelo parâmetro RREQ_RETRIES e o máximo valor de TTL, além de atualizar o valor de RREQ ID e respeitar o parâmetro RREQ_RATELIMIT, caso não haja resposta ou outra mensagem de controle.

Os pacotes de dados que aguardam uma rota para envio são armazenados em um *buffer* com política FIFO (*First-in First-out*). Caso o número de tentativas de descoberta da rota atinja o limite de RREQ_RETRIES, os pacotes armazenados devem ser descartados e uma mensagem de *Destination Unreachable* é enviada à camada de aplicação.

Frequentemente, a comunicação entre os nodos de origem e de destino necessita ser bidirecional. Portanto, quando um nodo intermediário possui a rota para um determinado destino e gera uma mensagem de RREP para esta requisição, esse nodo intermediário deve notificar o nodo destino da rota sobre a requisição, enviando-lhe uma mensagem RREP *unicast* com a rota para o nodo de origem da requisição. O nodo de origem deve configurar esse comportamento através do uso da *flag* G (*Gratuitous RREP*).

3.2.0.6 Geração de RREP

Um nodo é capaz de gerar uma mensagem RREP em duas situações: (*i*) quando esse nodo é o próprio destino procurado na mensagem RREQ ou (*ii*) quando possui uma rota ativa para o destino. Ao criar uma mensagem RREP, o nodo copia os campos de Endereço IP de Destino (*Destination IP Address*) e o Número de Sequência do Nodo de Origem (*Originator Sequence Number*) da mensagem RREQ para os campos correspondentes da mensagem RREP. Após a configuração, a mensagem é enviada ao próximo salto através de *unicast* em direção ao nodo de origem da mensagem RREQ correspondente.

Quando um nodo recebe uma mensagem RREP, este procura uma rota para o próximo salto (*Next Hop*) informado na mensagem. Se necessário, a rota deve ser criada com um número de sequência inválido. Em seguida, o nodo deverá incrementar o valor de número de saltos (*Hop Count*) e registrar a rota junto à tabela caso não exista esse registro. Se existir um registro prévio de rota para o destino, somente deverá ser atualizado se contemplar uma das condições:

- O número de sequência armazenado no registro da rota é marcado como inválido.
- O número de sequência da mensagem RREP é maior que o valor válido armazenado no registro da rota.
- Os números de sequência são iguais e o registro da rota é marcado como inativo.
- Os números de sequência são iguais e o número de saltos (*Hop Count*) da mensagem RREP é menor.

Ao criar ou atualizar um registro de rota, as seguintes ações devem ocorrer:

- A rota é marcada como ativa.
- O número de sequência é marcado como válido.
- O registro da rota deve armazenar como próximo salto (*Next Hop*) o nodo ao qual encaminhou a mensagem RREP.
- O valor de número de saltos (*Hop Count*) deve ser incrementado.
- O valor de Tempo de Vida da rota (*LifeTime*) deve ser definido a partir da hora atual somado ao valor do campo na mensagem RREP.
- O número de sequência no registro da rota deve ser igual ao valor do número de sequência do nodo destino (*Destination Sequence Number*).

3.2.0.7 Controle de Erro e Mensagens RERR

Ao ocorrer uma falha em um enlace de comunicação entre os nodos, as seguintes ações devem ocorrer:

- Invalidar as rotas existentes.
- Identificar os destinos afetados.
- Determinar quais nodos vizinhos são afetados pela falha.
- Enviar a mensagem RERR adequada aos nodos vizinhos.

Um nodo inicia o processo de contenção de erro e processamento de uma mensagem RERR diante de três situações básicas: (*i*) o nodo detecta a falha de comunicação para o próximo salto em uma rota ativa enquanto transmite dados, (*ii*) o nodo recebe pacotes de dados destinados a outro nodo o qual não possui rota ativa ou em estado de reparação, (*iii*) o nodo recebe uma mensagem RERR de outro nodo vizinho para uma ou mais rotas ativas.

Apenas após o envio da mensagem RERR, são feitas alterações na tabela de roteamento que podem afetar o número de sequência dos destinos inacessíveis. Para cada destino inacessível, o registro de rota correspondente deve ser alterado, como se segue:

- O número de sequência do registro, caso exista e seja válido, será incrementado segundo as situações (*i*) e (*ii*) mencionadas anteriormente e apenas copiado do campo correspondente da mensagem RERR na situação (*iii*).
- O registro da rota deve ser marcado como inválido na tabela de roteamento.
- O campo de Tempo de Vida (*LifeTime*) deve ser atualizado segundo a hora atual e somado ao valor do parâmetro DELETE_PERIOD. Após o esse período, o registro da rota não deverá ser removido.

Quando a comunicação é interrompida entre os nodos de uma rota inativa, o nodo que possui dados a enviar ao destino inacessível pode realizar tentativas de reparar o enlace localmente, se o destino não ultrapassar o valor do parâmetro MAX_REPAIR_TTL. As mensagens de RERR não devem exceder o valor de RERR_RATELIMIT.

3.2.1 Conclusão

Após anos de utilização e pesquisas relacionadas ao protocolo AODV, seu mecanismo de funcionamento é consistente e amadurecido, oferecendo diversos recursos e grande potencial de adaptabilidade, inspirando a utilização desse protocolo por inúmeras propostas de roteamento em cenários de RSSF. Além de sua conhecida estrutura, a lacuna de uma visão ampliada dos recursos dos nodos e da rede deprecia o seu uso em aplicações de RSSF. A ausência de métricas mais consistentes para a escolha de rotas não são superadas pelo uso da métrica de número de saltos.

Embora o protocolo AODV não ofereça gerência de consumo de energia e de rotas alternativas, seu uso é amplamente empregado devido a sua baixa complexidade e alto nível de customização.

3.3 Protocolo LABILE

O protocolo LABILE (*Link quality-Based lexicAl Routing*) [34] propõe a adição de um método de classificação de qualidade de enlaces ao longo da rota e um mecanismo de escolha de rotas léxico. Ao determinar que o protocolo AODV não é capaz de satisfazer as necessidades de roteamento em RSSF baseado apenas no número de saltos, o protocolo LABILE inclui a qualidade dos enlaces no mecanismo de escolha de rotas.

A métrica LQI (*Link Quality Indicator*) fornecida pela camada física do padrão IEEE 802.15.4 (Seção 2.2.1) avalia a qualidade do enlace até o próximo salto. Seu resultado inteiro é uma eficaz métrica com grande impacto, se utilizada como métrica de roteamento [30]. Portanto, o protocolo LABILE utiliza essa métrica assumindo que bons enlaces serão capazes de atingir satisfatórias taxas de entrega de dados.

Através da discretização binária dos valores do LQI, é possível realizar a classificação dos enlaces como bons e ruins. Essa classificação é feita a partir de um valor de limiar denominado *LQI Threshold* (LQI_{th}). Qualquer valor de LQI obtido abaixo do limiar deve ser considerado um enlace ruim ou fraco (*WeakLink*), e qualquer valor superior deve ser considerado um enlace bom e, portanto, forte e confiável.

A obtenção do valor adequado para o limiar de LQI é obtido através de experimentação, e os autores do protocolo descrevem um experimento utilizando *notes* MEMSIC (Seção 2.4.2) e rádios CC2420. O experimento consiste na manipulação da distância entre dois nodos, observando os resultados de taxa de entrega de dados para os valores de LQI obtidos. Através desse estudo prévio é possível estabelecer a taxa de entrega

desejável à aplicação e o seu respectivo valor de LQI que classificará os enlaces.

Embora o uso da métrica LQI seja suficiente para classificar o enlace, o valor obtido não representa a qualidade da rota fim-a-fim, apenas até o próximo salto. Diante disso, um mecanismo léxico de coleta de valores de LQI foi incluído através de três campos adicionais nas mensagens de RREQ e RREP do protocolo AODV:

- **CT**: Determina o cálculo do custo da rota, tradicional ou léxico.
- **WL**: Contador de *WeakLinks* ao longo da rota.
- **RC**: Custo acumulado da rota.

3.3.1 Limiares e Analisador Léxico

Os valores de LQI binarizados são obtidos durante o período de descoberta de rotas, portanto, quando um nodo difunde uma mensagem de RREQ aos nodos vizinhos, os nodos receptores da mensagem são capazes de calcular o valor de LQI e classificá-lo segundo o limiar de (LQI_{th}). Ao classificar o enlace e caso este seja considerado ruim, o contador *WeakLinks* deverá ser incrementado dentro do campo da mensagem RREQ e depois reencaminhado. O processo se repete até atingir o nodo destino.

O nodo destino replicará o valor do contador no registro da rota junta à tabela como o número de enlaces não confiáveis que esta possui. O processo de descoberta de rotas utilizando a métrica *WeakLinks* é representado pelo diagrama de atividades UML2 nas Figuras 13 e 14.

A ação em conjunto das métricas de número de saltos e *WeakLinks* no processo de seleção de rotas pode ocasionar o problema de privilegiar rotas mais confiáveis, sobretudo maiores. Rotas com mais saltos e menos enlaces confiáveis nem sempre serão a melhor opção, pois aumentariam o atraso fim-a-fim prejudicando o desempenho da aplicação. Portanto, é necessário determinar o valor da diferença máxima de saltos entre duas rotas. Esse limiar, denominado $HCdiff_{max_allow}$, somente substituirá uma rota menor e menos confiável por uma rota maior e mais confiável, se a diferença entre o número de saltos não ultrapassar o valor do limiar.

3.3.2 Conclusão

O protocolo LABILE apresenta uma importante métrica de avaliação de qualidade de enlace denominada *WeakLinks*, capaz de prover informação ao longo de toda a rota analisando a qualidade de enlace assimetricamente. Além disso estende o protocolo AODV considerando o número de saltos e sua importância, contudo o uso apenas de métricas de qualidade de enlace não é o capaz de reduzir o consumo de energia de forma considerável, portanto, a proposta do protocolo LABILE não contempla a maioria dos requisitos fundamentais de protocolos de roteamento em cenários de RSSF.

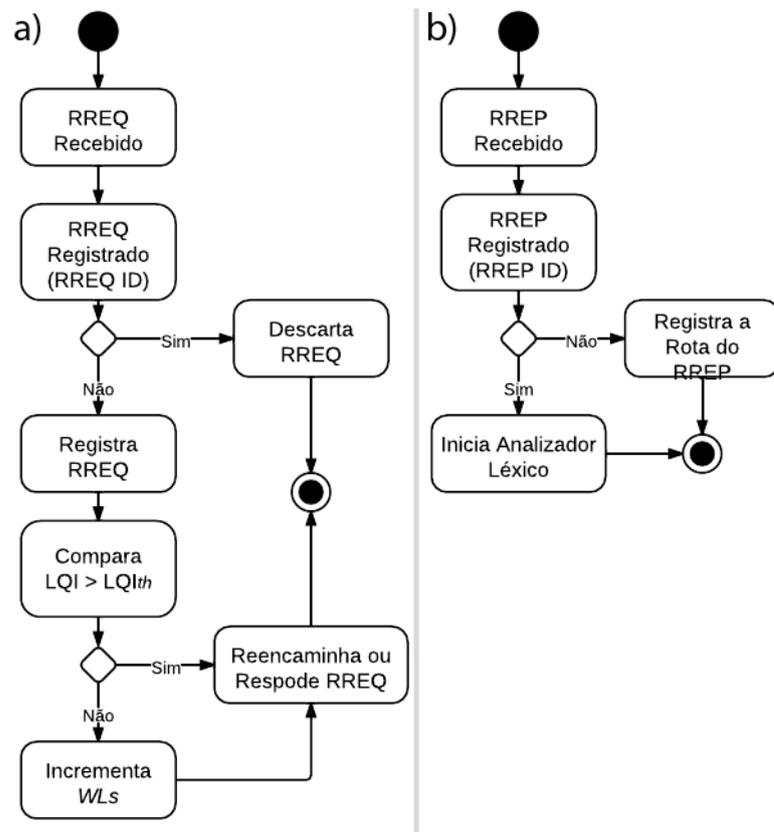


Figura 13: Processamento das mensagens RREQ(a) e RREP(b), respectivamente

3.4 Protocolo GAODV

O protocolo de roteamento G-AODV (*Node Grade Based AODV Routing Protocol*) [58] apresenta uma proposta que expande as funcionalidades do protocolo AODV, visando ambientes de RSSF. G-AODV possui um mecanismo de localização baseado no processo de descoberta de rotas do protocolo AODV, onde cada nodo possui um índice que representa o grau de profundidade na topologia.

