

MAURICIO HENNING

**PROTOCOLO DE ROTEAMENTO
PARA REDES DE SENSOES SEM
FIO BASEADO EM POLÍMICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Informática.

Curitiba
2013

MAURICIO HENNING

**PROTOCOLO DE
ROTEAMENTO PARA REDES
DE SENSORES SEM FIO
BASEADO EM POLÍTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Informática.

Área de Concentração: Ciência da Computação

Orientador: Prof. Dr. Mauro Sérgio Pereira Fonseca

Curitiba
2013

Henning, Maurício
PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PARA REDES DE SENSORES SEM
FIO BASEADO EM POLÍTICAS. Curitiba, 2013.

Dissertação - Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de
Pós-Graduação em Informática.

1. RSSF 2. Protocolo de Roteamento de RSSF 3. Gerenciamento de Redes
baseado em políticas I. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Cen-
tro de Ciências Exatas e Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em In-
formática.

Em primeiro lugar agradeço a DEUS pelo dom da vida, a minha família (Thaís, Maurício Jr., Lucianna e Juju) pelo amor, apoio e compreensão na ausência. A Ude pelo apoio e amor dados a este neto. E meu pai Marcos (*in memoriam*) pelo amor, carinho e exemplo que sempre levarei em minha vida e a minha mãe pela dedicação e amor que nunca faltou.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador prof^o Dr. Mauro Sérgio Pereira Fonseca pela dedicação, apoio e motivação durante todo este tempo em que passei no PPGiA.

À minha esposa Thaís pelas leituras exaustivas dos trabalhos e pelo carinho que nunca me faltou.

Aos meus filhos pela compreensão na ausência do pai e também pelo apoio me dado.

À dona Juju pela cobrança para que me dedicasse aos estudos e pela sua insistência em estar sempre me motivando.

À vó Ude pelo apoio no início de minha caminhada e pelo carinho recebido.

Ao Centro Universitário - Católica de Santa Catarina pelo apoio recebido.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Informática Aplicada da PUCPR, principalmente aqueles que convivi.

Também ao prof^o Dr. Richard Pazzi pela colaboração nas simulações realizadas com seu trabalho, meu muito obrigado.

Sumário

Agradecimentos	ii
Sumário	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Resumo	ix
Abstract	x
Capítulo 1	
Introdução	1
1.1 Desafio	2
1.2 Motivação	2
1.3 Proposta	3
1.4 Organização do Trabalho	3
Capítulo 2	
Fundamentação Teórica	5
2.1 Redes de Sensores Sem Fio	5
2.1.1 Arquitetura de uma Rede de Sensores Sem Fio	6
2.1.2 Pilha de Protocolos de RSSF	8
2.1.3 Métodos de Economia de Energia em RSSF	10
2.2 Protocolos de Roteamento em RSSF	11
2.2.1 Protocolos de Roteamento Centrados em Dados	12
2.2.1.1 Flooding e Gossiping	12
2.2.1.2 SPIN	13
2.2.1.3 Directed Diffusion	14
2.2.1.4 Rumor routing	15
2.2.1.5 Roteamento com reconhecimento de Energia	16

2.2.1.6	Roteamento baseado em Gradiente	17
2.2.1.7	CADR	18
2.2.1.8	COUGAR	18
2.2.1.9	ACQUIRE	19
2.2.1.10	Protocolo PEQ	20
2.2.2	Protocolos de Roteamento Hierárquicos	21
2.2.2.1	LEACH	21
2.2.2.2	PEGASIS e PEGASIS-Hierárquico	22
2.2.2.3	TEEN e APTEEN	24
2.2.3	Protocolos baseados em localização	25
2.2.3.1	MECN	26
2.2.3.2	GAF	27
2.2.3.3	GEAR	28
2.2.4	Protocolos de Roteamento Proativos	30
2.2.4.1	DSDV	30
2.2.4.2	CGSR	30
2.2.5	Protocolos de Roteamento Reativos	31
2.2.5.1	AODV	32
2.2.5.2	DSR	33
2.3	Gerenciamento de Redes de Sensores sem Fio baseado em Políticas	34
2.4	Considerações Finais	34

Capítulo 3

Protocolo Baseado em Políticas (PBP) para RSSF utilizado para monitoramento de eventos sazonais

3.1	Requisitos do Protocolo PBP	38
3.2	Arquitetura do PBP	38
3.3	Funcionamento da Arquitetura	40
3.4	Políticas de Gerenciamento	47
3.5	Mecanismos de Tolerância a Falhas	50
3.6	Considerações Finais	52

Capítulo 4

Experimentos e Resultados

4.1	Descrição dos cenários das simulações e métricas	54
4.1.1	Cenário I	56

4.1.2	Cenário II	57
4.2	Resultados obtidos	57
4.2.1	Métrica de Energia Consumida	58
4.2.2	Métrica de Atraso fim-a-fim	62
4.2.3	Métrica de Taxa de entrega dos pacotes	62
4.2.4	Métrica de tempo de vida da rede	64
4.2.5	Conclusão	65
4.3	Aplicação prática do PBP	66
4.3.1	Sensores Pluviométricos e de Velocidade do Vento	66
4.3.2	Sensores de Umidade	67
4.3.3	Sensor de Nível de Rio	68
4.3.4	Placa de Leitura dos Sensores	69
4.3.5	Rádios Transmissores/Receptores	70
4.3.6	Coletores	70
4.4	Resultados Preliminares	71
4.5	Considerações Finais	74

Capítulo 5

Conclusão		75
5.1	Trabalhos Futuros	76
Referências Bibliográficas		77

Lista de Figuras

2.1	Arquitetura de Nós Sensores e Componentes de um nó Sensor. Adaptado de Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002).	7
2.2	Pilha de Protocolo de Redes de Sensores. Adaptado de Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002).	9
2.3	Operações de Redução de Energia em RSSF (CORREIA et al., 2005)	10
2.4	Inconvenientes de Flooding e Gossiping. Retirada de Heinzelman et al. (HEINZELMAN; KULIK; BALAKRISHNAN, 1999).	13
2.5	Protocolo SPIN extraído de Akkaya e Younis (AKKAYA; YOUNIS, 2005)	14
2.6	Dados do Cache DD adaptado de Intanagonwiwat et al. (INTANAGONWIWAT et al., 2003)	15
2.7	Protocolo <i>Directed Diffusion</i> e suas fases adaptado de Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002)	15
2.8	Plano de Consulta de um nó sensor líder adaptado de Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002)	19
2.9	Inicialização da rede em PEQ (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004)	21
2.10	Cadeias em PEGASIS adaptada de Lindsey e Raghavendra (LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002)	22
2.11	Coleta de dados em uma cadeia com base regime binário adaptado de Lindsey e Raghavendra (LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002)	23
2.12	Arquitetura TEEN e APTEEN adaptado de Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002)	24
2.13	Região de transmissão-retransmissão do par nó(i,r) em MECN, adaptado de Xu et al.(XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001)	26
2.14	Exemplos de grid virtual em GAF (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001)	27
2.15	Estados de transição em GAF (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001)	28
2.16	Encaminhamento Geográfico em GEAR (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001)	29

2.17	Exemplo de uma Topologia de RSSF utilizada pelo protocolo DSDV	31
2.18	Criação de rota no protocolo AODV (PERKINS; ROYER, 1999)	32
2.19	Criação de rota no protocolo DSR (JOHNSON et al., 2003)	33
2.20	Implementação da Arquitetura de Gerenciamento de Políticas	34
3.1	Componentes do Protocolo proposto PBP	39
3.2	Diagrama de Classes do PBP	41
3.3	Diagrama de Sequência do PBP	44
3.4	Eleição de Clusters-Heads	45
3.5	Diagrama de troca de mensagens do protocolo PBP	46
3.6	Modelo de Referência do PFDL (WESTERINEN et al., 2001)	47
3.7	Diagrama de Estado de Máquina Finito da Unidade de Comunicação	49
3.8	Múltiplos caminhos de rota	53
4.1	Estudo de correlação Chuva x Deslizamento (Defesa Civil, 2012)	55
4.2	Comparação da Métrica de Energia Consumida - Cenário I com mudanças de políticas durante a simulação	58
4.3	Intervalos de Confiança	60
4.4	Energia Consumida com protocolo PBP - Cenário II atuando estado crítico	61
4.5	Energia Consumida com protocolo PBP - Cenário II atuando estado normal	62
4.6	Média de atraso fim-a-fim	63
4.8	Número de Pacotes eliminados	63
4.7	Taxa Média de Entrega de pacotes	64
4.9	Análise do tempo de vida da rede de sensores	65
4.10	Instalação dos sensores	67
4.11	Estação Metereológica Libelium	67
4.12	Configuração do Sensor de Umidade	68
4.13	Metodologia de medição de nível de rio	69
4.14	Placa de leitura de dados dos sensores	69
4.15	Rádios Transmissores	70
4.16	Coletores	71
4.17	Coletores	72
4.18	Coletores	72
4.19	Coletores	73
4.20	Coletores	73

Lista de Tabelas

2.1	Consumo de Energia em um Sensor tipo Mica Motes2 (CROSSBOW, 2004)	8
2.2	Exemplo de Tabela de Roteamento para o nó sensor MH ₄ (PERKINS; BHAGWAT, 1994)	31
2.3	Classificação dos protocolos de roteamento para redes de sensores sem fio. Adaptado de (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004)	35
3.1	Informações do Nó sensor	40
3.2	Informações do Pacote PBP	42
3.3	Tabela de Roteamento	42
3.4	Tabela de Políticas	42
3.5	Exemplos de Regras	48
4.1	Parâmetros de Simulação (BOUKERCHE; PAZZI; ARAUJO, 2004)	56
4.2	Dados do processo do Teste de Variância	59
4.3	Intervalos de Confiança para o Desvio padrão	59
4.4	Valores de Consumo dos Sensores	71

Resumo

Catástrofes naturais trazem sempre muito prejuízo para a sociedade e para tentarmos reduzir estes prejuízos pode-se utilizar a monitoração dos eventos causadores através de sensores. Dentro deste contexto, a coleta das informações dos sensores se torna extremamente importante. Para realizar essa tarefa usa-se as Redes de sensores sem fio (RSSF) que atuam em ambientes normalmente não controlados, para isso tais redes devem ser tolerantes a falhas e manter-se em operação ininterruptamente. Os eventos monitorados pelos sensores acabam gerando um fluxo de informações transmitidas e diversos protocolos têm sido pesquisados e apresentados pela comunidade acadêmica para melhorar a entrega destas informações. Alguns dos principais problemas a serem resolvidos são 1) a economia de energia, 2) tolerância a falhas. O consumo de energia é muito preocupante, devido aos sensores serem equipamentos de pequeno tamanho e muitas vezes não possuírem alimentação de energia constante, devido à falta de infraestrutura do ambiente. Esse trabalho apresenta o PBP (Protocolo Baseado em Políticas) para redes de sensores sem fio. Seus principais objetivos são aumentar o tempo de vida da rede e melhorar a taxa de entrega dos dados. Isso é alcançado através da aplicação de políticas para o gerenciamento dos intervalos de transmissão dos eventos observados e no protocolo de roteamento que pode permitir múltiplos caminhos até o coletor. O protocolo procurou utilizar um padrão que permita sua utilização nas plataformas mais comuns em RSSF, independente do tipo de tecnologia de comunicação utilizada. O PBP foi comparado com diversos protocolos de roteamento propostos na literatura. Os resultados obtidos demonstram que o PBP apresenta o melhor desempenho considerando o tempo de vida dos nós sensores entre os protocolos avaliados.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio. Protocolo de Roteamento. Gerenciamento de Políticas para Redes de Sensores Sem Fio. Sensoriamento

Abstract

Natural disasters always bring great harm to society and to try to reduce These losses can be used to monitor the events that cause through sensors. Within this context, the gathering of information from the sensors becomes extremely important. To accomplish this task we use wireless sensor networks (WSN) operating in environments usually not controlled, so that such networks must be fault tolerant and remain in uninterrupted operation. The events monitored by the sensors end up generating a stream of information transmitted and several solids protocols have researched and presented by the academic community to improve the delivery of these information. Some of the main problems to be solved are 1) energy saving, 2) fault tolerance. The power consumption is very worrying, because the sensors are small equipment size and often do not have constant power supply due to lack of infrastructure of the environment. This work presents the PBP (Policy-Based Protocol) for wireless sensor networks. Its main objectives are to increase the lifetime of the network and improve the rate of data delivery. This is achieved through the implementation of policies for managing the transmission intervals of observed events and the routing protocol that can allow multiple paths to the collector. The protocol sought to use a standard that allows its use on most common platforms in WSN, regardless of the type of communication technology used. The PBP was compared with several routing protocols proposed in the literature. The results demonstrate that the PBP has the best performance considering the lifetime the sensor nodes between the protocols evaluated.

Keywords: Wireless Sensor Network. Routing Protocol. Policy Management for Wireless Sensor Networks. Sensing.

Capítulo 1

Introdução

O uso de redes de sensores para monitoramento ambiental tem sido adotados por muitos autores como (KRZHIZHANOVSKAYA et al., 2011) e esses estudos têm apresentado pesquisas e soluções de utilização no cotidiano das cidades, como o controle de vazão de rios, monitoramento de tráfego de veículos, emissão de poluentes e até na qualidade de água. Situações críticas exigem uma rápida resposta dos sensores, uma vez que as informações são de suma importância para a tomada de decisão das ações a serem executadas.

Diversas regiões de nosso planeta têm sofrido eventos geoclimáticos que potencializadas causam grandes danos a população e o meio ambiente. No Brasil presenciamos alguns desastres nos últimos tempos tais como os grandes deslizamentos de terra, que poderiam ter sido evitados se houvessem monitoramento destas áreas de riscos. Redes de sensores sem fio podem ajudar a amenizar os efeitos de tais danos proporcionando um sistema de monitoramento e alerta para estes fenômenos.

O uso de redes de sensores sem fio gera informações necessárias para a tomada de decisão por órgãos responsáveis a fim de evitar fatalidades. Por esse motivo Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) têm sido o tema de diversas pesquisas nos últimos anos no campo da computação, onde diversos protocolos de roteamento e entrega de dados estão sendo propostos para resolver problemas como atraso, roteamento, segurança e tempo de vida dos mesmos. Entretanto usualmente cada protocolo proposto, normalmente resolve uma característica isolada ou um conjunto predefinido de características, fazendo assim este protocolo ideal para alguns casos predeterminados.

Diversas propostas como o PEQ (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004) sugerem um protocolo para monitoramento de condições críticas, que utiliza um algoritmo tolerante a falhas e de baixa latência. Outros protocolos utilizados por redes de sensores sem fio, são usados para roteamento hierárquico como o LEACH (ZHANG et al., 2007). Verifica-se que

há muitas soluções, mas que não há uma solução definitiva para o problema de tempo de vida da rede (eficiência energética) e taxa de entrega de dados em redes de sensores sem fio.

O protocolo PBP (Protocolo Baseado em Políticas) para redes de sensores sem fios utiliza o gerenciamento por políticas para adaptar o intervalo de transmissão dos nós e assim controlar a vida útil da rede de sensores, atuando conforme a necessidade do evento observado. Seus principais objetivos são: aumentar o tempo de vida da rede e melhorar a taxa de entrega dos dados. Os resultados obtidos indicam que o PBP tem um bom desempenho em relação aos demais protocolos utilizados como referência e que o atraso e a taxa de perda de pacotes também apresentam um desempenho promissor.

1.1 Desafio

Diversos protocolos de roteamento e entrega de dados estão sendo propostos para resolver problemas em redes de sensores sem fio como latência, roteamento, segurança e tempo de vida dos mesmos. Mas cada protocolo resolve uma característica isolada, fazendo assim sua função.

Desenvolver um protocolo que atenda as características de economia de energia, garantia de entrega e ainda operar em períodos de sazonalidade conforme a necessidade de momento, com o uso de políticas para o gerenciamento de todos esses requisitos foi o grande desafio do projeto. Pode-se afirmar que simular estas características também foi desafiador.

1.2 Motivação

Diversos protocolos de roteamento de sido pesquisados e apresentados à comunidade acadêmica, os quais cumprem seus objetivos que muitas vezes são garantir à entrega dos dados, e outras a economia de energia. E soluções específicas para monitoramento ambiental são apresentadas focando o seu estudo nos fenômenos observados e na tecnologia envolvida para resolver o problema de coleta e entrega da informação (KRZHIZHANOVS-KAYA et al., 2011). Segundo Tilak et al. (TILAK; ABU-GHAZALEH; HEINZELMAN, 2002) define uma rede de sensores como um conjunto que tem por objetivo principal capturar informações (fenômeno) e transmiti-la a um observador, que processara a informação. Como estes sensores são equipamentos de pequeno tamanho e uma vida útil curta, o problema atual das pesquisas está em aumentar a eficiência desta rede e prolongar a vida

útil destes sensores. Monitorar eventos que exigem uma rápida resposta para a tomada de decisão também é uma condição importante para um protocolo de redes de sensores.

Atender os requisitos de economia de energia, baixa latência e ainda múltiplos caminhos para garantir a entrega dos dados e trabalhar de forma sazonal observando fenômenos ambientais são a motivação desse trabalho. Um dos fatores importantes que também motivaram esse desenvolvimento, foi a oportunidade de utilizar o trabalho em uma rede de sensores sem fio para monitoramento de eventos climáticos no município Jaraguá do Sul/SC, depois de eventos ocorridos no ano de 2008, ocasionando enormes problemas para a região. Na literatura encontramos diversos protocolos que se propõem a monitorar eventos críticos, mas que não atendem a todos os requisitos propostos simultaneamente.

1.3 Proposta

O objetivo desse trabalho é atender os requisitos de economia de energia e melhorar a taxa de entrega dos dados em redes de monitoramento com comportamento sazonal. Seu resultado foi a especificação e implementação do protocolo PBP (Protocolo Baseado em Políticas), um protocolo de redes de sensores sem fio para monitoramento ambiental sazonal. Esses objetivos são alcançados pelo uso de políticas para o gerenciamento do tempo de transmissão dos eventos observados pelos nós sensores e no protocolo de roteamento que pode permitir múltiplos caminhos até o coletor conforme a política empregada.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estudar o consumo de energia nas diferentes topologias de redes de sensores sem fio;
- Definir uma arquitetura para o protocolo proposta;
- Implementar o protocolo proposto;
- Avaliar o desempenho do protocolo proposto com demais protocolos apresentados pela literatura, através de simulações.

1.4 Organização do Trabalho

O Capítulo 2 descreve o referencial conceitual através da fundamentação teórica, contendo quatro seções, onde são apresentados os conceitos de redes sem fio, sua arquitetura, pilhas dos protocolos que a compõem e os métodos de economia de energia em RSSF.

A seguir são apresentadas suas classificações e os principais protocolos de roteamento destas. O capítulo 2 descreve também o protocolo PEQ (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004) que embasou o desenvolvimento do protocolo PBP e foi comparado nas simulações e ainda a utilização do uso de políticas para gerenciamento de redes de sensores sem fio, um dos principais diferenciais do PBP.

O capítulo 3 apresenta o protocolo PBP desenvolvido para monitoramento de eventos sazonais, com seus requisitos e arquitetura. A seção 3.3 descreve o funcionamento desta arquitetura, e a seção seguinte apresenta as políticas de gerenciamento utilizadas. Já a seção 3.5 descreve os mecanismos de tolerância a falhas.

O capítulo 4 descreve os experimentos e resultados obtidos através de um modelo de simulação com a descrição dos cenários utilizados e a análise do desempenho do PBP, também verificamos neste capítulo o projeto em que o protocolo será utilizado para monitoramento ambiental. Seguido do Capítulo 5 que descreve as conclusões e perspectivas em trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Redes de Sensores Sem Fio

Conforme Malladi e Agrawal (MALLADI; AGRAWAL, 2002) definem rede de sensores sem fio formando por dezenas, centenas ou talvez milhares de nós sensores, com capacidade de processamento e comunicação, para detectar e transmitir informações de um ambiente monitorado. Geralmente uma rede de sensores sem fio é formada por nós sensores espalhada em uma mesma região que transmitem informações a coletores.

Novas pesquisas em microeletrônica têm colaborado pelo desenvolvimento de sensores cada vez menores, que geralmente são equipados com sistemas de comunicação sem fio e processamento de sinais elétricos em sinais digitais. Tais sensores são utilizados em diversas áreas desde a militar, saúde, agricultura, controle de fenômenos ambientais, etc. Por exemplo, sensores podem ser utilizados no campo de batalha para detecção de inimigos, ou descoberta de minas (AKKAYA; YOUNIS, 2005).

Redes de sensores geralmente utilizam sistemas de comunicação sem fio para transmissão de dados, que além de caros, recebem interferência de ruídos e possuem limitação de banda de comunicação. Em comunicação sem fio tem-se diversos tipos de usuários, e eles podem ser estáticos ou estacionários e móveis, os quais acessam informações por esse canal de comunicação. Esse tipo de acesso é adequado em lugares onde a rede com fios não é apropriada. As redes Ad Hoc, também chamadas de MANET's, e Redes de sensores sem fio têm características bem semelhantes, Al-Obaisat e Braun (AL-OBAISAT; BRAUN, 2007) realizaram uma comparação entre os dois tipos de tecnologias de comunicação se fio, onde pode-se citar algumas características:

- O número de nós sensores em RSSF é maior do que em MANET.

- Ao contrário de um nó sensor em MANET, o nó sensor pode não ter um único endereço IP global por causa da grande quantidade de sobrecarga e do número de sensores diversos.
- Nós sensores são muito mais baratos e dispositivos minúsculos, não como nós de rede Ad Hoc (por exemplo, PDA's, laptops, etc), e geralmente instalada em milhares.
- O paradigma de comunicação utilizados em RSSF é radiodifusão, enquanto MANET são baseadas em comunicações ponto-a-ponto.
- A topologia de uma RSSF muda com muita frequência.
- Energia e largura de Banda é a maior preocupação em Redes de Sensores Sem Fio em relação aos sensores, em contra ponto em MANET que não se preocupa com isso.
- Nós sensores são propensos a falhas muito mais do que nós em MANET.

2.1.1 Arquitetura de uma Rede de Sensores Sem Fio

Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002) descrevem a arquitetura de sensores, ilustrada na Figura 2.1, onde nós sensores são distribuídos em um campo, com a finalidade de coletar dados sobre determinada finalidade. Esse nós sensores encaminham as informações coletadas a um coletor, que tem a capacidade de comunicação com usuário final que tem o interesse nos dados coletados. A comunicação entre os nós sensores podem se dar através de multi-saltos, ou através de outra tecnologia definida pelos protocolos de roteamento que é objeto de estudo deste projeto.