Cada nodo armazena um contador próprio denominado G_n que representa sua distância até a estação-base expressa em número de saltos, todos os nodos iniciam este valor igual a -1 . O processo de redefinição do contador ocorre durante um período prévio ao início da aplicação, onde a estação base define seu valor G_n igual a 0 (Figura 15a) e difunde essa informação dentro de mensagens de controle específicas do protocolo G-AODV que possuem o campo denominado G_m .

Após o envio da mensagem pela estação-base, cada nodo receptor executará as seguintes ações: (i) se G_n for maior ou igual a zero significa que esse nodo é uma estação-base, portanto a mensagem deve ser descartada; (ii) caso contrário, o valor de G_n será igual ao valor do campo G_m incrementado. O nodo deverá descartar a mensagem recebida e enviar uma nova mensagem com o valor do campo G_m atualizado. Ao fim do processo, cada nodo possui um valor positivo de G_n (Figura 15b).

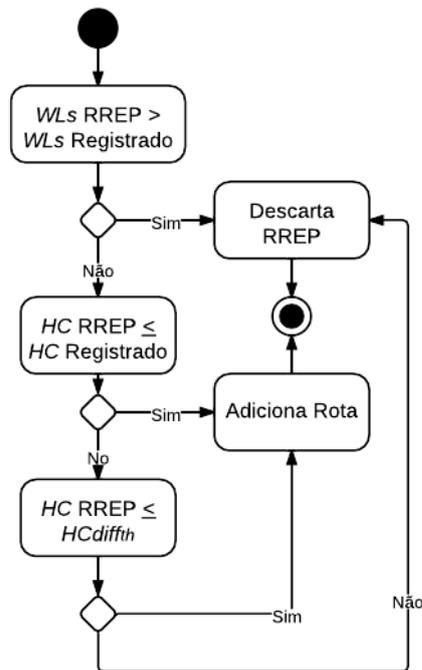


Figura 14: Analisador léxico para escolha de rotas

O processo de descoberta de rotas ocorrerá após o processo de definição de G_n . O nodo sensor que necessita enviar dados à estação-base irá difundir uma mensagem RREQ contendo um campo adicional denominado G_p que contém o valor de G_n do nodo. O nodo receptor da mensagem RREQ compara o valor de G_p com seu próprio valor de G_n , onde duas situações são possíveis: (i) se o valor de G_n é maior que G_p significa que o nodo receptor está mais distante da estação-base que o nodo de origem da mensagem, portanto, descarta a mensagem por possuir rotas desaconselhadas; (ii) em contrapartida, o nodo verifica se possui rotas ativas na tabela e executa o processo de seleção de rotas do protocolo AODV original (Figura 16).

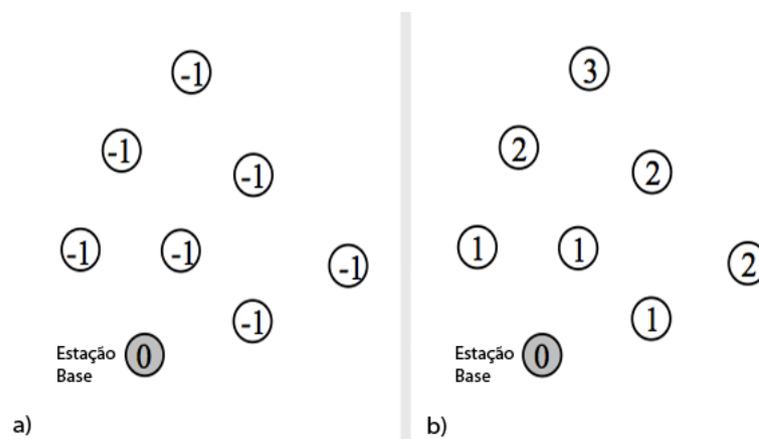


Figura 15: Períodos antes(a) e depois(b) do processo de definição de G_n

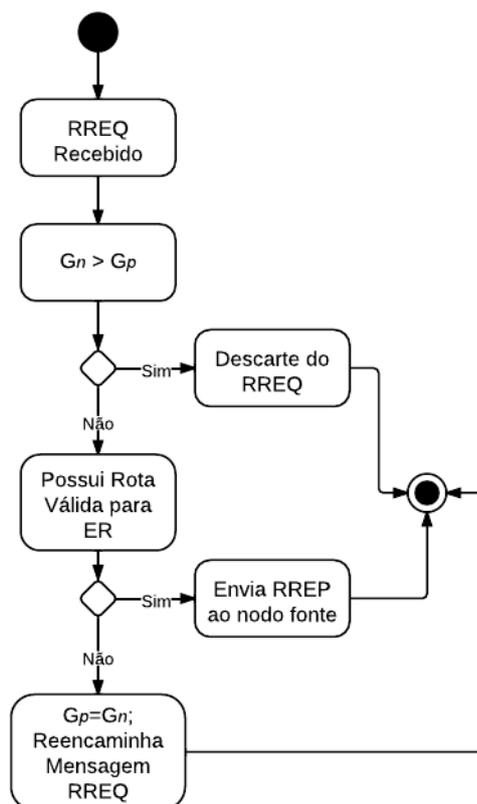


Figura 16: Processamento de mensagens RREQ segundo G-AODV

3.4.1 Conclusão

O protocolo GAODV apresenta uma métrica relacionada à distância dos nodos em relação à estação-base. Através dessa técnica é possível reduzir o número de mensagens RREQ reencaminhadas através da rede, e, conseqüentemente diminuir o *overhead* causado por essas mensagens. Contudo, a redução do número de mensagens de controle não garante um impacto significativo no consumo de energia. Além disso a proposta não apresenta o uso de estimadores de qualidade de enlace e gerência de consumo de energia, dois requisitos fundamentais de protocolos de roteamento para RSSF.

3.5 Energy-Efficient Unicast Routing Protocol

O protocolo de roteamento EEURP (*Energy-Efficient Unicast Routing Protocol*) proposto em [59], apresenta uma extensão do protocolo AODV que considera a energia residual dos nodos ao longo da rota durante o processo de seleção a fim de evitar o consumo desequilibrado do recurso.

O protocolo executa o processo de descoberta de rotas de forma similar ao protocolo AODV. Sobretudo, o algoritmo de seleção de rotas considera o tempo de vida da rede e o seu tamanho, ou seja, considera a energia residual presente dos nodos e o número de saltos da rota. A implementação do algoritmo depende de dois campos adicionais na

mensagem RREQ chamados *Min_RE* (Minimum Residual Energy) e *TRE* (Total Residual Energy). Os campos são configurados com valores iniciais igual a -1 e 0, respectivamente.

Durante o processo de descoberta de rotas, um nodo intermediário receptor da mensagem RREQ deve incrementar número de saltos no campo *Hop Count* da mensagem e avaliar se o nível de energia residual do nodo é menor que o valor registrado no campo *Min_RE*. Caso positivo, o campo deve ser atualizado com o valor de energia residual do nodo corrente. A atualização do campo *TRE* ocorre apenas somando o valor atual do campo ao valor de energia do nodo corrente sem execução de regras para essa tarefa.

Embora os nodos intermediários tenham informações de rota para o destino desejado, esses nodos continuarão reencaminhando as mensagens RREQ até atingir o destino para computação dos campos adicionais da mensagem. Ao receber o primeiro RREQ, o nodo destino inicia um temporizador para aguardar as mensagens RREQ advindas de outras rotas. Finalizado o período de espera, o nodo determina o caminho ótimo a partir da Equação 3.1 do custo da rota:

$$\alpha = \frac{Min_RE * p + ARE * (1 - p)}{Hops} \quad (3.1)$$

O valor de *Min_RE* é o menor nível de energia encontrado entre os nodos da rota, *ARE* é o valor da média de energia residual obtido através da métrica *TRE*, o parâmetro *p* é o coeficiente de ajuste de peso das métricas e *Hops* é o número de saltos da rota

A rota ótima é escolhida através do resultado da equação descrita anteriormente. O valor de α é calculado para cada rota candidata, e a rota com maior valor de α será selecionada, ou seja, o protocolo EEURP coleta informações das rotas e através das métricas adicionais poderá selecionar rotas menores e com maior energia residual, consumindo menos recursos de energia da rede.

3.5.1 Conclusão

O protocolo EEURP apresenta uma técnica de obtenção de energia ao longo de toda a rota, além de uma função custo flexível, capaz de ajustar dinamicamente a importância das métricas empregadas nesse cálculo. Contudo o protocolo obriga que o processamento da mensagem RREQ aconteça somente no nodo de destino, portanto, todos os nodos intermediários dissipam energia encaminhando mensagens de requisição que podem ser atendidas localmente. Além disso, a função custo considera somente métricas de energia residual e o tamanho da rota em número de saltos, ignorando métricas de transmissão de dados como: pacotes recebidos, vazão, qualidade de enlace, entre outros.

3.6 Conclusão

O conhecido protocolo AODV vem sendo aperfeiçoado através de inúmeras novas propostas. Dentro do cenário de RSSF, o protocolo AODV possui grande aceitação desde os padrões adotados pela indústria até o meio científico, dado a seu alto grau de adaptabilidade. Através da adição de técnicas de otimização de recursos como roteamento *multipath* e gerência de topologia, além de métricas complementares relacionadas à qualidade de enlace e de sinal, energia residual, entre outras métricas de QoS. O protocolo AODV possui arquitetura e modo de operação amadurecidos e robustos a diversos cenários críticos, ou não, em RSSF.

Os protocolos apresentados neste capítulo compõem o grande grupo de otimizações que o AODV possibilita, sobretudo, grande parte destas propostas não alcança os requisitos fundamentais para um protocolo de vasta aplicabilidade em RSSF. Essas propostas individualmente não contemplam um conjunto de características como: gestão de energia, balanceamento de carga, análise de qualidade dos enlaces fim-a-fim e padronização IEEE 802.15.4.

O protocolo EEURP foi desenvolvido considerando um cenário de RSSF sob o padrão IEEE 802.11 que possui outras configurações de potência e consumo de energia. Somente os protocolos AODV e LABILE proporcionam roteamento a aplicações onde o tráfego pode ser qualquer nodo da rede e não somente a estação-base. Contudo, os mesmos protocolos não oferecem roteamento energeticamente eficiente. A Tabela 2 apresenta as principais características contempladas pelos protocolos relacionados, comparados ao protocolo REL proposto nesta dissertação.

	AODV	GAODV	EEURP	LABILE	REL
Número de Saltos	X	X	X	X	X
Parametrização			X	X	X
Padrão IEEE 802.15.4		X		X	X
Energia Residual			X		X
Qualidade de Enlace				X	X
Balanceamento de Carga					X
Multipath					X

Tabela 2: Requisitos contemplados pelas propostas de trabalhos relacionados

A característica de parametrização corresponde à funcionalidade de se alterar o comportamento do protocolo através de valores de parâmetros para customizar o processo de seleção de rotas, alterando a importância ou a relevância de determinada métrica. O balanceamento de carga corresponde à funcionalidade de utilização de rotas alternativas para evitar ou diminuir a degradação de recursos de rede ou energia.

A partir deste estudo sobre protocolos roteamento reativos para RSSF planas, foi possível identificar as principais características desejadas para aplicações dessa categoria de rede, e que não há protocolos que atendam completamente aos principais requisitos desses cenários.

CAPÍTULO 4

Roteamento Multicamada Baseado em Energia e Qualidade de Enlace

Neste capítulo são apresentadas em detalhes as características do protocolo de roteamento REL (Routing by Energy and Link Quality) proposto nesta dissertação. O protocolo foi desenvolvido através de dois modos de operação: modo de compatibilidade que permite seu uso simultaneamente com o protocolo AODV ou modo otimizado oferecendo melhor desempenho desconsiderando a compatibilidade mencionada.