Vários fatores influenciam o projeto de redes, e têm gerado muitas pesquisas para resolverem estes problemas, dentre eles podemos citar: o consumo de energia dos nós sensores, tolerância a falhas, transmissão em radiofrequência, restrição de hardware, agregação de dados, dentre outras que a seguir são descritos conforme (AKYILDIZ et al., 2002):

- Consumo de Energia : sendo os sensores pequenos equipamentos eletrônicos, esses apresentam uma baixa taxa de consumo, mas mesmo assim dependendo do ambiente observado a taxa de transferência de dados é alta, fazendo com que o consumo de energia também seja. Em algumas aplicações torna-se impossível repor energia, em outras pode-se utilizar coletores de energia solar para realimentar as baterias. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas nesta área como em Chen et al. (CHEN;

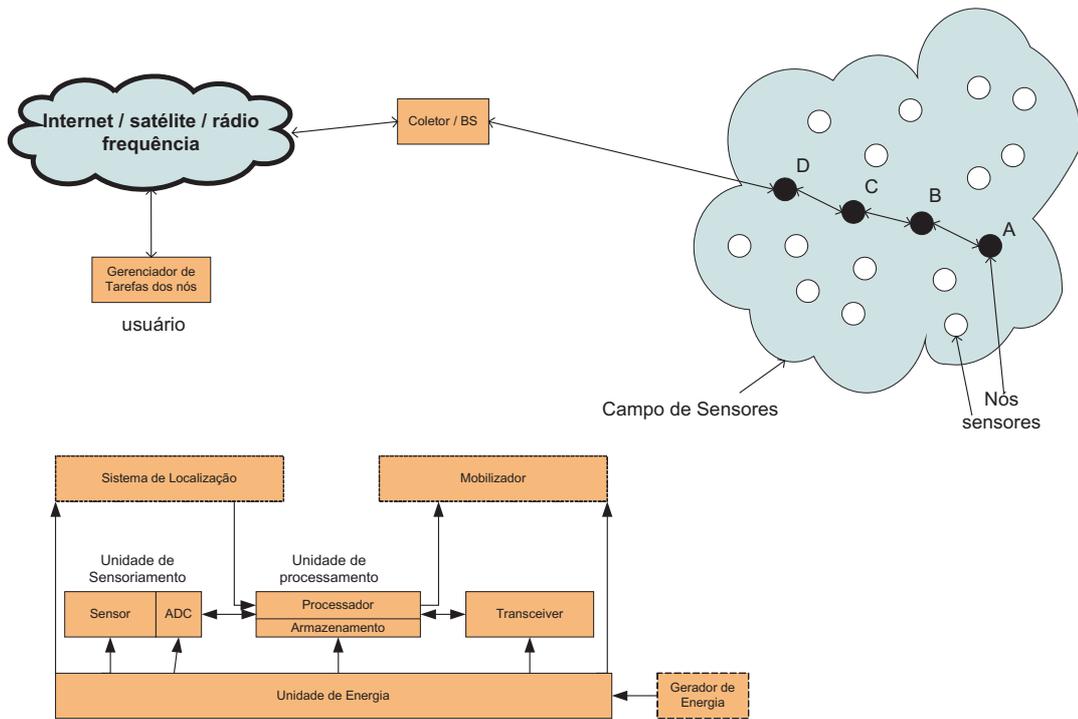


Figura 2.1: Arquitetura de Nós Sensores e Componentes de um nó Sensor. Adaptado de Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002).

YANG; YI, 2010). Na tabela 2.1 extraída de Correia et al. (CORREIA et al., 2005) apud (CROSSBOW, 2004) observa-se o consumo dos componentes de um projeto de nó sensor.

- Tolerância a falhas: ou confiabilidade é a capacidade de um sensor manter suas funcionalidades e características presentes sem que haja interrupção. A falha em um nó sensor pode causar um transtorno a topologia da rede, fazendo aumentar o este consumo de energia.
- Meios de transmissão: em uma rede de sensores, o meio de transmissão utilizado para interligar os nós sensores geralmente é feita por rádio (WOO; CULLER, 2001). Todos os nós sensores devem utilizar o mesmo sistema de transmissão. Alguns trabalhos foram apresentados com tipos de transmissores operando em diversas frequências como Bluetooth (SHIH et al., 2001).
- Restrição de Hardware: o interior do sensor é composto de quatro componentes básicos: unidade de sensoriamento, unidade de processamento, unidade de transmissão (*transceiver*) e unidade de energia (parte inferior da Fig. 2.1). A unidade de sensoriamento é composta por sensores e Conversor Analógico Digital (ADC). Sinais analógicos produzidos pelos sensores são convertidos pelo ADC para sinal di-

Tabela 2.1: Consumo de Energia em um Sensor tipo Mica Motes2 (CROSSBOW, 2004)

Componente	Corrente
Processador	
Operador em carga	8 mA
Repouso	8 μ A
Transceptor (0 dBm)	
Recepção	8 mA
Transmissão	12 mA
Repouso	2 μ A
Memória Flash	
Escrita	15 mA
Leitura	4 mA
Repouso	2 μ A
Sensor	
Ativo	5 mA
Inativo	5 μ A

gital e transferido para a unidade de processamento, que geralmente está associada a unidade de armazenamento. A unidade de transmissão responsável pela emissão dos dados, e a unidade de energia responde pelo fornecimento de energia ao sensor e pode estar ligada a células solares para recarga das baterias. Grande parte das redes de sensores possui técnicas de sensoriamento para roteamento dos dados, essas tarefas requerem o conhecimento da localização com alta precisão, assim é comum que um nó sensor tenha posição/local no sistema. As vezes, um mobilizador é necessário para 'acordar' o nó sensor para realização de tarefas atribuídas (AKYILDIZ et al., 2002).

- Agregação/Fusão de Dados: têm por objetivo reduzir o tamanho de dados, através de processamento de compactação. Como as redes de sensores possuem às vezes grande número de nós, o que facilmente pode congestionar a rede e inundando-o com a informação (CAM et al., 2003). Portanto, uma solução para o congestionamento de dados em redes de sensores é a utilização de computação para agregar ou fundir os dados dentro de RSSF, em seguida, transmitir apenas os dados agregados para o controlador.

2.1.2 Pilha de Protocolos de RSSF

Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002) propuseram uma arquitetura para a pilha de protocolos dos nós sensores e do coletor, ilustrado na Figura 2.2 adaptada dos autores. Esta pilha de protocolos combinam energia e sensibilização de roteamento, integrando

dados com os protocolos de rede, que se comunicam eficazmente como redes sem fio. A estrutura consiste na camada física, enlace de dados, rede, transporte, aplicação, o plano de gerenciamento de energia, plano de gerenciamento da mobilidade, e plano de gerenciamento de tarefas. A camada física trata das necessidades de modulação, transmissão e técnicas de recepção. Como o ambiente é ruidoso e nós sensores podem ser móveis, o protocolo de acesso ao meio (MAC) deve economizar energia e evitar gerar *broadcast* para que haja colisão em nós vizinhos. A camada de rede é responsável por enviar os dados fornecidos pela camada de transporte. A camada de transporte ajuda a manter o fluxo de dados conforme a necessidade da aplicação dos sensores. Os planos de gerenciamento de mobilidade e planos de gerenciamento de tarefas monitoraram, movimentam e distribuem tarefas entre os nós sensores. Esses planos auxiliam os nós sensores na coordenação de tarefas de detecção e na redução de energia da rede (AKYILDIZ et al., 2002).

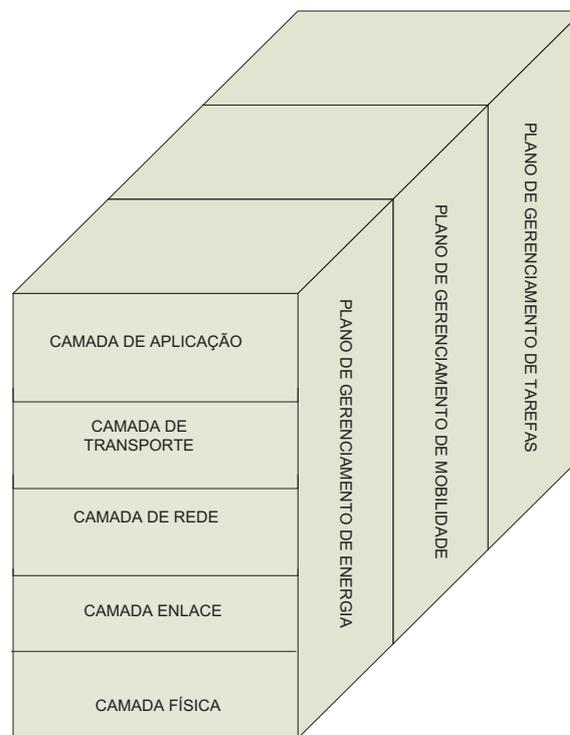


Figura 2.2: Pilha de Protocolo de Redes de Sensores. Adaptado de Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002).

O plano de gerenciamento de energia controla o consumo que um nó sensor utiliza de energia em suas atividades. Esse plano, por exemplo, pode desligar o receptor do nó sensor após receber uma mensagem de um vizinho. O plano de gerenciamento de mobilidade utilizado por sensores dinâmicos para detectar e registrar os movimentos dos nós sensores, os quais podem acompanhar quem são seus vizinhos. O plano de gerenciamento de tarefas balanceia e agenda as tarefas de sensoriamento no campo do nó sensor. Nem

todos os nós sensores no campo são obrigados a executar a tarefa de detecção, ao mesmo tempo. Como resultado, alguns nós sensores executam tarefas a mais do que outros, dependendo do nível energia. Esse plano de gerenciamento é necessário para que os nós sensores possam trabalhar juntos de forma eficiente (AKYILDIZ et al., 2002).

2.1.3 Métodos de Economia de Energia em RSSF

O consumo de energia é um dos fatores importantes para prolongar a vida útil da rede de sensores, para isso os projetos implementam métodos para economia de energia na diminuição de comunicação de quadros enviados, na melhor organização da rede e no sincronismo dos dados.

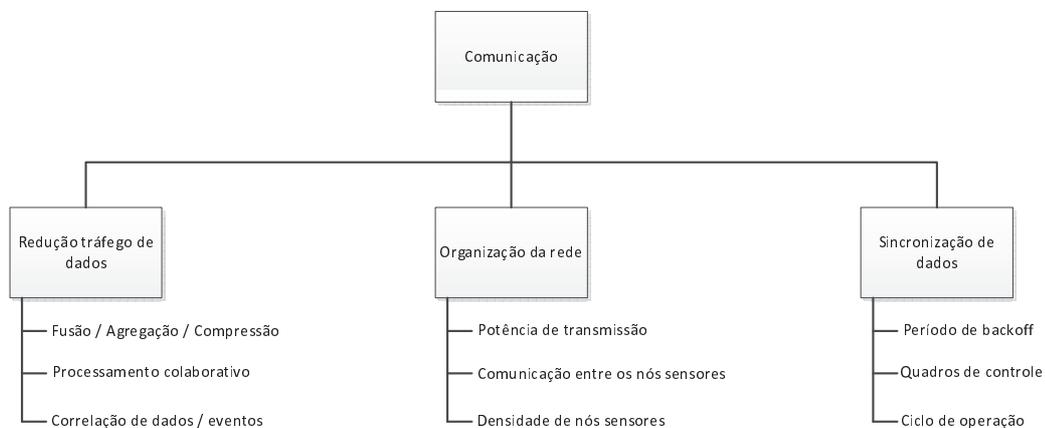


Figura 2.3: Operações de Redução de Energia em RSSF (CORREIA et al., 2005)

Na Figura 2.3 extraída de Correia et al. (CORREIA et al., 2005), classifica os métodos utilizados para redução de energia despendida durante o processo de comunicação dos nós sensores, que são descritos a seguir.

- *Redução do tráfego de dados:* Como citado anteriormente a quantidade de informações transmitidas ao coletor pode ser reduzido por métodos de agregação/fusão, além da compactação de dados, onde na fusão os nós sensores ao receberem informações de outros nós sensores da rede, fundem os mesmos aos seus dados e enviam em um único pacote de dados. Na agregação o nó sensor recebe informação de seu vizinho e executa um processamento desta informação, agregando-a a seus dados e enviando ao coletor, também reduzindo o tráfego da rede. A compressão é o método onde o nó sensor se utiliza de algoritmos de compactação para diminuir os dados a serem transmitidos. No processamento colaborativo os nós sensores se

ajustam para evitar que informações inválidas trafeguem na rede, este ajuste acontece através de calibração dos nós sensores na rede. Em redes onde há vários nós sensores próximos realizando o mesmo monitoramento, pode haver a transmissão da mesma informação observada por vários nós sensores, a correlação dos dados evita este tipo de informação redundante através de supressão e filtragem de dados para se reduzir o tráfego. Em Agnoli et al. (AGNOLI et al., 2008) a técnica de agregação e fusão dos dados de sensores é utilizada como forma de redução de energia consumida pela rede.

- *Organização da rede*: A topologia influencia na economia de energia despendida dos nós sensores, portanto a potência de transmissão dos rádios, está relacionada ao alcance de transmissão dos mesmos, quanto maior a potência, maior o alcance e maior o consumo de energia. O artigo de Chen et al. (CHEN; YANG; YI, 2010) trata sobre a maximização da vida útil da RSSF através da organização da topologia da rede. A comunicação entre os nós sensores pode ser direta quando o nó sensor se comunica diretamente com a estação base ou coletor, também chamada de *single-hop*, ou indireta quando nós sensores comunicam-se entre si para alcançar o coletor, chamado de *multi-hop*. Segundo Heinzelman et al. (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000) quanto maior a densidade do número de nós sensores, maior será a precisão dos dados e obtêm-se melhor tolerância a falhas dos sistemas, já segundo Tilak et al. (TILAK; ABU-GHAZALEH; HEINZELMAN, 2002) esse aumento de densidade contribui para taxas de colisões maiores.
- *Sincronização dos dados*: Métodos utilizados para evitar colisões na rede como os períodos de *backoff*, onde os nós sensores detectam que há transmissões de outros nós sensores e aguardam um tempo para transmitir suas informações. Já os quadros de controle definem tempos para cada nó sensor transmitir e receber suas informações. Nos ciclos de operação os nós sensores alternam sua atividade em períodos de transmissão e estado de dormência, diminuindo assim o consumo de energia. Em Zou e Lu (ZOU; LU, 2012) os autores apresentam um método para sincronização de tempo e as formas para atingir esse sincronismo.

2.2 Protocolos de Roteamento em RSSF

A seleção de rotas e o comportamento destas em relação ao tráfego de dados é uma das questões que apresentam grande número de pesquisas por autores interessados em reduzir o congestionamento, evitar falhas e principalmente diminuir o tráfego de in-

formações de controle para manutenção destas rotas, o que como descrito anteriormente diminui a vida útil da rede, pelo consumo de energia que isso acarreta. Em RSSF's dinâmicas essas questões são ainda mais presentes, pois ora o nó sensor encontra-se em determinada posição e tendo certos nós como vizinhos e em outro determinado momento, sua posição e vizinhos já são outros.

Há diversas maneiras de classificação de protocolos de roteamento em RSSF, em Akkaya e Younis (AKKAYA; YOUNIS, 2005) classificam de acordo com a estrutura de redes em centrado em dados, hierárquicos e geográficos. Vários protocolos de roteamento em RSSF têm sido propostos, a seguir será descritos os principais e suas características.

2.2.1 Protocolos de Roteamento Centrados em Dados

Em redes com muita densidade de sensores, questões de centenas ou milhares, não é possível atribuir identificação a cada sensor. Isso torna algumas aplicações impossíveis de realizar, como por exemplo, selecionar um determinado sensor a ser consultado. Assim nesse tipo de redes cada nó sensor transmite informações diretas para o coletor. E o coletor pode enviar uma solicitação de consulta para uma região determinada e fica aguardando que nós sensores daquela região respondam.

2.2.1.1 Flooding e Gossiping

Flooding e *Gossiping* são dois protocolos utilizados por redes de sensores sem a necessidade de algoritmos de roteamento e manutenção de topologia. Em *Flooding*, os nós sensores enviam seus dados para seus vizinhos que por sua vez encaminham adiante até o processo alcançar o coletor. Já *Gossiping* é uma versão um pouco melhorada de *Flooding*, em que o nó sensor envia o pacote para um vizinho selecionado aleatoriamente, que escolhe outro vizinho aleatório para transmitir o pacote e assim por diante até o coletor (AKKAYA; YOUNIS, 2005). Embora os protocolos sejam simples de implementação, existem vários inconvenientes, na Figura 2.4a retirada de Heinzelman et al. (HEINZELMAN; KULIK; BALAKRISHNAN, 1999), nó A começa inundando seus dados para todos os seus vizinhos e o nó D recebe duas cópias do mesmos dados. Já na Figura 2.4b existem dois sensores que atendem a mesma região geográfica e coletam os mesmos dados e encaminham para o nó C que recebe os mesmos dados de sensores diferentes. *Gossiping* evita o problema de *Flooding* selecionando um nó aleatório para envio, mas causa atrasos na propagação dos dados através dos nós.

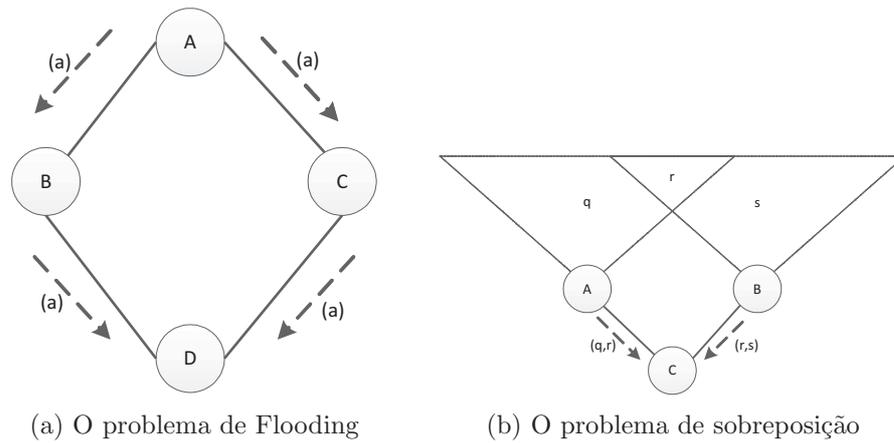


Figura 2.4: Inconvenientes de Flooding e Gossiping. Retirada de Heinzelman et al. (HEINZELMAN; KULIK; BALAKRISHNAN, 1999).

2.2.1.2 SPIN

Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) (AKKAYA; YOUNIS, 2005) têm como objetivo evitar os problemas dos protocolos Flooding e Gossiping citados acima, através de negociação entre os nós sensores. O SPIN envia uma mensagem aos nós vizinhos que possui dados para encaminhar e os nós vizinhos que desejam receber a informação se pronunciam. Para isso o protocolo utiliza meta-dados. Há três tipos de mensagens, que são: ADV, REQ, e DATA.

- ADV: quando um nó sensor possui dados para enviar, ele anuncia por meio de transmissão dessa mensagem que contém meta-dados (ou seja, descritor) para todos os nós da rede.
- REQ: um nó sensor interessado envia essa mensagem quando deseja receber alguns dados.
- DATA: mensagem de dados contém os dados do nó sensor juntamente com o cabeçalho de meta-dados. Os nós sensores enviam mensagem ADV que têm dados e esperaram por mensagens REQ de nós sensores interessados. SPIN possui algumas vantagens, tais como (1) a resolução de problemas associados com protocolos Flooding e Gossiping, e (2) mudanças na topologia da rede são descobertos, e suas desvantagens são: (1) escalabilidade, (2) se o coletor está interessado em vários eventos isso fará que os nós possam esgotar sua energia nas transmissões, e (3) técnica propagação de dados SPIN não pode garantir a entrega de dados se os nós sensores interessados estão longe do nó sensor de origem e/ou entre eles haja nós sensores não interessados nos dados.

Na Figura 2.5 extraído de Akkaya e Younis (AKKAYA; YOUNIS, 2005), o nó sensor A começa por anunciar seus dados para o nó sensor B (a). O nó sensor B responde enviando um pedido para o nó sensor A (b). Depois de receber os dados solicitados (c), o nó sensor B, em seguida, envia anúncios aos seus vizinhos (d), que por sua vez, enviar pedidos de volta para B (e-f).

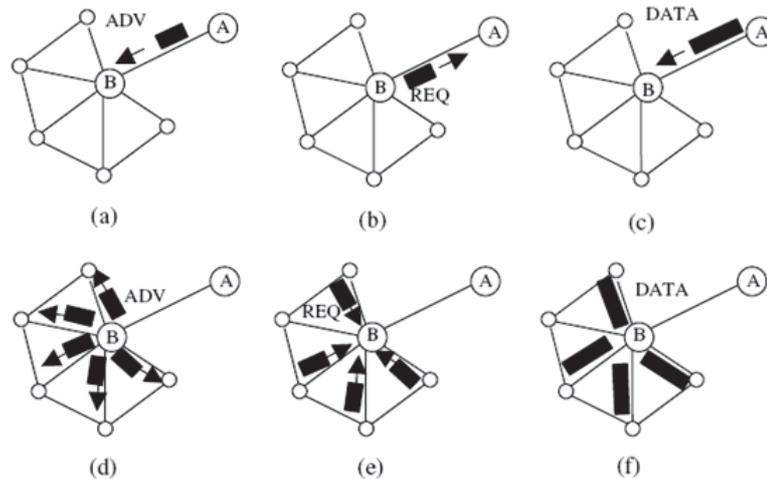


Figura 2.5: Protocolo SPIN extraído de Akkaya e Younis (AKKAYA; YOUNIS, 2005)

2.2.1.3 Directed Diffusion

Um dos importantes protocolos de roteamento centrado em dados o *Directed Diffusion* (DD) apresentado por Intanagonwiwat et al. (INTANAGONWIWAT et al., 2003). DD utiliza a difusão de dados através dos nós sensores, mas cria atributos a serem distribuídos com informações aos nós sensores interessados, com finalidade de evitar operações desnecessárias na camada de rede e assim economizando energia. O protocolo sugere a criação de atributos a serem utilizados em consultas pelos sensores, como por exemplo nome dos objetos, área geográfica, duração e intervalo. Os dados são transmitidos para seus vizinhos e cada interessado pode fazer uso dessas informações para criar um cache para consulta. Os nós sensores da rede têm capacidade de fazer agregação dos dados. Os dados do cache são comparados com valores de dados recebidos. Estes dados contêm campos denominados de gradiente, que é uma resposta à ligação de um vizinho a partir do qual os dados foram recebidos. Estes campos possuem taxa de dados e tempo de expiração, conforme ilustrado na Figura 2.6.