4.1 Aplicabilidade e Definição

Os cenários de aplicações de RSSF são popularmente conhecidos por suas características hostis e degradantes, portanto, essas redes necessitam gerenciar requisitos como: tolerância a falhas, vazão e eficiência energética. Sobretudo, gerenciar eficiência de transmissão de dados e energia é um conhecido desafio de redes sem fio [60].

Existem inúmeras propostas a fim de atingir tal objetivo em roteamento para RSSF. Contudo, as propostas para redes de arquitetura plana têm atenção especial do grupo de trabalho RoLL (*Routing Over Low power and Lossy networks*) [10][61][28], responsável por estabelecer a padronização do roteamento nas redes IEEE 802.15.4, devido à sua aplicabilidade em cenários de Internet das Coisas (*Internet of Things*) e cidades inteligentes (*Smart Cities*).

Cenários densos como as aplicações citadas, necessitam de um protocolo de roteamento de propósito geral capaz de prover serviços acessíveis por qualquer nodo, portanto, um nível hierárquico pode contribuir para o aumento da complexidade e redução da cooperação entre os nodos para a realização de uma tarefa.

Dessa forma, REL é uma proposta de protocolo reativo para cenários de RSSF planas, onde, inicialmente, estende o protocolo AODV e absorve suas mensagens de controle, bem como seu processo de descoberta de rotas. Entretanto, o processo de seleção é aperfeiçoado através da introdução de métricas adicionais como energia residual e qualidade de enlace. O protocolo é capaz de fornecer um processo de escolha de rotas robusto, provendo roteamento de múltiplos caminhos e saltos capaz realizar o balanceamento de carga e consumo equilibrado de energia a fim de evitar a saturação prematura de nodos nas rotas mais utilizadas.

4.2 Modo de Compatibilidade

4.2.1 Requisição de Rotas

O processo de descoberta de rotas é herdado do protocolo AODV, onde são difundidas mensagens RREQ em *broadcast* durante o processo. Sobretudo, o protocolo REL utiliza por padrão um processo de descoberta de rotas bidirecional, onde todos os nodos que recebem uma mensagem RREQ devem adicionar um registro de rota para o nodo de último salto, além de um registro para o nodo de origem da mensagem. A mensagem RREQ modificada pelo protocolo REL comporta dois campos adicionais (Figura 17), e requer três ações durante o seu processamento:

- Cada nodo que recebe a mensagem deve atualizar o registro da rota para o último salto da mensagem, copiando o valor atual do campo *Energy* e o tempo de vida (*LifeTime*) da rota
- O valor do campo *Energy* da mensagem deve ser substituído pelo valor atual de energia do nodo receptor
- O valor do campo *WeakLinks* da mensagem deve ser atualizado segundo o campo correspondente no registro de rota para o nodo do último salto

4.2.1.1 Métrica WeakLinks

A métrica LQI fornecida pelo padrão IEEE 802.15.4 indica os valores de qualidade de enlace apenas até para os nodos do próximo salto, e tal limitação impõe severa dificuldade no seu uso como métrica de roteamento. Diante desse problema, o REL agrega ao seu processo de seleção de rotas a métrica *WeakLinks* utilizada no protocolo LABILE introduzida na Seção 3.3.

O valor estabelecido para o limiar de LQI_{th} classifica os enlaces para a contabilização de enlaces bons e ruins, e conseqüentemente, mensurar o potencial de confiabilidade de uma rota, através do contador *WeakLinks* adicionado nas mensagens RREQ e RREP. A contabilização dos enlaces fracos nos sentidos de requisição e resposta permite

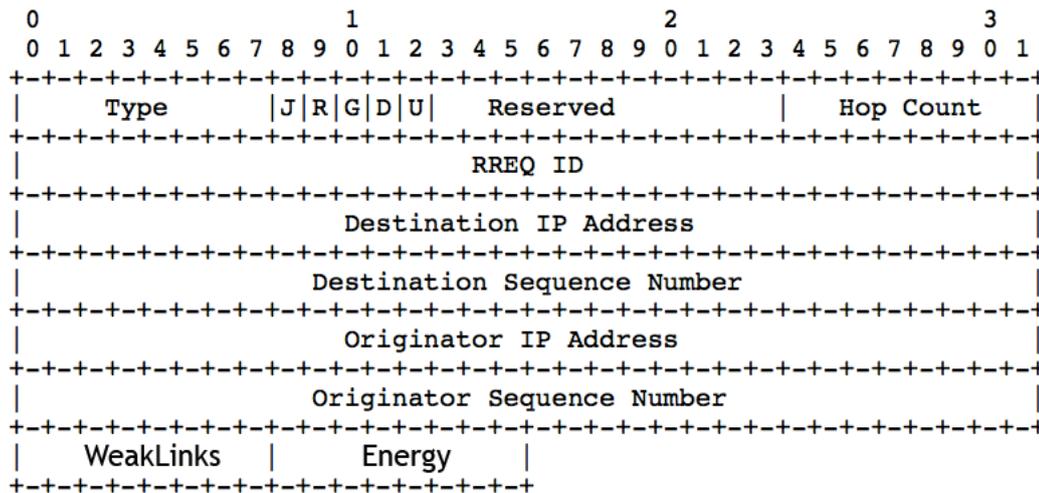


Figura 17: Mensagem de controle RREQ do protocolo REL

que ambos os nodos, de origem e destino, possam avaliar o potencial de confiabilidade assimetricamente.

A Figura 18 apresenta o processo de classificação dos enlaces e funcionamento da métrica *WeakLinks*. Inicialmente, o nodo fonte envia a mensagem RREQ com o valor do campo *WeakLinks* igual a zero (expresso na figura por $WL=0$), o nodo vizinho que recebe a requisição, avalia o valor do LQI para a mensagem recebida e classifica-o segundo o LQI_{th} . Devido à inexistência de um registro de rota para o destino desejado, o nodo reenvia a mensagem RREQ com o valor do campo modificado, onde o processo se repete até atingir o nodo destino.

O nodo destino, ao receber a requisição, cria um registro de rota para o nodo de origem com o valor de *WeakLinks* igual ao valor do campo da mensagem e próximo salto igual ao endereço do último nodo que reencaminhou a mensagem RREQ. Após essa etapa inicial, o nodo destino atende à requisição, enviando a mensagem RREP correspondente, e o processo de classificação dos enlaces se repete, bem como a adição de novo registro de rota no nodo de origem.

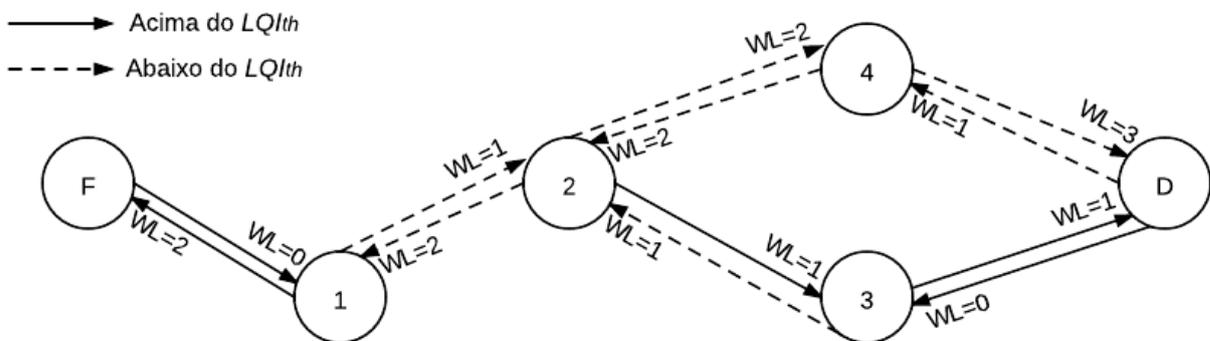


Figura 18: Processo de classificação dos enlaces da rota segundo a métrica *WeakLinks*

Através dos valores de LQI obtidos a partir das mensagens de controle e pacotes de dados trafegados, é possível mensurar a confiabilidade do enlace e considerá-lo como bom

ou ruim. Contudo, é comum a mudança de forma abrupta do valor, gerando dados espúrios de avaliação. Esse fenômeno necessita ser tratado de forma a amortizar esta variação, do contrário, o processo de avaliação de qualidade de enlace prejudicará a eficiência energética ao elevar o número de substituição da rota utilizada.

Cada nodo da rede que utiliza o protocolo REL soluciona esse problema através do uso de um vetor de n posições para cada nodo vizinho. O valor de n representa a quantidade de amostras de LQI que devem ser armazenadas para o cálculo do valor médio. O parâmetro pode ser alterado pelo usuário conforme o tráfego de dados gerados pela aplicação. Os valores são armazenados até preencher completamente o vetor. Ao fim desse processo, o valor de LQI médio obtido será classificado segundo a métrica *WeakLinks* e armazenado na tabela de rotas para o destino correspondente.

4.2.2 Resposta e Seleção de Rotas

4.2.2.1 Mensagem RREP e o Processo de Seleção de Rotas

A mensagem de controle RREP apresentada na Figura 19, possui dois campos adicionais devido à necessidade de contabilização e atualização dos valores de *WeakLinks* e energia residual durante o processo de descoberta de rotas em ambos os sentidos de requisição e resposta.

As informações contidas na mensagem são adicionadas ao registro feito na tabela de rotas, cada registro de rota possui o valor atualizado de energia do seu nodo de próximo salto, bem como o número de enlaces não confiáveis segundo a métrica *WeakLinks*, além das informações definidas pelo protocolo AODV discutidas na Seção 3.1.

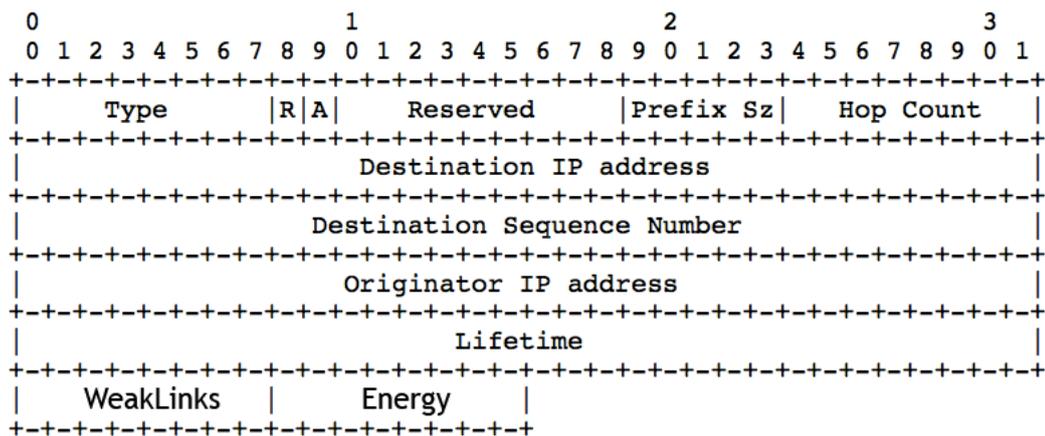


Figura 19: Mensagem de controle RREP do protocolo REL

O processo de seleção de rotas (Figura 20) é marcado pela disputa entre duas rotas para escolha da rota padrão para um determinado destino, e deve ser iniciado a partir de um dos eventos: (i) processamento de uma mensagem RREP recebida ou (ii) uma de mensagem RADV apresentada posteriormente na Seção 4.2.3..

A solução proposta para esse problema é a adição de uma nova mensagem de controle para notificação dos nodos vizinhos quando ocorre uma variação no nível de energia de um nodo. A mensagem RADV (*Route Advisor*) é utilizada em eventos de variação de energia, ou seja, em situações onde o nodo constata a diminuição do tempo de vida da sua reserva de energia (evento de descarga), ou situações onde o nodo possui fonte de energia alternativa como células fotovoltaicas e recupera a carga de sua reserva (evento de recarga). O formato da mensagem RADV é apresentado na Figura 21 onde o campo *Event* é usado para definição do evento de carga ou descarga de energia.