Caminhos alternativos são possíveis em DD, quando uma rota entre a fonte e o coletor falha, uma nova rota deve ser identificada, isso acontece através de pesquisas

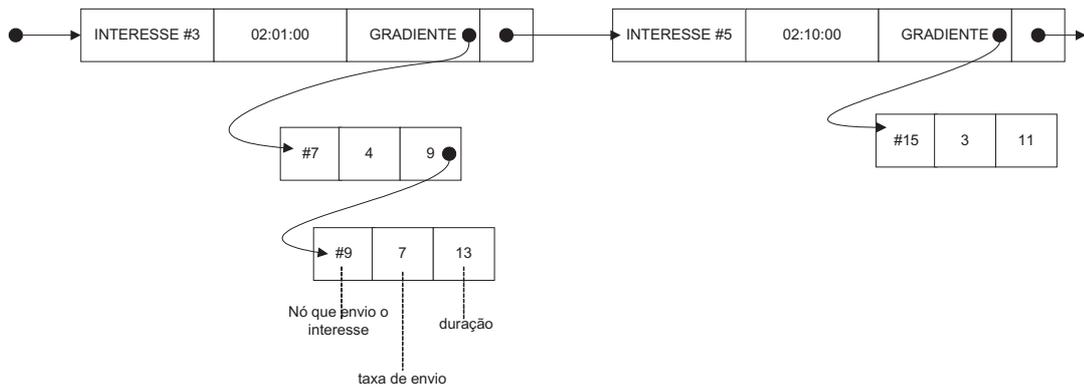


Figura 2.6: Dados do Cache DD adaptado de Intanagonwiwat et al. (INTANAGONWIWAT et al., 2003)

reforçando entre outros caminhos, ilustrado na Figura 2.7.

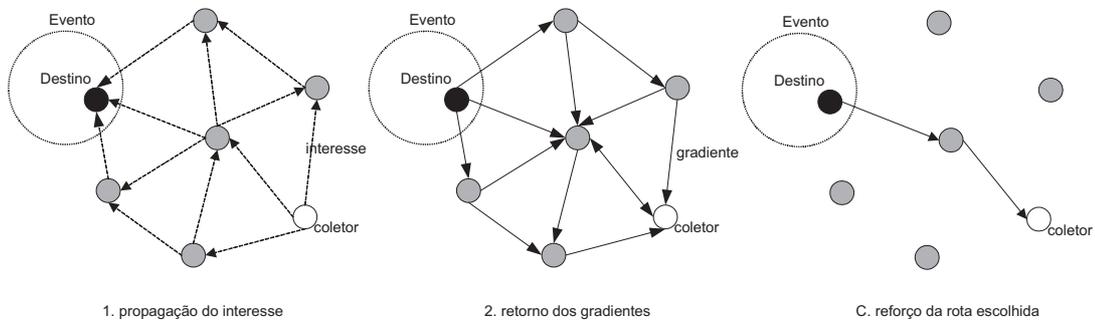


Figura 2.7: Protocolo *Directed Diffusion* e suas fases adaptado de Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002)

A diferença entre *Directed Diffusion* e SPIN está no mecanismo de consulta de dados sobre a demanda. Em DD o coletor consulta os nós sensores, através de inundações para verificar se alguém está disponível. No SPIN sensores anunciam a disponibilidade de dados. DD possui muitas vantagens, uma delas é que é centrado em dados, a comunicação acontece vizinho a vizinho e não há necessidade de endereçamento de nó sensor. O cache é outra vantagem para economia de energia.

2.2.1.4 Rumor routing

Rumor routing é uma variação do protocolo *Directed Diffusion* e sua aplicação é utilizada em redes de sensores sem fio em que o roteamento geográfico não é aplicável. Ele encaminha consulta para nós que coletam determinada informação, ao invés de carregar toda a rede com informações não pertinentes. Rumor mantém apenas um único caminho entre origem e destino, diferente do DD, onde tem-se múltiplos caminhos. Resultados de

simulações feitas com o protocolo mostram que foram obtidos números significativos de economia de energia e também este conseguiu-se lidar com problemas de rotas perdidas, só que este tipo de roteamento tem maior eficiência com redes pequenas, devido ao custo de manutenção das tabelas de eventos (AKYILDIZ et al., 2002).

2.2.1.5 Roteamento com reconhecimento de Energia

Em Shah e Rabaey (SHAH; RABAEY, 2002) foi proposto a utilização de um conjunto de caminhos pré selecionados, com a finalidade de aumentar a vida útil da rede. Tais caminhos são escolhidos por uma função de probabilidade, que leva em consideração o consumo de energia de cada caminho. Os autores argumentam que utilizando o caminho com menor consumo de energia todo o tempo, fará a energia esgotar rapidamente neste caminho, por isso utiliza vários caminhos, usando o sorteio de probabilidade para verificar qual caminho será escolhido. O protocolo assume que cada nó sensor da rede possui endereço e a localização de outros nós sensores na rede. O protocolo possui três fases que são segundo Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002):

1. Fase de instalação: o protocolo realiza inundação localizada na rede para encontrar rotas e criar a tabela de roteamento. Ao mesmo tempo, calcula o gasto de energia de cada nó sensor, para isso utiliza a seguinte equação, por exemplo, para o envio de um nó N_i a um nó N_j ,

$$C_{N_i, N_j} = Custo(N_i) + Métrica(N_j, N_i) \quad (2.1)$$

Aqui, a métrica de energia utilizada capta a transmissão e os custos de recepção, juntamente com a energia residual dos nós sensores. Caminhos que têm um custo muito elevado são descartados. A seleção do nó sensor é feito de acordo com a proximidade do destino. O nó sensor atribui uma probabilidade a cada um dos seus vizinhos em uma tabela de encaminhamento (FT), correspondentes aos caminhos formados. A probabilidade é inversamente proporcional ao custo, ou seja:

$$P_{N_j, N_i} = \frac{1/C_{N_j, N_i}}{\sum_{k \in FT_j} 1/C_{N_j, N_i}} \quad (2.2)$$

N_j , então, calcula o custo médio para chegar ao destino com os vizinhos na tabela de encaminhamento (FT) utilizando a fórmula:

$$Custo(N_j) = \sum_{i \in FT_j} P_{N_j, N_i} C_{N_j, N_i} \quad (2.3)$$

Este custo médio para N_j está situado no campo de custo do pedido e encaminhado.

2. Dados da fase de comunicação: cada nó sensor envia o pacote escolhendo aleatoriamente um nó sensor de sua tabela de encaminhamento com as probabilidades.
3. Fase de manutenção de Rota: a inundação localizada é realizada com pouca frequência para manter todos os caminhos vivos.

Tal implementação é semelhante a DD na utilização de vários caminhos, sendo que um deles é reforçado para enviar a taxas mais elevadas. Já a implementação de Shah e Rabaey (SHAH; RABAEY, 2002) utiliza caminhos aleatórios, com a finalidade de economia de energia dos nós. Comparado com DD, a implementação previu uma economia de 21,5%, e aumento da vida útil da rede em 44%. O maior problema encontrado está na recuperação de falha em um nó sensor ou caminho, além da coleta de informações de localização e a criação de mecanismos de endereçamento para os nós sensores.

2.2.1.6 Roteamento baseado em Gradiente

Outro protocolo baseado no DD foi apresentado por Schurgers e Srivastava (SCHURGERS; SRIVASTAVA, 2001), um protocolo baseado em Gradiente (GBR), no qual a idéia principal é manter o número de saltos mínimos para cada transmissão. Desta forma cada nó sensor descobre o número de saltos mínimos (altura do nó) para o coletor. A diferença da altura do nó sensor com a de seu vizinho é chamado de gradiente desse link. A implementação deste protocolo utiliza algumas técnicas como agregação de dados e disseminação para equilibrar de forma uniforme o tráfego na rede. A implementação utiliza nós sensores atuando como relé para vários caminhos a fim de agregar dados, já três técnicas de disseminação foram apresentadas pelos autores:

- Regime estocástico: quando houver dois ou mais próxima do salto com o mesmo gradiente, o nó sensor escolhe um deles aleatoriamente.
- Regime de baseados em energia: quando a energia de um nó sensor cai abaixo de um certo limiar, aumenta a sua altura para que outros nós sensores sejam desencorajadas de envio de dados para esse nó sensor.
- Regime baseado em fluxo: a idéia é desviar novos fluxos de longe de nós sensors que fazem atualmente parte do caminho de outros fluxos.

2.2.1.7 CADR

Em Chu et al. (CHU; HAUSSECKER; ZHAO, 2002) foi apresentado o *Constrained Anisotropic Diffusion Routing* (CADR) outro protocolo que tem como base o *Directed Diffusion*. Duas técnicas foram apresentadas, uma voltada para consultar informações de nós sensores (IDSQ) e outra trata do roteamento através de difusão anisotrópica, que é uma técnica empregada para eliminação de ruídos, muito utilizada para processamento de imagens. A idéia principal é que os sensores consultem e encaminhem os dados em uma rede a fim de maximizar o ganho de informação, minimizando a latência e largura de banda. Consegue-se isto somente pela ativação dos nós sensores próximos ao evento e ajuste dinâmicos de rotas. A diferença principal com DD são informações adicionais aos custos de comunicação, onde em CADR, os nós avaliam o custo/informação e rotas com base em uma tabela de gradiente e exigências do usuário final. IDSQ basea-se em um protocolo que consulta os nós sensores para verificar quem pode fornecer a informação requerida, não se importando como a consulta será feita e como as informações serão roteadas, sendo visto muitas vezes como um processo complementar de otimização. As consultas utilizadas em CADR são feitas utilizando-se um conjunto de critérios para selecionar os nós sensores que têm a informação desejada. Dados de simulações provaram que ele é mais eficiente com o consumo de energia do que *Directed Diffusion*, onde informações são difundidas de forma isotrópica, atingindo os sensores mais próximos.

2.2.1.8 COUGAR

O protocolo *COUGAR* utiliza o conceito de banco de dados distribuído como uma forma de enxergar a rede. Foi proposto por Yao e Gehrke (YAO; GEHRKE, 2002), tendo como idéia principal utilizar consultas declarativas para realizar consultas mais abstratas em funções da camada de rede, para obter informações como de nós sensores relevantes, e utilizar agregação de dados para economizar energia. Em COUGAR uma nova arquitetura para o sistema de banco de dados do nó sensor é proposta, onde nós sensores selecionam um nó líder para realizar a agregação e transmitir os dados para o gateway (coletor). Na Figura 2.8 adaptada de Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002), esta arquitetura é apresentada. O nó sensor selecionado é responsável pela elaboração de um plano de consulta, que obterá informações necessárias, calculará o valor médio e se este for maior que um limite inferior repassará as informações aos nós sensores relevantes. Tal plano também descreve como é feita a eleição de um nó sensor líder. Esta arquitetura oferece capacidade de processamento para todos os nós sensores, garantindo a economia de

energia de transmissão, principalmente em grandes redes, com muitos nós sensores. Mas há alguns inconvenientes, nesta solução que já que esta capacidade de processamento para escolha de rotas e líder faz com que haja um maior consumo de energia nestas tarefas e também um aumento de informações a serem armazenadas. Um segundo ponto a salientar é que como há processamento nos nós sensores, para agregação de dados e consulta, isto deverá exigir sincronismo entre os mesmos, o que poderá trazer atraso em grandes redes. Em terceiro lugar temos o problema da eleição do nó sensor líder que dever ser eleito de forma dinâmica para evitar fracasso de transmissões.