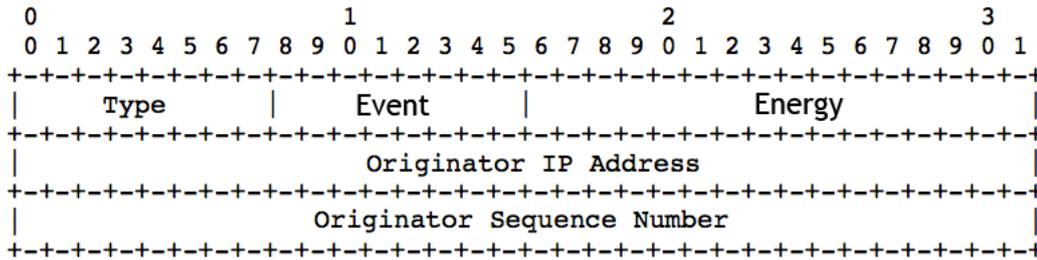


Figura 21: Mensagem de controle RADV do protocolo REL

As mensagens RADV devem ser enviadas sempre que o índice RADV (Ind_{radv}) do nodo atingir o limiar de energia (E_{th}). O limiar representa a diferença máxima entre o valor de energia atual e o valor registrado desde a ocorrência do último evento de energia. Um nodo deve monitorar e calcular apenas o seu próprio Ind_{radv} , os nodos vizinhos devem apenas ser apenas notificados quando ocorrer o evento de energia.

$$|Ind_{radv}| = Energ_{reg} - Energ_{atu} \quad (4.1)$$

O Ind_{radv} é o valor calculado dessa diferença conforme a Equação 4.1, onde $Energ_{reg}$ é o último valor de energia registrado e $Energ_{atu}$ é o valor atual de energia do nodo. Ao receber uma mensagem RADV, o nodo deve avaliar se o nodo indicado na mensagem é utilizado como próximo salto de uma rota ativa, em caso positivo o nodo deve reiniciar o processo de seleção de rotas.

4.3 Modo Otimizado

4.3.1 Diferenças e Melhorias

A segunda etapa do desenvolvimento do protocolo REL compreende o aperfeiçoamento da proposta através da reformulação das mensagens e serviços oferecidos, devido ao fato do protocolo REL, inicialmente, estender as funcionalidades do AODV. Parte das características herdadas não são compatíveis com os cenários de RSSF.

Características como a presença de *flags* não utilizadas e ferramentas de roteamento *multicast* que estão presentes no corpo das mensagens de controle podem ser

removidas dando lugar aos campos adicionais de energia e qualidade de enlace, sem que estes configurem *overhead*. A remoção dos campos mencionados permite a configuração de mensagens de controle menores e de menor complexidade. Além disso, o modo otimizado considera o protocolo REL como único protocolo de roteamento utilizado na rede, e portanto, eliminando as rotinas adicionais pertinentes ao modo de compatibilidade.

A mensagem RREQ reformulada segundo o protocolo REL, apresentada na Figura 22, remove as *flags Join, Repair, Gratuitous, Destination Only* e *Reserved* e seus respectivos mecanismos de funcionamento. Devido ao processo de descoberta de rotas bidirecional provido pelo protocolo REL, o uso das *flags Gratuitous* e *Reserved* geram tráfego adicional e redundante. As *flags Join* e *Repair* são utilizadas em cenários *multicast* e, portanto, não utilizadas nesse contexto.

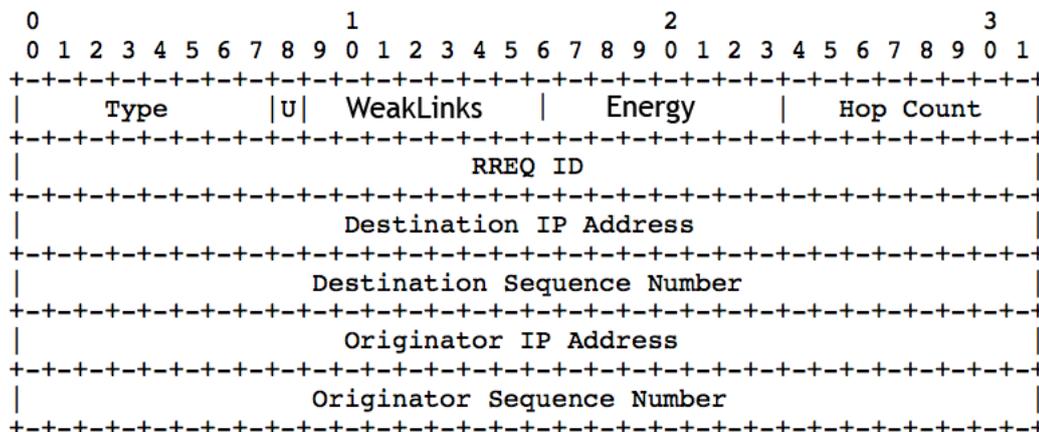


Figura 22: Mensagem RREQ segundo o protocolo REL otimizado

A mensagem RREP original do protocolo AODV também possui campos não utilizados no contexto de RSSF, portanto, a *flag Repair* foi removida devido à sua utilização principalmente em cenários *multicast*, além desta, a *flag Acknowledgment*, por ser de característica não obrigatória e capaz de gerar tráfego adicional. Os campos *Reserved* e *Prefix Size* foram removidos igualmente devido à sua não utilização no processo de roteamento da proposta, além de permitir a realocação dos campos de *Energy* e *WeakLinks*.

Os campos de *Originator Address* e *Originator Sequence Number* foram removidos igualmente devido ao comportamento bidirecional durante o período de descoberta de rotas do protocolo REL. A mensagem RREP otimizada segundo o protocolo REL é apresentada na Figura 23.

A segunda etapa de desenvolvimento da proposta também exclui o processo de notificação de nodos através de *Hello_Messages*, tais mensagens de notificação podem degradar o desempenho da rede devido às características limitadas do padrão IEEE 802.15.4 e à densidade das RSSF, além da diminuição do tempo de vida da reserva de energia.

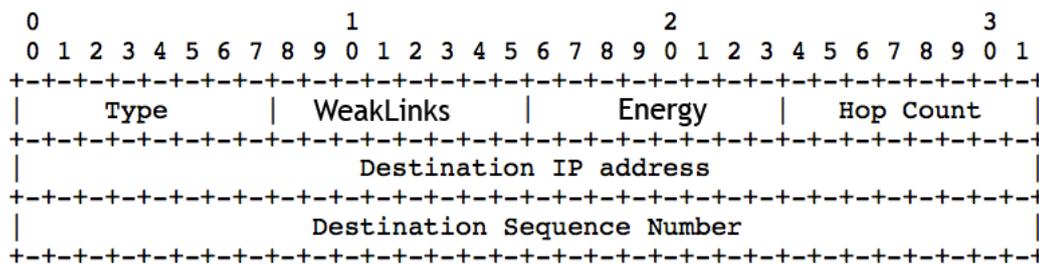


Figura 23: Mensagem RREP segundo o protocolo REL otimizado

4.3.2 Roteamento Multipath e Tabela de Rotas

A tabela de rotas do protocolo REL otimizada adiciona aos registros de rota novas *flags* de estado de roteamento. A remoção do campo de Interface de Rede e a adição dos campos de Energia Residual e *WeakLinks* estão presentes desde a primeira etapa, contudo, as seguintes *flags* de estado de roteamento foram adicionadas aos registros de rota:

- **Candidata:** determina que o registro de rota é um possível caminho a ser utilizado como rota ativa ou durante o balanceamento de carga.
- **Temporária:** determina que o registro de rota está sendo utilizado para a vazão de dados, contudo, o processo de seleção de rotas está em andamento.
- **Eleita:** usada apenas durante o processo de seleção, determina que o registro de rota é temporariamente a melhor escolha.

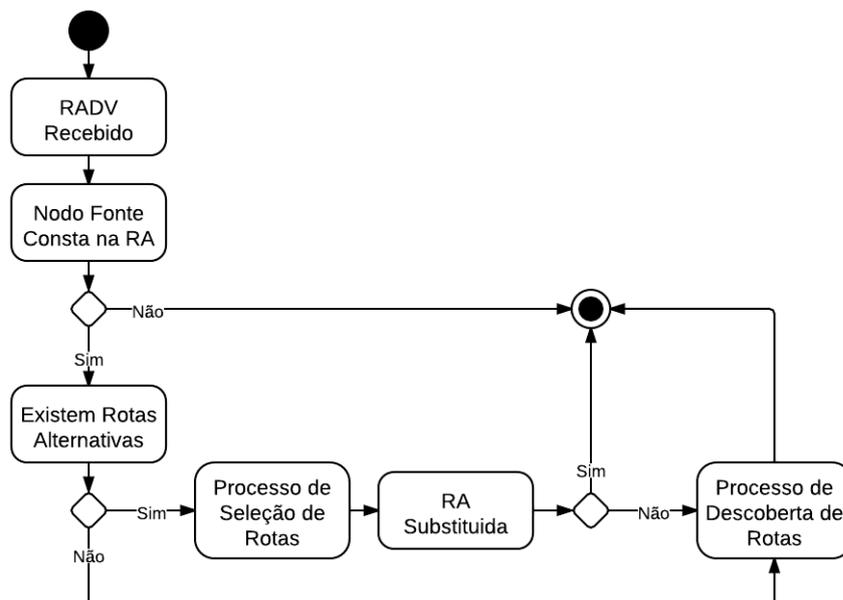


Figura 24: Processamento da mensagem RADV

Após o início do processo de descoberta de rotas, a primeira mensagem de RREP recebida é marcada com a *flag* Temporária. Dessa forma os dados pendentes são enviados. Após o término do período de espera por mensagens RREP determinado pela

constante *NET_TRANSVERSALTIME*, a rota Temporária é marcada como Eleita e todas as mensagens RREP recebidas após o registro da primeira rota são marcadas como Candidatas e se inicia o processo de seleção de rotas.

O processo de seleção compara as rotas Candidatas em relação à Eleita, caso a rota Candidata apresente melhor resultado durante o processo, deverão inverter suas *flags* e, ao final do processo, a rota Eleita deverá se tornar Ativa. Após o processo de seleção, as rotas marcadas como Candidatas têm seu Tempo de Vida configurado conforme a constante *CANDIDATE_ROUTE_TIMEOUT*. O valor padrão da constante é o dobro de *ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT*.

Ao receber uma mensagem RADV, o nodo receptor deve reavaliar a rota em uso segundo o processo apresentado na Figura 24, a fim de analisar se esta rota ainda representa a melhor opção para o tempo de vida da rede.

CAPÍTULO 5

Resultados de Testbed e Simulações

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos da avaliação de desempenho do protocolo REL e relacionados. As avaliações foram feitas, inicialmente, através de *testbed* com número reduzido de nodos, como descrito na Seção 5.1. Após a validação inicial, através de simulação o protocolo foi avaliado em cenários de maior densidade e tráfego como esperado em aplicações de cidades inteligentes (*smart cities*). A avaliação é descrita na Seção 5.2.

5.1 Testbed

A primeira etapa de avaliação do protocolo REL compreende o seu uso através de experimentação. A avaliação através de *testbed* representa grande importância devido à necessidade de calibração dos parâmetros de simulação realizados na etapa seguinte, além de garantir a aplicabilidade da proposta em situações reais. Parâmetros pertinentes a modelos de colisão, propagação, cálculo de RSSI, SNR e LQI, entre outros, são configurados através de dados obtidos empiricamente a fim de garantir maior confiabilidade do cenário simulado.

O protocolo REL, em sua primeira fase de avaliação, implementa a proposta utilizando *motes* SunSPOT (apresentados na Seção 2.4.3). O *motes* utilizam a pilha de protocolos proposta pela empresa Sun Microsystems, portanto, possui implementação nativa do protocolo AODV, além de utilizar o rádio transceptor CC2420. Conforme a recomendação do fabricante descrita na Seção 2.2.1.1, o valor de LQI é obtido empiricamente através do uso do valor de correlação (CORR) dentro de uma escala que varia entre 50 e 110 usada como referência [62].

O estudo inicial da variação de LQI deve ser executado para estabelecer o valor

adequado do limiar de LQI_{th} . Utilizando dois *motes* e uma aplicação de geração de tráfego escalar, os valores de LQI foram obtidos variando-se a distância entre os nodos. A Figura 25 apresenta os resultados de *Packet Delivery Ratio* (PDR) em relação ao valor de CORR.

O valor adequado de LQI_{th} estabelecido compreende o valor médio de LQI igual à 220, que corresponde ao valor aproximado de 98 na tabela de CORR. Esse limiar apresenta taxa de entrega de pacotes a partir de 80%, um valor de entrega aceitável para grande parte das aplicações de RSSF [34].

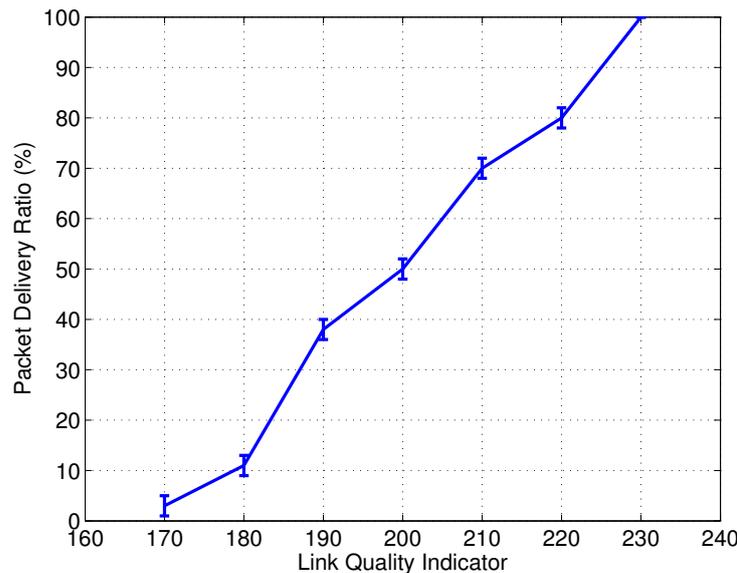


Figura 25: Experimento de LQI_{th} obtidos a partir de testbed utilizando o rádio CC2420

Os experimentos de *testbed* foram realizados 10 vezes para cada configuração de protocolo e tráfego, as configurações de tráfego são descritas posteriormente, os valores apresentados nos gráficos são o resultados do valor médio calculado a partir de um intervalo de confiança de 95%. O objetivo deste trabalho experimental é obter informações reais para calibração dos parâmetros de simulação posteriormente, dentre os principais parâmetros de calibração destaca-se o estimador de qualidade de enlace LQI. Além disso, o experimento real possibilita mensurar o grau de eficiência da proposta em hardware real.

A primeira configuração de experimentos compreende uma topologia em grade composta por dez nodos, como apresentada nas Figuras 26, onde os nodos comuns formam uma matriz 3x3 e a estação-base é posicionada em uma das bordas. A distâncias entre os nodos foi definida a fim de forçar a comunicação através de múltiplos saltos dos nodos mais afastados. O ambiente de testes é formado por características *indoor* com tráfego de pessoas, existência de redes WiFi, além de variações climáticas gerando adversidades à transmissão de dados [63] durante os diferentes dias e horários de execução dos experimentos.

O primeiro experimento compreende um tráfego de 6000 pacotes enviados por

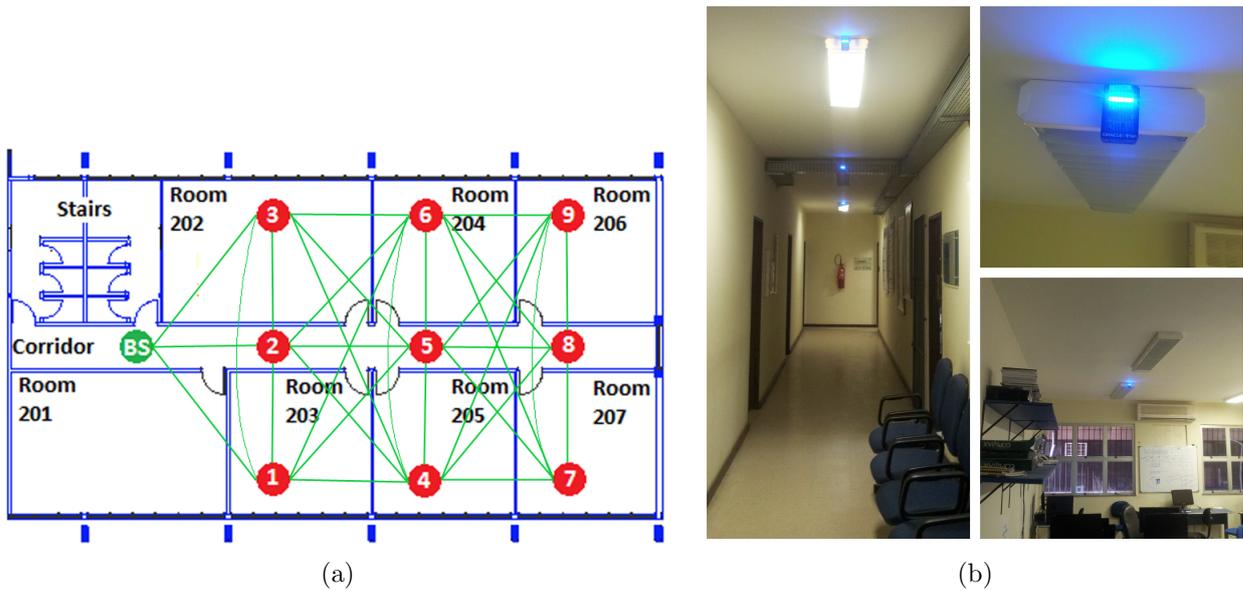


Figura 26: Topologia e disposição dos nodos no experimento de testbed

cada nodo em direção à estação-base com intervalo de um segundo entre os envios. Durante o uso do protocolo AODV, os resultados de consumo de energia apresentados na Figura 27a mostram o esgotamento prematuro de energia de nodos mais próximos a estação-base e localizados nas rotas mais utilizadas (nodos 2, 4 e 5), além de consumo mínimo de energia de 12%. O consumo máximo de 23% registrado no nodo 5 demonstra o uso demasiado do nodo ao centro da topologia.

Durante o uso do protocolo REL sob as mesmas condições, a distribuição de energia entre os nodos ocorre de forma equilibrada. O algoritmo de seleção de rotas com balanceamento de carga e notificação de consumo, permite aos nodos alternarem o uso das rotas a fim de não sobrecarregar uma rota específica, prejudicando o desempenho e o tempo de vida da rede. A Figura 27b apresenta os resultados de consumo mínimo de energia da rede igual a 10% e consumo máximo de 14%. A diferença de 4% entre os limites de consumo é resultado do valor do limiar de E_{th} , que contrasta com a diferença de 10% obtida com o protocolo AODV, que não possui essa característica.

Durante os experimentos, foram contabilizados as taxas de entregas de pacote a partir do PDR de cada nodo. Como apresentado na Figura 28, os nodos 5 e 6 apresentaram os menores resultados para esta métrica, sendo 95.9% e 96.9% respectivamente durante o uso do AODV. Devido a ausência de mecanismo de avaliação de qualidade de enlace no protocolo original, podemos mensurar a diferença de 2.23% nos valores médios de PDR entre as duas propostas, sendo o valor médio obtido pelo AODV 97.41% e 99.64% obtido pelo REL. O nodo 5 obteve a maior diferença comparando-se as duas propostas, o valor de 4% de diferença representa a incapacidade do protocolo AODV de detectar pontos críticos de tráfego, diferentemente do REL ao qual foi capaz de realizar o balanceamento de carga evitando a saturação prematura e a perda de pacotes roteados por este nodo.

O segundo experimento realizado através de *testbed* compreende a mesma topo-

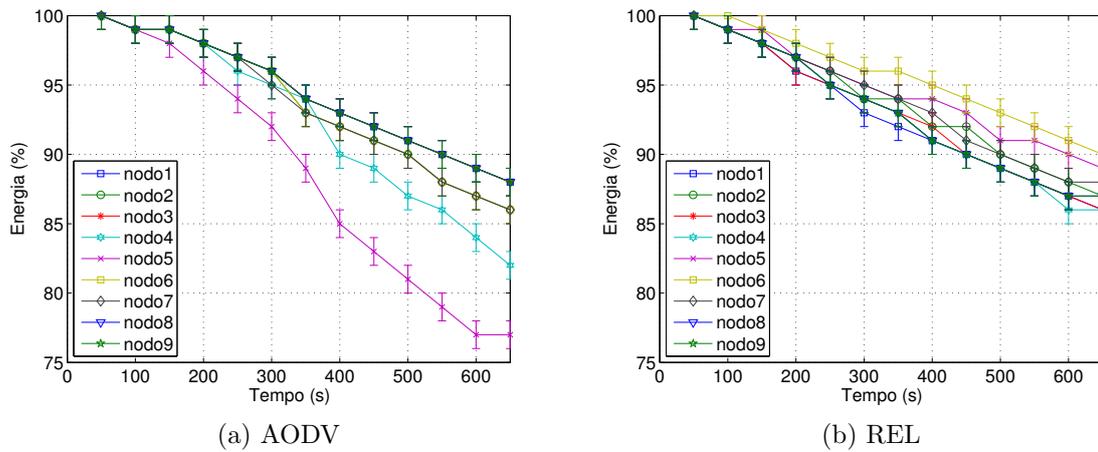


Figura 27: Energia residual durante o primeiro experimento utilizando os protocolos AODV e REL

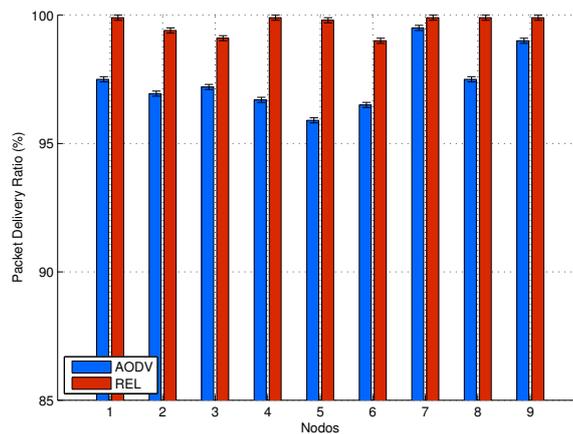


Figura 28: Resultados de entrega de pacotes durante o primeiro experimento

logia, entretanto, com tráfego superior em diferente dia e horário de execução. O objetivo deste experimento é prover um cenário diferenciado com maior demanda de tráfego, e consequentemente, maior probabilidade de ocorrência de erros e congestionamento. O experimento configura um tráfego de 12000 pacotes enviados à estação-base por cada nodo com intervalo de 500 milisegundos entre os envios. A Figura 29a apresenta os resultados do segundo experimento, destacando novamente o fenômeno de esgotamento prematuro dos três nodos mais utilizados no roteamento de mensagens. O consumo de energia desses nodos atingiu 25% da reserva antes da metade do experimento. Além disso os resultados do experimento apontam um consumo desordenado dos recursos de energia após 15% do tempo de experimentação, além de 25% de consumo da reserva total de energia por conta de toda rede antes de atingir 70% do tempo de experimentação.