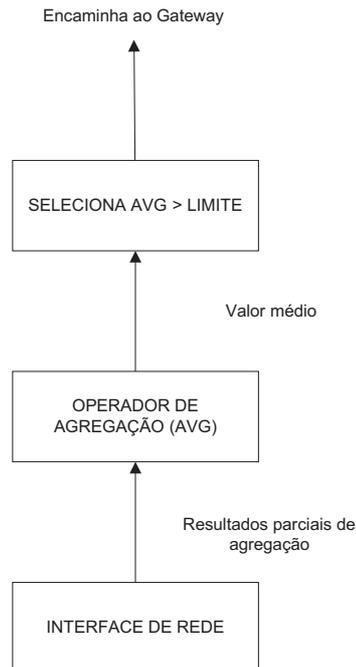


Figura 2.8: Plano de Consulta de um nó sensor líder adaptado de Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002)

2.2.1.9 ACQUIRE

O *Active Query forwarding In sensoR nEtworks* (ACQUIRE) apresentado por Sadagopan et al. (SADAGOPAN; KRISHNAMACHARI; HELMY, 2003), que como COUGAR utiliza a abordagem de banco de dados distribuídos em redes de sensores. Utiliza uma consulta que é encaminhada do coletor para os nós sensores que propagam aos demais nós sensores. As informações contidas no cache dos nós sensores são utilizadas para verificar se a consulta pode ser respondida, e os nós sensores verificam com seus vizinhos esta informação, até que a solicitação possa ser respondida ao coletor, que utiliza o caminho mais curto para responder, que foi descoberto com a troca de informações dos sensores,

está é uma das principais funcionalidades do ACQUIRE. O protocolo utiliza um parâmetro que é o número de saltos que um nó sensor pode encaminhar a consulta a outro nó sensor, este parâmetro é ajustado de forma eficiente. Modelos matemáticos têm sido realizados para adequar o valor do parâmetro, para que esse tenha uma maior economia de energia, no entanto tais resultados não levam em consideração alguns fatores como o custo de recepção. Problemas para seleção do próximo nó sensor para transmissão já foram estudados por CADR e RUMOR, como já visto, em ACQUIRE o próximo nó sensor é escolhido aleatoriamente e basea-se na satisfação máxima da consulta.

2.2.1.10 Protocolo PEQ

O *Periodic, Event-driven, Query-based* (PEQ) apresentado por Pazzi et al. (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004) sugere um protocolo para monitoramento de condições críticas, que utiliza um algoritmo tolerante a falhas e de baixa latência, como por exemplo o monitoramento de áreas de segurança em uma casa de detenção. O protocolo utiliza o caminho mais rápido para entregas dos dados e possui um mecanismo de reconfiguração de rede que garante a tolerância a falhas. O algoritmo de roteamento implementa uma árvore de nós sensores, onde um nó sensor tem apenas informações de seus vizinhos mais próximos, não tendo visão geral da rede. A árvore é iniciada pelo coletor, que envia aos seus vizinhos contadores. Tal construção é realizada pela técnica de inundação da rede, inicializando um contador e incrementando a cada nó sensor que o contador passa, como ilustrado na Figura 2.9a. Como em redes de sensores a comunicação é feita através de sinais de Rádio Frequência (RF), conjuntos de regras foram criados para evitar o congestionamento de mensagens, onde por exemplo, um nó recebe um contador e compara com o seu valor. Se for maior que o recebido, o nó sensor atualiza seu contador e transmite ao seu vizinho, caso contrário, o nó não atualiza seu contador e não transmite. Na Figura 2.9b verifica-se o alcance de transmissão de um nó sensor, o qual tem visão de seus vizinhos próximos.

Quando o coletor percebe que a rede necessita de reconfiguração devido a falhas nos nós sensores, o protocolo PEQ encaminha mensagem de configuração de rede, para recriar as tabelas de roteamento de cada nó sensor. Essa decisão de reconfiguração parte sempre do coletor.

Também quando existe algum evento crítico na rede, o coletor pode informar aos nós sensores que eles podem enviar eventos a todos os vizinhos. Isso pode ser necessário devido a diversas situações que possam causar um maior número de falhas em nós sensores, por exemplo, no monitoramento de incêndio de florestas. Esse mecanismo também é

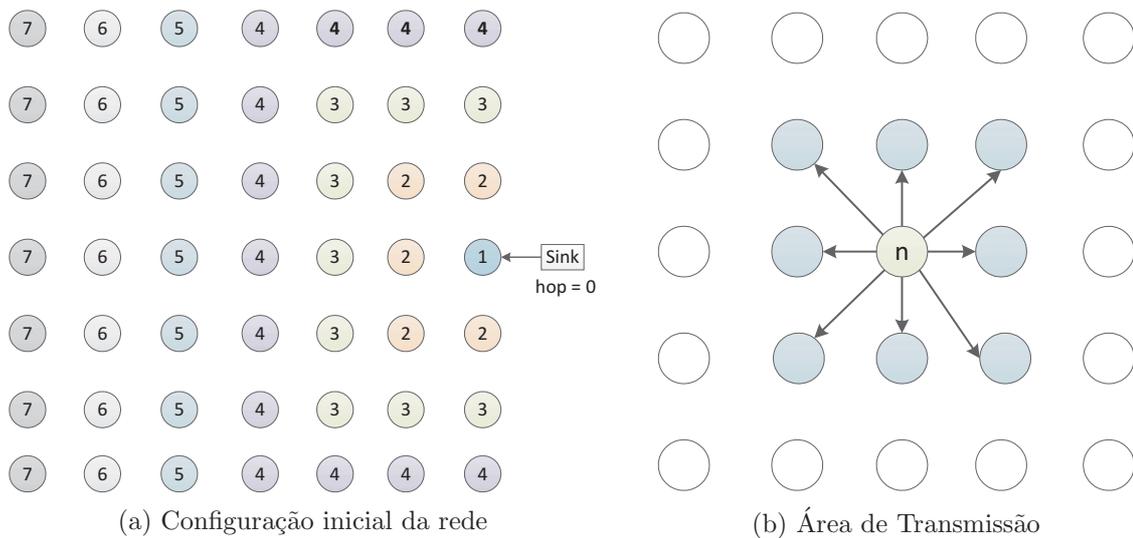


Figura 2.9: Inicialização da rede em PEQ (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004)

decidido pelo coletor. Dessa maneira pode-se ter caminhos múltiplos até o coletor evitando a falha na comunicação dos dados.

O algoritmo PEQ apresentou bons resultados comparados com o paradigma do *Direction Difusion* apresentado em Intanagonwiwat et al. (INTANAGONWIWAT et al., 2003) para monitoramento de situações que envolvem emergência.

2.2.2 Protocolos de Roteamento Hierárquicos

Redes de sensores têm a característica de possuírem um grande número de nós, esse é um dos fatores principais do projeto de redes, a escalabilidade, que pode causar um gargalo no nó coletor. Isso irá gerar latência nas comunicações que dependendo da necessidade da informação observada, causará problemas para o sistema. Para resolver tais problemas têm sido estudados protocolos de roteamento capazes de manter a eficiência da rede. Os protocolos de roteamento hierárquico têm por objetivo manter a eficiência do consumo de energia dos nós sensores, através de comunicação *multi-hop* dentro de um grupo particular (*cluster*) e realizar agregação e fusão de dados, a fim de diminuir o número de mensagens transmitidas para o coletor.

2.2.2.1 LEACH

Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) apresentado por Heinzelman et al. (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000) é um dos mais populares algoritmos de roteamento hierárquico para redes de sensores. Ele baseia-se na premissa de formar grupos de sensores com base na potência do sinal recebido e utilizam de *head-*

clusters, que farão o processamento de agregação/fusão e transmissão dos dados para o coletor, funcionando como um tipo de roteador, economizando assim energia dos demais. Esses *cluster-head* são escolhidos aleatoriamente, utilizando de uma Distribuição de Bernoulli, ao longo do tempo a fim de equilibrar a dissipação de energia entre os nós. Este sorteio é feito pela equação:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p^{*(r \bmod 1/p)}} & \text{se } n \in G, \text{ caso contrário} \\ 0 & \end{cases} \quad (2.4)$$

onde p é a Distribuição de Bernoulli (por exemplo, 0,05), r é a rodada atual, e G é o conjunto de nós sensores que não tenham sido *cluster-head* nos últimos $1/p$ rodadas. *LEACH* apresenta bons resultados em relação ao uso de energia pelos nós sensores, como ele é distribuído não precisa conhecer toda a rede, mas faz uso de mecanismo de *single-hop* para roteamento e cada nó sensor pode transmitir direto para o *cluster-head*. Portanto, não é aplicável às redes implantadas em regiões de grande porte. Além disso, a idéia de agrupamento dinâmico traz sobrecarga extra, por exemplo, alterações de chefe, anúncios, etc, podem diminuir o ganho no consumo de energia.

2.2.2.2 PEGASIS e PEGASIS-Hierárquico

Lindsey e Raghavendra (LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002) propuseram o *Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems* (PEGASIS) um protocolo baseado em LEACH. Ao invés de trabalhar com *clusters*, PEGASIS forma cadeias de nós sensores de modo que cada nó sensor transmite e recebe de um vizinho e apenas um nó sensor selecionado dessa cadeia transmite para o coletor. A figura 2.10 adaptada de Lindsey e Raghavendra (LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002) apresenta a esta estratégia com as cadeias, onde o nó c_0 passa seus dados para o nó c_1 , que agrega seus dados com o do nó c_0 e depois transmite para o líder c_2 . Após o nó c_2 passa o token para c_4 , que transmite seus dados para o nó c_3 . O nó c_3 agrega seus dados com os de c_4 e transmite para o líder c_2 , que aguarda os dados de seus vizinhos e agrega aos seus próprios para finalmente transmitir ao coletor.

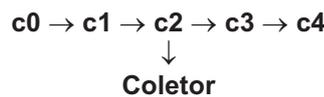


Figura 2.10: Cadeias em PEGASIS adaptada de Lindsey e Raghavendra (LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002)

Em relação a LEACH, a diferença está na formação de cadeias e ter apenas um nó

sensor para transmitir ao coletor. Ele apresentou ganhos de 100% a 300% em diferentes tamanhos e topologias de rede, tal ganho está na eliminação de sobrecarga causada pela formação de *clusters* dinâmicos e diminuição do número de transmissões e recepções por meio de agregação dos dados. Um fator negativo é que em cadeias longas há uma demora nos nós terminais, e também um único nó sensor pode causar gargalo na rede.