O uso do protocolo REL durante o segundo experimento (Figura 29b) apresentou resultado superior de consumo de energia, os limiares de consumo não ultrapassaram a

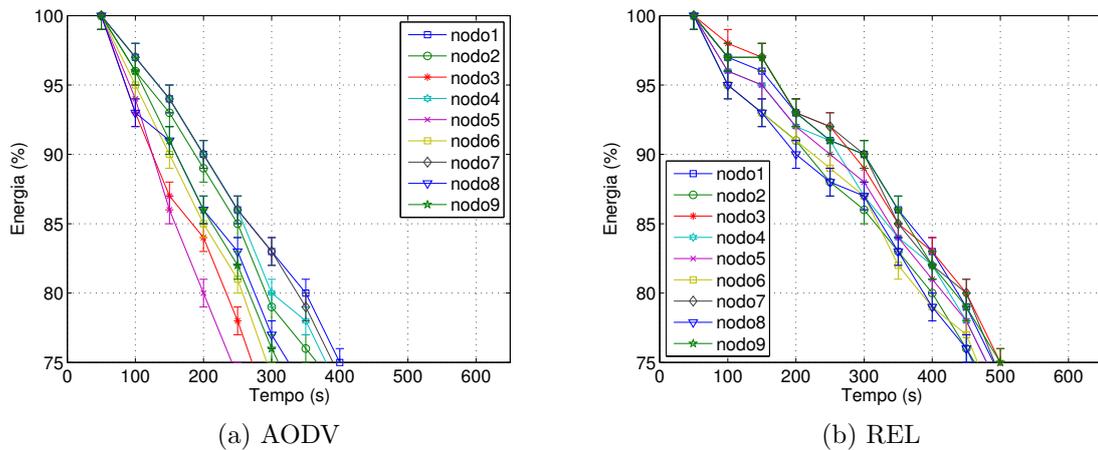


Figura 29: Energia residual durante o segundo experimento utilizando os protocolos AODV e REL

diferença de 5%, e os nodos apresentaram consumo equilibrado atingindo 75% da reserva de energia após 77% do tempo de experimentação.

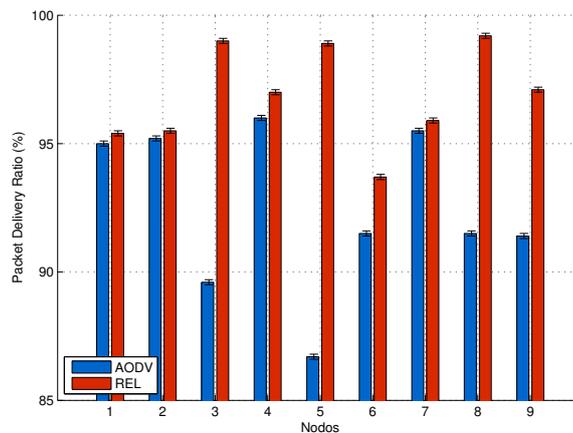


Figura 30: Resultados de entrega de pacotes durante o segundo experimento

Os erros apresentados durante a execução do segundo experimento mostram superior escolha de rotas do protocolo REL (Figura 30), embora os nodos 1, 2, 4 e 7 apresentem resultados próximos para ambos os protocolos. Os nodos 3, 5, 6, 8 e 9, a maior parte da rede, apresentaram valores de até 13.3% de perda de pacotes usando o protocolo AODV. Em contrapartida, os mesmos nodos atingiram o máximo de 6.6% de perdas usando o REL, isto é, uma melhoria de 6.7% de entrega de pacotes. Além disso, o nodo 5 novamente obteve o maior índice de perdas usando o protocolo AODV, contudo o protocolo REL apresenta uma melhoria de 12.3% para este mesmo nodo.

A discrepância entre os resultados obtidos pelos nodos com apenas um erro é justificada pelo uso do protocolo *RadioStream*, descrito na Seção 2.3.3, esse protocolo realiza consecutivas tentativas de recuperação do pacote, sobretudo os erros apresentados

são apenas para os pacotes sem sucesso de reparação. Embora ocorram erros durante a execução do protocolo REL, os enlaces utilizados segundo seu processo de seleção de rotas, apresentam características favoráveis a recuperações bem sucedidas.

5.2 Simulação

A segunda etapa de avaliação do protocolo REL é realizada através de simulação, utilizando as ferramentas OMNET++ 4.6 [64] e Castalia 3.2 [65]. O simulador de eventos discretos OMNET++ é amplamente difundido no meio acadêmico, aplicado em diversas publicações e adequado para RSSF [66]. O Castalia *framework* é desenvolvido especificamente para RSSF e *Body Area Networks* (BAN), além de ser empregado em diversas pesquisas como no grupo de trabalho RoLL [28].

O uso de simulação possibilita a criação de cenários mais densos e complexos além de variação de parâmetros com relativa facilidade. Os cenários simulados apresentam variação dos limiares de energia, número de saltos e LQI, além de número de nodos e topologia, possibilitando uma análise ampla do desempenho da proposta. Os resultados apresentados são valores médios calculados a partir de 30 simulações e intervalo de confiança de 95%. Os parâmetros utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 5.2.

Parâmetros	Valor
Área de simulação	100x100m
Número nodos	20, 40, 60, 80 e 100
Tempo de Simulação	60min
Localização da Estação Base	(50,50)
Topologia	Randômica
Potência de transmissão	-25dbm
Tráfego	5pkt/s
Tamanho do Pacote	105bytes
Tamanho do <i>buffer</i>	32 frames
Energia Inicial	18720J
Limiar de E_{th}	2
Limiar de $HCdiff_{th}$	4, 6
Limiar de LQI_{th}	125
Modelo de rádio	CC2420

Tabela 3: Parâmetros de simulação

Os limiares de LQI (LQI_{th}) e energia (E_{th}) foram avaliados a partir dos experimentos de *testbed*, portanto foram reaproveitados para a simulação devido a calibração do simulador empregado. Por outro lado, o limiar de ($HCdiff_{max_allow}$) necessitou de simulação para sua definição devido ao número limitado de nodos do *testbed*, portanto foi simulado a partir de um grupo de possíveis valores. Os valores entre 2 e 10 contemplam a

diferença do número de saltos entre rotas para todos os cenários apresentados, contudo, o limiar de número de saltos compreende uma característica fundamental para o processo de seleção de rotas, portanto, o valor obtido no cenário de 100 nodos é a base para os demais cenários. Os resultados da simulação mostram a variação do limiar e seu respectivo desempenho de vazão (Figura 31), onde o valor de 98.3% corresponde a 6 saltos máximos de diferença entre as rotas candidatas.

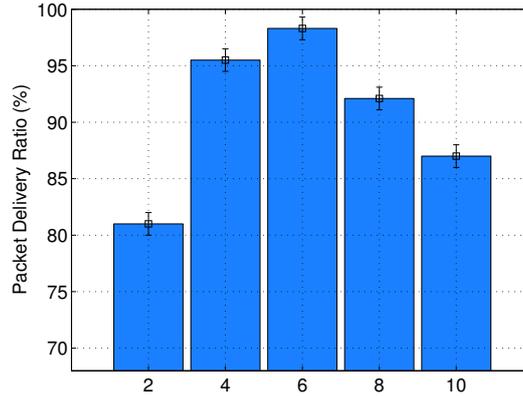


Figura 31: Variação do limiar de número de saltos $HCdiff_{max_allow}$ para o cenário de 100 nodos

A vazão dos protocolos avaliados é demonstrada a partir do PDR para cada configuração de densidade da rede. O percentual de pacotes recebidos para a topologia de 20 nodos (Figura 32a) apresenta pequenas diferenças entre as propostas, onde o protocolo REL obteve melhor resultado atingindo PDR de 99.4%, superando os protocolos AODV e LABILE sob diferenças de 3.1% e 1.2%, respectivamente. Para a topologia de 40 nodos (Figura 32b) o desempenho de vazão é reduzido em todas as propostas, entretanto o desempenho superior do protocolo REL ocorre novamente sob diferenças de 5.6% para o AODV e 3.1% para o REL.

Os resultados demonstram desempenho limitado do protocolo REL devido a escolha satisfatória de rotas, embora o protocolo LABILE utilize a mesma métrica de estimação de qualidade de enlace. O limitado número de rotas aliado à necessidade de consumo equilibrado de energia, limita o rendimento de vazão do protocolo REL. Contudo o desempenho é aumentado através do número maior de nodos da rede como apresentado nas topologias seguintes.

A topologia de 60 nodos (Figura 32c) apresenta redução de desempenho de 3.6% para o protocolo AODV, 1,8% usando o LABILE e 0,4% usando o REL em relação ao cenário de 40 nodos. Contudo, essa configuração apresentou desempenho superior para o protocolo REL, com diferença de 4.5% do protocolo LABILE e 8.8% para o AODV, confirmando a premissa de melhor desempenho em redes com maior número de rotas alternativas.

O cenário composto por 80 nodos (Figura 32d) repete o superior desempenho do protocolo REL. A vantagem do protocolo proposto sobre os demais é de 7.9% e 9.4% para

os protocolos LABILE e AODV, respectivamente. A depreciação dos protocolos similares pode ser justificada por:

- O aumento do número de nodos proporciona maior número de rotas candidatas e conseqüentemente a ocorrência de fenômenos de atenuação de sinal. Portanto a ausência de uma técnica de amortização de variação de LQI aumenta a substituição de rotas em protocolos baseados em qualidade de enlace, conseqüentemente, prejudicando a vazão de dados.
- O uso do número de saltos como única métrica de seleção de rotas permite situações como de persistência do nodo fonte em rotas não confiáveis, independente do número de erros ocasionados, degradando a vazão de dados.

Os resultados de vazão no cenário de 100 nodos confirma a melhoria da vazão de dados ocasionada pela amortização da variação do LQI e do processo de seleção adequada de rotas. O protocolo REL atinge o valor de 97.1% de entrega de dados, superando o protocolo LABILE em 9.2%, o protocolo AODV em 12%. O cenário de 200 nodos representa rede de maior densidade do simulada, de forma a exemplificar uma aplicação RSSFs de larga escala em cenário de cidades inteligentes (*smart-cities*). Neste cenário o protocolo REL apresenta desempenho superior de 13.7% ao AODV e 11.2% ao LABILE.

Os protocolos avaliados segundo sua latência apresentaram os resultados conforme a Tabela 5.2 que categoriza os pacotes em três classes: até 40 milisegundos, entre 40 e 80 e por fim pacotes com atraso superior a 80 milisegundos. Os resultados da topologia de 20 nodos são similares para as três propostas, contudo o protocolo AODV apresentou significativa queda de desempenho a partir da topologia de 40 nodos, atingindo a diferença de 9% dos pacotes obtiveram atraso superior a 40ms. O protocolo REL supera as propostas relacionadas em todos os cenários, contudo ressaltamos a diferença a partir de 4% se comparado as demais propostas a partir de 100 nodos.

Os cenários propostos também foram avaliados conforme o tempo de vida da rede, isto é, o tempo decorrido até que todos os nodos da rede tenham consumido toda a sua reserva de energia. Os cenários avaliados assumem que os sensores são dotados de 18720 *Joules* de reserva de energia, o equivalente a duas pilhas AA e, como nos *motes* MEMSIC descritos na Seção 2.4.2. O valor estabelecido para o E_{th} representa um desafio devido à necessidade de equilibrar a notificação dos níveis de energia e menor impacto de *overhead* dessa sinalização.

Os resultados do tempo de vida da rede para os cenários simulados são apresentados nas figuras a seguir. O protocolo REL superou as propostas relacionadas em todos os cenários devido à ausência de gerência de tempo de vida nesses trabalhos. Além disso, os resultados das propostas são otimizados em cenários mais densos, entretanto os resultados obtidos pelo protocolo LABILE são similares ao AODV em grande parte do experimento.

Os resultados de tempo de vida da rede utilizando o protocolo REL, mostram melhoria considerável do período que antecede o primeiro esgotamento de energia. O

Protocolo	Número de Nodos	Latência		
		0–40 ms	40–80 ms	>80 ms
AODV	20	99%	0.6%	0.4%
	40	94.5%	4.3%	1.2%
	60	90.6%	5.4%	4%
	80	85.4%	8.2%	7.4%
	100	80.6%	10.5%	9.9%
	200	74.6%	14.1%	12.3%
LABILE	20	99.5%	0.5%	0%
	40	98.7%	0.9%	0.1%
	60	98%	1.1%	0.9%
	80	96.3%	2.5%	1.2%
	100	94.5%	3.5%	2%
	200	91.1%	5%	3.9%
REL	20	99.8%	0.2%	0%
	40	99.4%	0.3%	0.1%
	60	99%	0.6%	0.4%
	80	98.7%	1.1%	0.2%
	100	98.5%	1.3%	0.2%
	200	95.2%	3%	1.8%

Tabela 4: Resultados de latência obtidos através de simulação

início do esgotamento no cenário de 20 nodos (Figura 33a) ocorre no instante 12, e no instante 21 no cenário de 100 nodos (Figura 33e), um período relativamente superior. O período desde o primeiro esgotamento até o esgotamento total da rede também apresenta melhoria conforme a densidade dos cenários, o cenário de 20 nodos utiliza 27 minutos até atingir o esgotamento total da rede. Em contrapartida, o cenário mais denso estende o período para 40 minutos.

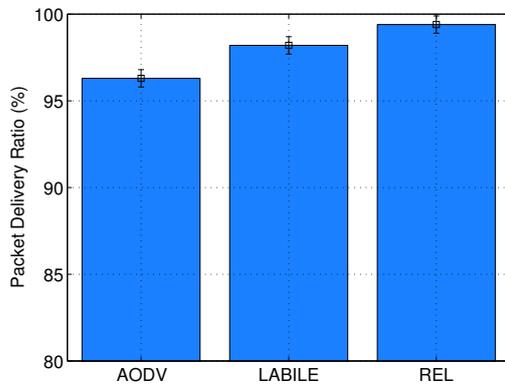
5.3 Conclusão

O uso de protocolos energeticamente eficientes é uma importante ferramenta no desafio de prolongar o tempo de vida da rede em cenários de RSSF. Aliar o uso de técnicas de balanceamento, como o algoritmo apresentado pela proposta, as métricas de qualidade de enlace, é possível equilibrar o uso otimizado dos recursos dos nodos individualmente e da rede inteira.

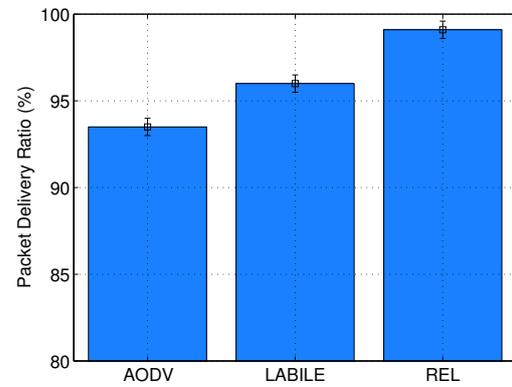
O consumo equilibrado de energia e a escolha de rotas adequadamente, através da qualidade de enlace, garantem um bom desempenho da rede através do ajuste fino proporcionado pelos limiares propostos. Contudo, o estudo prévio do ambiente e da aplicação empregada são fundamentais para definição destes parâmetros.

Utilizando estes mecanismos, o protocolo REL aumentou o tempo de vida da rede e otimizou a entrega de dados em cenários de adversidade, entretanto, o seu desempenho

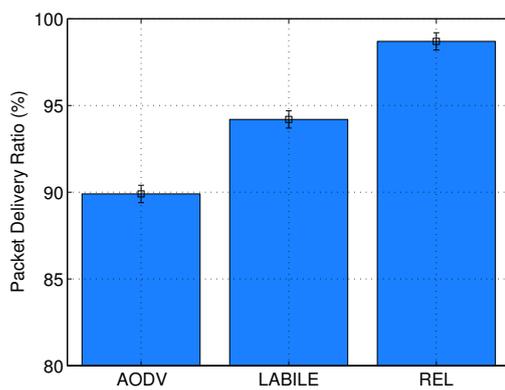
é minimizado em cenários de baixa densidade. Os cenários mais densos apresentaram aumento de mais de 12% da vazão de dados em cenário real de experimentação, e aumento do tempo de vida da rede em até 20 minutos no cenário mais denso simulado nessa pesquisa.



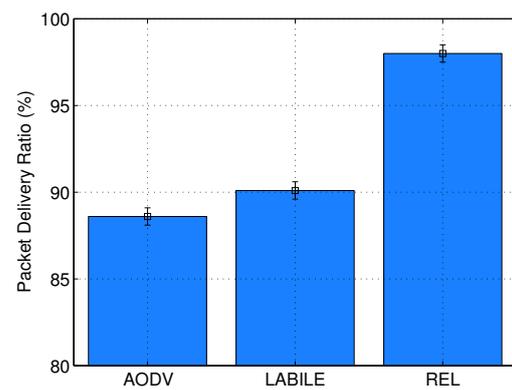
(a) Cenário com 20 Nodos



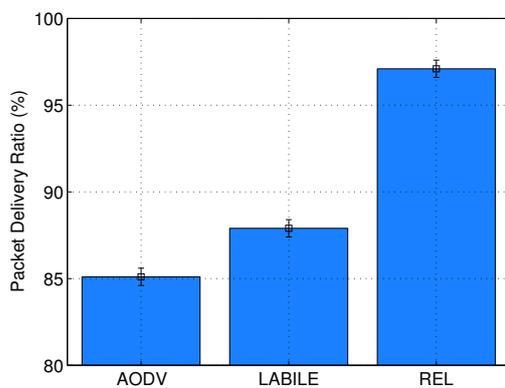
(b) Cenário com 40 Nodos



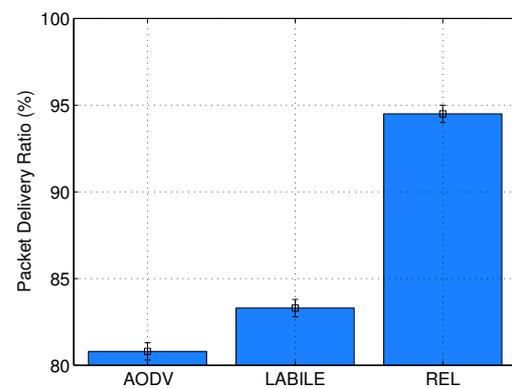
(c) Cenário com 60 Nodos



(d) Cenário com 80 Nodos

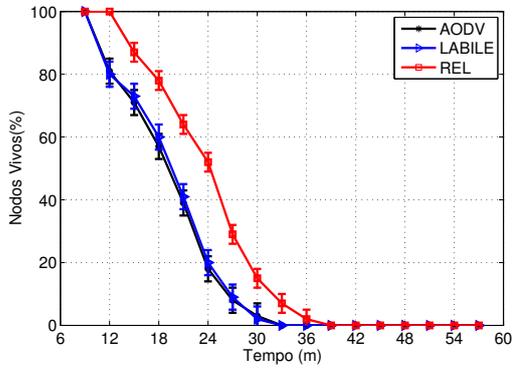


(e) Cenário com 100 Nodos

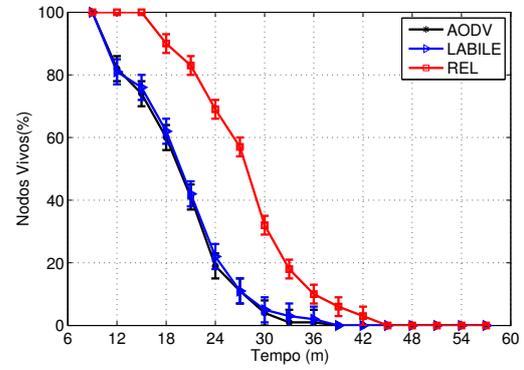


(f) Cenário com 200 Nodos

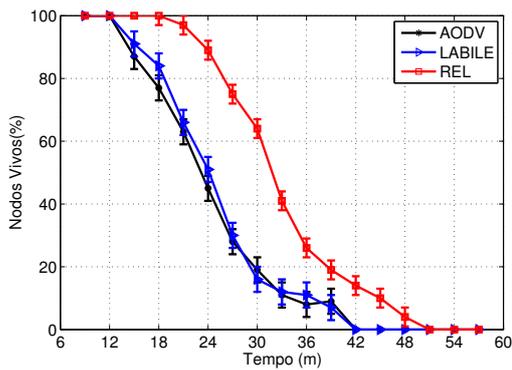
Figura 32: Resultado de pacotes entregues para os cenários simulados



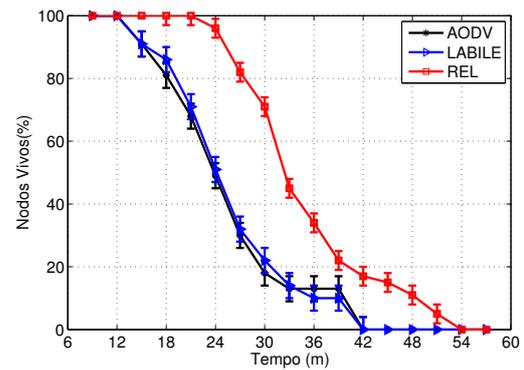
(a) Cenário com 20 Nodos



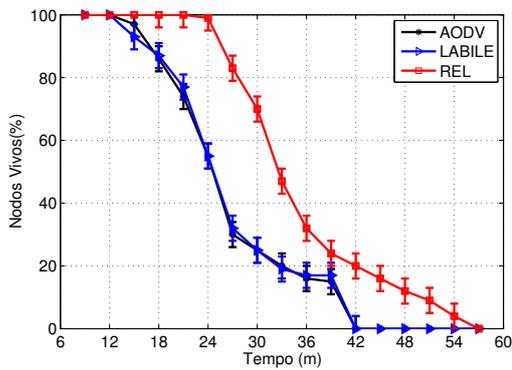
(b) Cenário com 40 Nodos



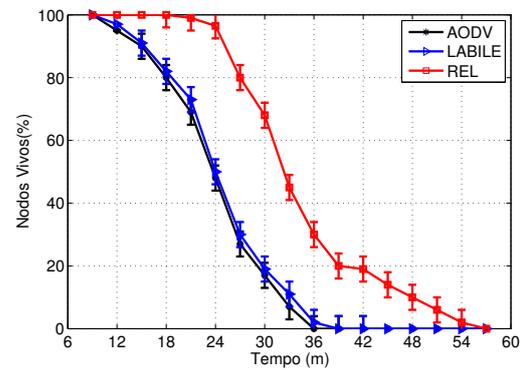
(c) Cenário com 60 Nodos



(d) Cenário com 80 Nodos



(e) Cenário com 100 Nodos



(f) Cenário com 200 Nodos

Figura 33: Tempo de vida da rede obtidos através de simulação

CAPÍTULO 6

Conclusões

O desenvolvimento de um protocolo de roteamento em redes centradas em dados, como as RSSF, necessita ter seus objetivos e requisitos bem definidos a fim de garantir o sucesso do projeto de redes dessa categoria. Além disso, a ausência de padronização das camadas superiores ao padrão IEEE 802.15.4 garante liberdade para pesquisadores criarem inúmeras propostas focadas em uma gama de objetivos, contudo, a compatibilidade entre esses projetos não permite uma conclusão adequada.

A proposta do protocolo REL compreende os principais objetivos e requisitos de RSSF, aliando o balanceamento de carga e o roteamento de múltiplas rotas. O protocolo REL desempenha um algoritmo de eficiência energética e análise das qualidade de enlaces, capaz de estender o tempo de vida e otimizar a comunicação em cenários de RSSF segundo o padrão IEEE 802.15.4. Os melhores resultados de desempenho são obtidos a partir de cenários com maior número de nodos, um importante resultado para essa categoria de redes, que são ferramentas fundamentais da computação ubíqua, do paradigma da Internet das Coisas (*Internet of Things*) e em aplicações de cidades inteligentes (*smart-cities*). As avaliações apontam o roteamento plano como uma adequada proposta de roteamento similar às redes sem fio tradicionais, e devido à isso, capaz de aproximar a comunicação entre essas redes distintas.

O estudo prévio do ambiente e suas características proporciona conhecimento valioso para a parametrização de protocolos de comunicação em redes voltadas à aplicação. Dessa forma, aspectos como: limiares, temporizadores e funções de custo podem ser refinadas a fim de oferecer melhor desempenho para determinadas situações sem alteração dos princípios fundamentais da proposta.

6.1 Perspectivas de Trabalhos Futuros

Os trabalhos futuros da pesquisa realizada compreendem a alteração dos limiares em tempo de execução. Dessa forma, o tempo gasto com o estudo prévio poderia ser minimizado aumentando a eficiência da implantação desse tipo de rede, além disso, o algoritmo de seleção poderia ser aperfeiçoado através da utilização de técnicas de inteligência computacional capazes de lidar com incertezas, variações do ambiente e objetivo da rede.

O protocolo REL também deve ser avaliado em cenários reais de grande escala através de *testbeds* públicos como: *MoteLab* e *Twist*.