Já PEGASIS-Hierárquico (AKYILDIZ et al., 2002) é uma extensão para PEGASIS, que têm por objetivo reduzir o atraso de pacotes durante a transmissão para o coletor e propõe uma solução para o problema de coleta de dados, considerando *Energia x Métrica de Atraso*. Para isso propõe transmissões simultâneas de mensagens de dados. Duas técnicas para evitar colisões e possíveis interferências de sinal entre os sensores estão sendo utilizadas. A primeira técnica incorpora a codificação do sinal, por exemplo, CDMA. Na segunda somente nós sensores espacialmente separados estão autorizados a transmitir ao mesmo tempo. O protocolo de rede baseado em CDMA constrói uma cadeia de nós sensores, que forma uma árvore com hierarquia, onde cada nó sensor transmite para o seu superior na hierarquia, isso faz com haja transmissões em paralelo, o que reduz o atraso.

Em árvores equilibradas o prazo de entrega será de $O(\log N)$, onde N é o número de nós sensores. Na Figura 2.11, adaptado de Lindsey e Raghavendra (LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002), o nó c3 é o líder designado para a rodada 3, por estar ao centro da cadeia de nós sensores. No primeiro nível os nós sensores enviam os dados aos seus vizinhos da direita agregando seus dados aos deles. No segundo nível novamente todos os nós sensores agregam seus dados com os de seus vizinhos da direita. Até o terceiro nível onde o nó c3 agrega dados de c7 que encaminhará ao coletor.

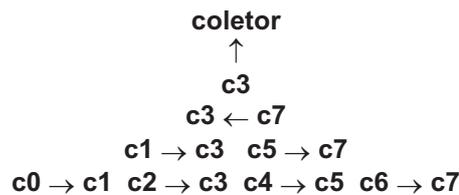


Figura 2.11: Coleta de dados em uma cadeia com base regime binário adaptado de Lindsey e Raghavendra (LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002)

Abordagens não baseada em CDMA criam uma hierarquia de três níveis de nós e efeitos de interferência são reduzidos agendando transmissões simultâneas. Protocolos baseados em cadeia tem demonstrado um melhor desempenho do que o regime PEGASIS.

2.2.2.3 TEEN e APTEEN

Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (TEEN) citado por Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002) é um protocolo hierárquico projetado para ser sensível a mudanças bruscas nos atributos observados, como por exemplo, temperatura. Em aplicações críticas a garantia de entrega de dados é importante, o protocolo TEEN utiliza a abordagem hierárquica, com uso de mecanismo de dados centralizados. Sua arquitetura é baseada em *clusters* hierárquicos, onde os nós sensores formam estes *clusters* e cada um tem um *cluster-head* que é responsável pela transmissão até o coletor, os demais formam o segundo nível, a Figura 2.12 representa esta arquitetura.

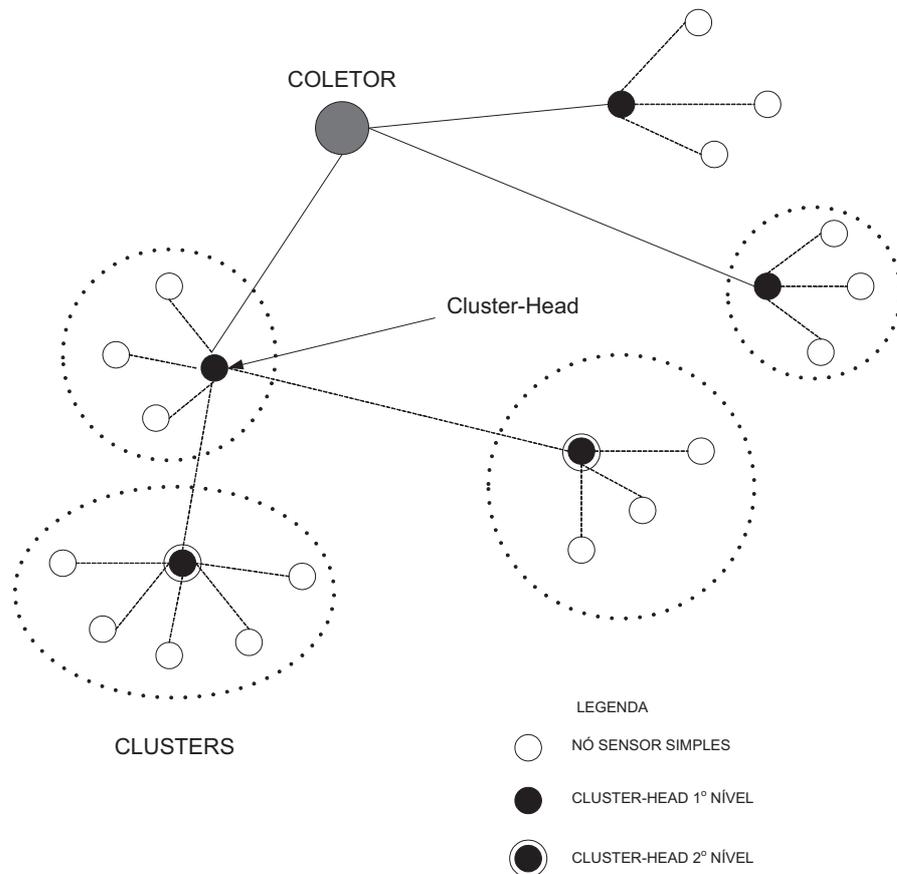


Figura 2.12: Arquitetura TEEN e APTEEN adaptado de Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002)

Após a formação dos *clusters*, o *cluster-head* transmite dois limites para os nós sensores, que são o limite rígido e suave para atributos de sensoriamento. Limite rígido é o valor mínimo possível de um atributo para que um nó sensor ligue seu transmissor e transmita ao *cluster-head*. Assim transmite-se somente quando o atributo é percebido, reduzindo o número de transmissões. Então quando um nó sensor detecta o valor igual

ou superior ao limite rígido, e o valor está igual ou superior ao limite suave estes dados são transmitidos. Tais valores podem ser ajustados a fim de controlar o número de transmissões. Por isso TEEN não é um bom protocolo para aplicações que necessitam de relatórios periódicos, uma vez que os valores rígidos ou suaves podem não ser atingidos.

O *Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol* (APTEEN) citado por Akyildiz et al. (AKYILDIZ et al., 2002) é uma extensão para TEEN e visa tanto a captura de coletas periódicas de dados e para acontecimentos críticos. A arquitetura é a mesma que em TEEN. Quando o coletor forma os *clusters*, o *cluster-head* envia os valores de limites e o horário de transmissão para os nós sensores. O *cluster-head* realiza processamento de agregação de dados, com finalidade de economia de energia. APTEEN suporta três tipos de consultas:

- Histórica: para análise de valores antigos;
- Tempo: para verificação instantânea da rede; e
- Persistente: para monitorar um evento em um período de tempo.

Simulações têm mostrado que TEEN e APTEEN superam LEACH (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000). Os experimentos demonstraram que o desempenho APTEEN está entre LEACH e TEEN em termos de dissipação de energia e vida útil da rede. TEEN oferece o melhor desempenho, uma vez que diminui o número de transmissões. As principais desvantagens das duas abordagens são a sobrecarga e a complexidade da formação de *clusters* em vários níveis, a implementação de funções para atribuir os limites para transmissão dos dados.

2.2.3 Protocolos baseados em localização

Alguns protocolos de roteamento em redes de sensores necessitam da localização dos nós para calcular a distância e o consumo de energia necessário para as transmissões. A identificação de nós sensores muitas vezes é necessária para evitar o envio de informações desnecessárias a determinados sensores. A seguir serão apresentados alguns protocolos projetados primeiramente para redes *ad hoc*, que consideram a mobilidade dos nós sensores (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001) e (RODOPLU; MENG, 1998), entretanto eles também podem ser utilizados em redes de sensores sem fio, onde existe mobilidade ou não.

2.2.3.1 MECN

Minimum Energy Communication Network (MECN) proposto por Xu et al. (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001) cria uma rede de sensores sem fio com utilização de pouca energia através de utilização de GPS de baixo consumo. O protocolo assume a rede como sendo móvel, tendo um nó sensor, qual chama de mestre, que coleta as informações e encaminha ao interessado, a mesma topologia é utilizada por outros protocolos de redes de sensores sem fio. MECN cria regiões de transmissão formada por nós sensores, geralmente circulares, onde a transmissão é feita pelo nó sensor que possui maior eficiência de energia. Na Figura 2.13 observa-se a região de retransmissão do par nó(i,r), a idéia principal de MECN é encontrar uma sub-rede com o menor número de nós sensores e que utilizem a menor energia necessária para transmissão.

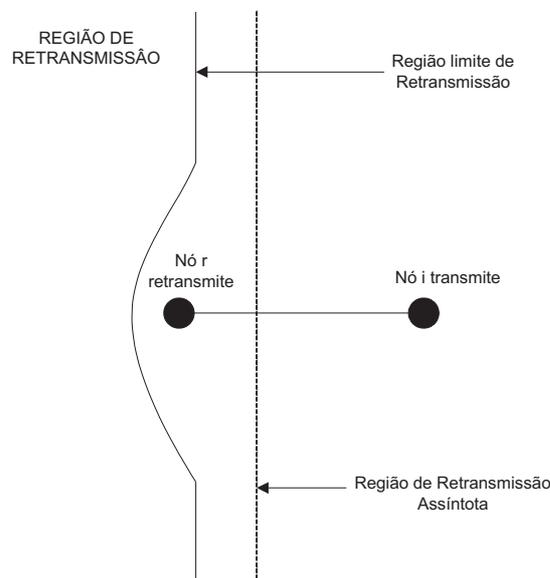


Figura 2.13: Região de transmissão-retransmissão do par nó(i,r) em MECN, adaptado de Xu et al.(XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001)

Assim a rota de menor energia é encontrada sem considerar todos os nós de rede. Isto é realizado utilizando uma consulta localizada em cada nó sensor da rede, verificando sua região de retransmissão. Para isso o protocolo utiliza duas fases:

1. Consiste da criação de um gráfico que contém os *links* da rede com informações de consumo de energia, este gráfico exige cálculos nos nós sensores.
2. Localização das ligações ótimas, utilizando o algoritmo de *Belmann-Ford* para encontrar os caminhos curtos como métrica de custo. Em redes móveis as posições dos nós sensores são atualizadas pelo GPS.

Uma das vantagens do protocolo MECN é que ele é auto-reconfigurável e, adapta-se dinamicamente a falha do nó sensor ou a implantação de novos nós sensores.

O *Small Minimum Energy Communication Network* (SMECN) (LI; HALPERN, 2001) é um complemento de MECN. Em MECN assume-se que cada nó sensor pode transmitir a todos os outros nós sensores, só que não a todo o momento. No SMECN, obstáculos entre os nós sensores são considerados, e que a rede pode não estar totalmente conectada. Com isso a sub-rede construída por SMECN é mais eficiente em consumo de energia e as transmissões conseguem alcançar todos os nós sensores na região do transmissor. Com isso os resultados obtidos por Li e Halpern (LI; HALPERN, 2001) mostraram que ele usa menos energia que MECN, no entanto montar a sub-rede com menor número de arestas causa sobrecarga no algoritmo.