6.1.1 Publicações e Disseminação de informação

Os resultados foram submetidos e aceitos em conferências e periódicos científicos internacionais como apresentados a seguir:

- Machado, K., Rosário, D., Cerqueira, E., Loureiro, A. A., Neto, A., de Souza, J. N. (2013). A Routing Protocol Based on Energy and Link Quality for Internet of Things Applications. *Sensors*, 13(2), 1942-1964.
- Machado, K., Rosário, D. D., Nakamura, E., Abelém, A., Cerqueira, E. (2011, October). Design of a routing protocol using remaining energy and link quality indicator (REL). In *Proceedings of the 6th Latin America Networking Conference* (pp. 33-39). ACM.

Referências

- [1] SEVERINO, R. da S. On the use of ieee 802.15. 4/zigbee for time-sensitive wireless sensor network applications. *Master's Dissertation*, v. 115, p. 116, 2008.
- [2] ELECTRICAL, I. of; ENGINEERS, E. Standard ieee 802.15.4. *IEEE 802.15 WPAN Task Group 4 (TG4)*, 2006.
- [3] XBEE, O. Rf modules, product manual v1. xax-802.15. 4 protocol maxstream. *Inc,(2006.10. 13)*, *www.maxstream.net*, 2010.
- [4] MICROSYSTEMS, S. Sunspot java developers guide - software development kit yellow version. v. 6, 2010.
- [5] AKYILDIZ, I. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002.
- [6] BOUKERCHE, A. *Algorithms and protocols for wireless sensor networks*. [S.l.]: Wiley-IEEE press, 2009.
- [7] VILLALBA, L. G. et al. Routing protocols in wireless sensor networks. *Sensors, Molecular Diversity Preservation International*, v. 9, n. 11, p. 8399–8421, 2009.
- [8] TAN, L.; WANG, N. Future internet: The internet of things. In: IEEE. *3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE 2010)*. [S.l.]. v. 5, p. V5–376. ISSN 2154-7491.
- [9] ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. *Computer Networks*, Elsevier, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- [10] KO, J. et al. Connecting low-power and lossy networks to the internet. *Communications Magazine, IEEE, IEEE*, v. 49, n. 4, p. 96–101, 2011.
- [11] BOUKERCHE, A.; NIKOLETSEAS, S. Energy-efficient algorithms in wireless sensor networks. *Algorithms and protocols for wireless sensor networks*, Wiley Online Library, p. 437–478, 2009.

- [12] AL-KARAKI, J.; KAMAL, A. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *Wireless Communications, IEEE*, IEEE, v. 11, n. 6, p. 6–28, 2004.
- [13] HO, Q.; LE-NGOC, T. A wireless sensor network testbed. In: IEEE. *Communication Networks and Services Research Conference (CNSR), 2010 Eighth Annual*. [S.l.], 2010. p. 304–309.
- [14] YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, 2008.
- [15] CAMPOS, B. da S. et al. Design and construction of wireless sensor network gateway with ipv4/ipv6 support. In: *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5. ISSN 1550-3607.
- [16] CAMPOS, B. da S. et al. Design and construction of a wireless sensor and actuator network gateway based on 6lowpan. In: *EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–4.
- [17] WERNER-ALLEN, G. et al. Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network. In: IEEE. *Wireless Sensor Networks, 2005. Proceedings of the Second European Workshop on*. [S.l.], 2005. p. 108–120.
- [18] WERNER-ALLEN, G. et al. Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *Internet Computing, IEEE*, IEEE, v. 10, n. 2, p. 18–25, 2006.
- [19] SIMON, G. et al. Sensor network-based countersniper system. In: ACM. *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*. [S.l.], 2004. p. 1–12.
- [20] KRISHNAMURTHY, L. et al. Design and deployment of industrial sensor networks: experiences from a semiconductor plant and the north sea. In: ACM. *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*. [S.l.], 2005. p. 64–75.
- [21] MILENKOVIC, A.; OTTO, C.; JOVANOVIĆ, E. Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation. *Computer communications*, Elsevier, v. 29, n. 13-14, p. 2521–2533, 2006.
- [22] SALATHÉ, M. et al. A high-resolution human contact network for infectious disease transmission. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences, v. 107, n. 51, p. 22020, 2010.
- [23] CERIOTTI, M. et al. Monitoring heritage buildings with wireless sensor networks: The torre aquila deployment. In: IEEE COMPUTER SOCIETY. *Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. [S.l.], 2009. p. 277–288.
- [24] MAGAZINE, S. Smart buildings, smart cities and governing innovation in the new millennium. In: *2010 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 8–14.
- [25] HONG, S. et al. Snail: an ip-based wireless sensor network approach to the internet of things. *Wireless Communications, IEEE*, IEEE, v. 17, n. 6, p. 34–42, 2010.

- [26] MOTTOLA, L.; PICCO, G. Programming wireless sensor networks: Fundamental concepts and state of the art. *ACM Computing Surveys*, Citeseer, 2010.
- [27] HEINZELMAN, W.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: IEEE. *System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on*. [S.l.], 2000. p. 10–pp.
- [28] VASSEUR, J.; CULLER, D. Routing over low power and lossy networks (roll) - ietf working group. Internet Engineering Task Force, 2009.
- [29] GUTIERREZ, J.; CALLAWAY, E.; BARRETT, R. *Low-rate wireless personal area networks: enabling wireless sensors with IEEE 802.15. 4*. [S.l.]: Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2004.
- [30] CARLES, G.; ANTONI, B.; JOSEP, P. Impact of lqi-based routing metrics on the performance of a one-to-one routing protocol for ieee 802.15. 4 multihop networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2010, 2010.
- [31] GOWRISHANKAR, S.; SARKAR, S.; BASAVARAJU, T. Performance analysis of aodv, aodvu, aomdv and raodv over ieee 802.15. 4 in wireless sensor networks. In: IEEE. *Computer Science and Information Technology, 2009. ICCSIT 2009. 2nd IEEE International Conference on*. [S.l.], 2009. p. 59–63.
- [32] LU, G.; KRISHNAMACHARI, B.; RAGHAVENDRA, C. Performance evaluation of the ieee 802.15. 4 mac for low-rate low-power wireless networks. In: IEEE. *Performance, Computing, and Communications, 2004 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2004. p. 701–706.
- [33] MACHADO, K. et al. Design of a routing protocol using remaining energy and link quality indicator (rel). In: ACM. *Proceedings of the 6th Latin America Networking Conference*. [S.l.], 2011. p. 33–39.
- [34] BUTT, M. et al. Labile: link quality-based lexical routing metric for reactive routing protocols in ieee 802.15. 4 networks. In: IEEE. *Future Information Technology (FutureTech), 2010 5th International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–6.
- [35] AKYILDIZ, I.; MELODIA, T.; CHOWDHURY, K. Wireless multimedia sensor networks: Applications and testbeds. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 96, n. 10, p. 1588–1605, 2008.
- [36] CALLAWAY, E. et al. Home networking with ieee 802.15. 4: a developing standard for low-rate wireless personal area networks. *Communications Magazine, IEEE*, IEEE, v. 40, n. 8, p. 70–77, 2002.
- [37] CHIPCOM. 2.4 ghz ieee 802.15.4 / zigbee-ready rf transceiver. 2010.
- [38] ALLIANCE, Z. Zigbee specification. *ZigBee document 053474r06, version*, v. 1, p. 378, 2006.
- [39] ALLIANCE, W. Wi-fi alliance. *available at: www.wi-fi.org*, 2009.

- [40] LICENSE, G. Free software foundation. *License used by the Free Software Foundation for the GNU Project*. See <http://www.fsf.org/copyleft/gpl.html> (<http://www.fsf.org/copyleft/gpl.html>), 1991.
- [41] LENNVALL, T.; SVENSSON, S.; HEKLAND, F. A comparison of wirelesshart and zigbee for industrial applications. In: IEEE. *Factory Communication Systems, 2008. WFCS 2008. IEEE International Workshop on*. [S.l.], 2008. p. 85–88.
- [42] FOUNDATION, H. C. Why wirelesshart? the right standard at the right time. *WirelessHART White Paper*, 2007.
- [43] KUSHALNAGAR INTEL CORP, G. M. M. C. C. S. D. A. N. Rfc 4919 - ipv6 over low-power wireless personal area networks (6lowpans): Overview, assumptions, problem statement, and goals. *Internet Engineering Task Force*, 2007.
- [44] MONTENEGRO, G. et al. Rfc 4944 - transmission of ipv6 packets over ieee 802.15.4 networks. *Internet proposed standard RFC*, v. 4944, 2007.
- [45] HUI, J.; THUBERT, P. Rfc 6282 - compression format for ipv6 datagrams over ieee 802.15.4-based networks. *Internet proposed standard RFC*, 2011.
- [46] TRAYNOR, P. et al. From mobile phones to responsible devices. *Security and Communication Networks*, Wiley Online Library, v. 4, n. 6, p. 719–726, 2011.
- [47] HE, X.; LIU, K. Data collection and transmission system with a vibrating stress meter based on gprs. *Advances in Automation and Robotics, Vol. 1*, Springer, p. 273–281, 2012.
- [48] CORPORATION, M. Mote iris datasheet. 2011.
- [49] CORPORATION, M. Mote telosb datasheet. 2011.
- [50] CORPORATION, M. Mote micaz datasheet. 2011.
- [51] BERKELEY INTEL RESEARCH, C. T. University of C. Tinyos operating system for wireless sensors network. <http://www.tinyos.net/>, 2011.
- [52] CALIFORNIA, R. of the University of. Bsd license. *California University Berkeley*, 1991.
- [53] UNIVERSITY, C. M. Nano-rk: A wireless sensor networking real-time operating system. <http://www.nanork.org/>, 2011.
- [54] SCIENCE, S. I. of C. Contiki operating system for wireless sensors network. <http://www.contiki-os.org/>, 2011.
- [55] SIMON, D. et al. Java™ on the bare metal of wireless sensor devices: the squawk java virtual machine. In: ACM. *Proceedings of the 2nd international conference on Virtual execution environments*. [S.l.], 2006. p. 78–88.
- [56] PERKINS, C.; BELDING-ROYER, E.; DAS, S. Ad hoc on demand distance vector (aodv) routing (rfc 3561). *IETF MANET Working Group*, 2003.

- [57] BERTSEKAS, D.; GALLAGER, R. Distributed asynchronous bellman-ford algorithm. *Data Networks*, p. 4, 1987.
- [58] TONG, F. et al. A node-grade based aodv routing protocol for wireless sensor network. In: IEEE. *Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing (NSWCTC), 2010 Second International Conference on*. [S.l.], 2010. v. 2, p. 180–183.
- [59] CHUNG, Y.-J. An energy-efficient unicast routing protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Computer Science and Emerging Technologies, ExcelingTech*, v. 2, p. 60, 2011.
- [60] AUER, G. et al. How much energy is needed to run a wireless network? *Wireless Communications, IEEE*, IEEE, v. 18, n. 5, p. 40–49, 2011.
- [61] KO, J. et al. Contikirpl and tinyrpl: Happy together. In: *Proceedings of the workshop on Extending the Internet to Low power and Lossy Networks (IP+ SN 2011), Chicago, IL, USA*. [S.l.: s.n.], 2011.
- [62] TANG, L. et al. Channel characterization and link quality assessment of ieee 802.15.4-compliant radio for factory environments. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 3, n. 2, p. 99–110, 2007.
- [63] JAMAA, M. B. An experimental study for the performance evaluation and optimization of link quality estimators in wireless sensor networks. *Master's Dissertation*, 2010.
- [64] VARGA, A. Omnet++. *Modeling and Tools for Network Simulation*, Springer, p. 35–59, 2010.
- [65] TSELISHCHEV, Y.; BOULIS, A.; LIBMAN, L. Experiences and lessons from implementing a wireless sensor network mac protocol in the castalia simulator. In: IEEE. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE*. [S.l.], 2010. p. 1–6.
- [66] XIAN, X.; SHI, W.; HUANG, H. Comparison of omnet++ and other simulator for wsn simulation. In: IEEE. *Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on*. [S.l.], 2008. p. 1439–1443.