2.2.3.2 GAF

Geographic Adaptive Fidelity (GAF) apresentado por Xu et al. (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001) é um algoritmo de roteamento baseado em localização utilizado principalmente para redes *ad hoc*. GAF poupa energia, desligando os nós sensores que não são utilizados na rede para a observação de um determinado evento, sem afetar o desempenho da rede. O protocolo cria uma *grid* virtual para as áreas de cobertura, onde cada nó sensor utiliza a sua localização GPS, para associar-se como ponto da rede virtual. Caso tenha dois pontos como mesma posição, estes são considerados equivalentes em termos de custo. Isto é utilizado para deixar alguns nós sensores dormentes em uma mesma rede, fazendo economia de rede. A Figura 2.14 adaptada de Xu et al. (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001) mostra que o nó sensor 1 pode atingir os nós sensores 2, 3 e 4 que são seus vizinhos e os nós sensores 2,3 e 4 podem alcançar o nó sensor 5. Assim os nós sensores 2,3 e 4 são equivalentes e dois deles podem entrar no estado de dormência.

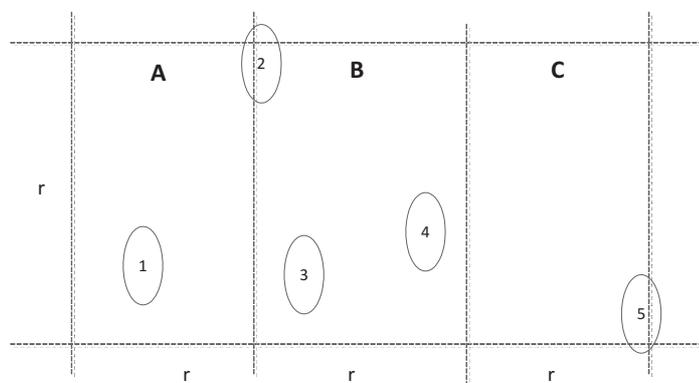


Figura 2.14: Exemplos de grid virtual em GAF (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001)

Em GAF existe três estados para os nós sensores:

- Descoberta: onde os nós sensores descobrem seus vizinhos;
- Ativo: quando o nó sensor participa do roteamento; e
- Dormência: quando o rádio esta desligado.

As transições de estado na GAF estão representadas na Figura 2.15 adaptado de Xu et al. (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001). Determinar qual nó sensor irá dormir depende da aplicação e seus parâmetros são ajustados com o processo de roteamento. Para trabalhar com a mobilidade dos nós sensores, cada nó sensor faz sua estimativa para entrar no estado de dormência, e encaminha esta informação aos seus vizinhos, que ajustam seus horários de dormência em conformidade, para manter roteamento. Antes de expirar a hora de dormência, os nós sensores acordam e um deles torna-se ativo.

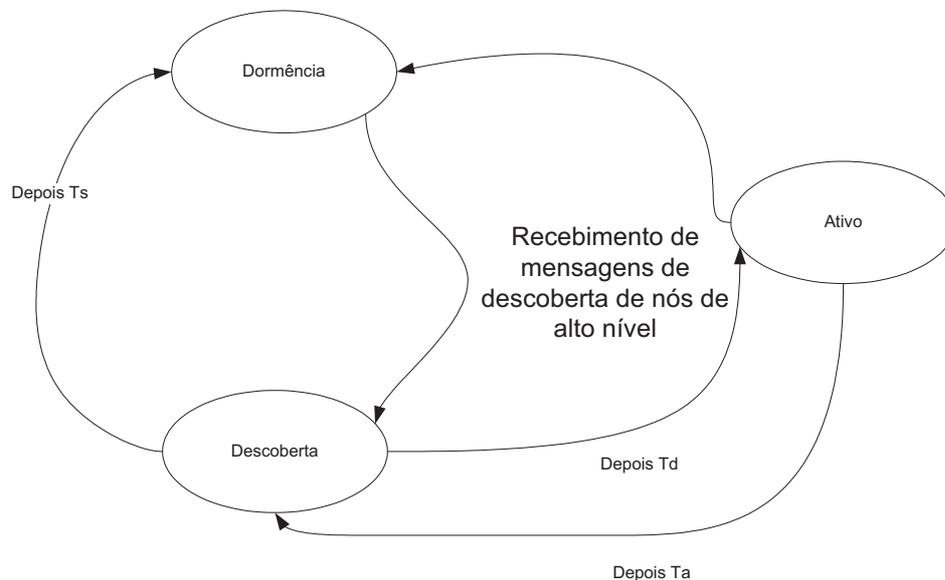


Figura 2.15: Estados de transição em GAF (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001)

Os resultados obtidos por Xu et al. (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001) mostram que o GAF tem um bom desempenho em redes de sensores em termos de latência e perda de pacotes, o que aumenta a vida útil da rede.

2.2.3.3 GEAR

Em Xu et al. (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001) sugeriu utilizar informações geográficas para realizar consultas a determinadas regiões da rede, com dados geográficos para nós sensores destas regiões. Para tal foi proposto o *Geographic and Energy-Aware*

Routing (GEAR) que utiliza estas informações geográficas e seleção heurística de nós sensores para encaminhar dados para uma determinada região. Ele se difere de *Directed Diffusion*, por limitar-se a uma região e com isso enviar os dados somente para os interessados. GEAR é um complemento de DD, economizando energia, onde cada nó sensor possui o custo estimado e custo que aprendeu para chegar aos seus vizinhos. Este custo estimado combina a energia residual e a distância ao destino. O custo que aprendeu é o custo estimado melhorado pelo encaminhamento de dados em buracos da rede. Um buraco acontece quando um nó não tem nenhum vizinho mais próximo a região alvo, senão há buracos os custos igualam-se. O algoritmo possui duas fases que são:

1. Encaminhamento de pacotes para a região-alvo: o nó sensor verifica com seus vizinhos se há alguém próximo ao destino. Se houver mais de um, esses são selecionados como próximos saltos para o destino. Se não existe ninguém significa, que há um buraco, nesse caso o protocolo escolherá um dos nós sensores baseados na função de custo aprendido.
2. Encaminhamento dos pacotes dentro da região: se o nó sensor destino está dentro da própria região, esse pode difundir a informação por inundação restrita ou encaminhamento geográfico. Inundações restritas não são aconselhadas para redes de sensores densamente implantadas, nesse caso o encaminhamento geográfico é mais aconselhado. A Figura 2.16 adaptada de Xu et al. (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001) demonstra estas etapas.

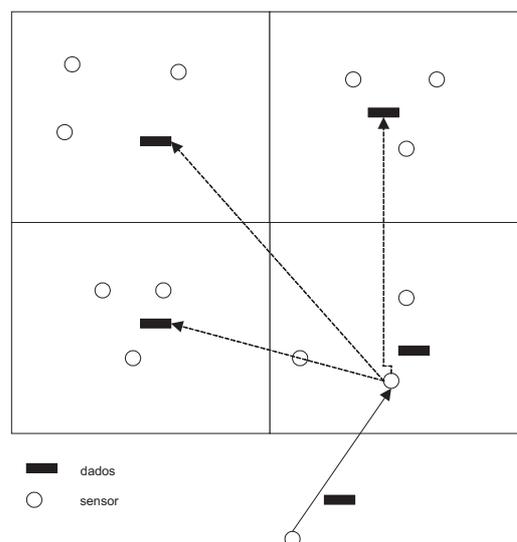


Figura 2.16: Encaminhamento Geográfico em GEAR (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001)

2.2.4 Protocolos de Roteamento Proativos

Também chamados de *Table-Driven Routing Protocol*, utiliza uma ou mais tabelas de roteamento em cada nó sensor, atualizando constantemente essas tabelas. Tendo como principal vantagem ter rotas sempre disponíveis, evitando a perda de tempo e energia buscando novas rotas. Mas sua utilização não é aconselhável para redes com alta taxa de mobilidade e com grande números de nós sensores, uma vez que a tabela de roteamento ficaria enorme.

2.2.4.1 DSDV

O protocolo de roteamento *Destination-Sequenced Distance-Vector Routing* (PERKINS; BHAGWAT, 1994), DSDV, é baseado no algoritmo de busca *Bellman-Ford*. Neste protocolo os nós sensores da rede possuem os seguintes campos em sua tabela de roteamento:

- Endereço de Destino: endereço do nó sensor destino, geralmente o coletor;
- Número de *Hops*: número de saltos necessários para alcançar o coletor;
- Número de Sequência: um identificador utilizado para diferenciar cada nova rota criada na tabela.

Essa tabela é atualizada constantemente, e as mensagens de atualização são transmitida quando se percebe alguma alteração na rede, devido a falhas nos nós sensores. O número de sequência (SN) é utilizado também pelo nó sensor, quando do recebimento de mensagens simultâneas, ele pode optar pela de maior valor do campo SN, ou se for iguais o de menor valor do campo de número de *hops*.

Considerando o nó sensor MH₄, ilustrado na Figura 2.17, teríamos a seguinte estrutura de tabela de roteamento representada pela Tabela 2.2, onde o número de sequência recebe a identificação do nó sensor que a criou.

2.2.4.2 CGSR

O *Clusterhead Gateway Switching Routing* (CGSR) utiliza o conceito de *cluster* dos protocolos hierárquicos para segmentação de sua rede (JAYAKUMAR; GOPINATH, 2007). Todos os pacotes dos nós sensores são encaminhados aos seus nós *clusters-heads* que encaminham ao coletor. Uma desvantagem deste protocolo é caso haja muita mobilidade dos nós *clusters-heads* a rede sofre atrasos para reparar esses caminhos, uma vez que só

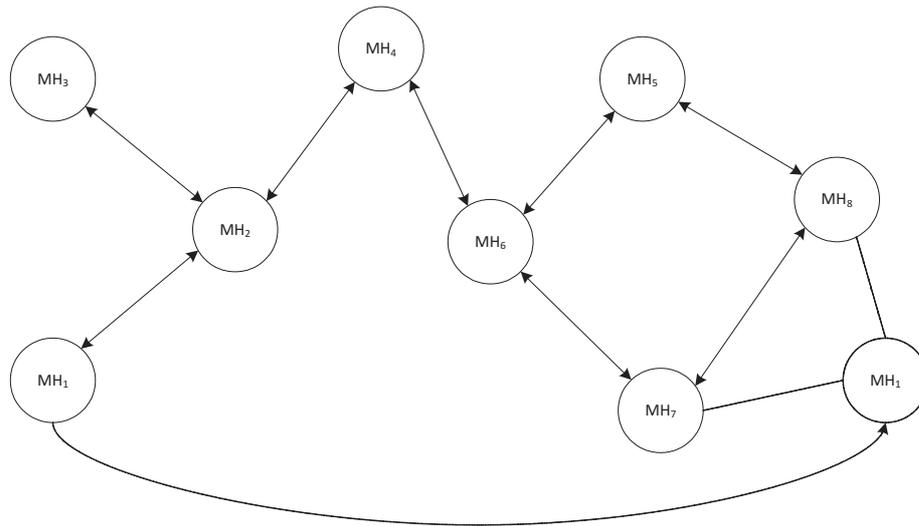


Figura 2.17: Exemplo de uma Topologia de RSSF utilizada pelo protocolo DSDV

Tabela 2.2: Exemplo de Tabela de Roteamento para o nó sensor MH_4 (PERKINS; BHAGWAT, 1994)

Destino	Próximo Salto	Métrica	Número de Sequência
MH_1	MH_2	2	S406_ MH_1
MH_2	MH_2	1	S128_ MH_2
MH_3	MH_2	2	S564_ MH_3
MH_4	MH_4	0	S710_ MH_4
MH_5	MH_6	2	S392_ MH_5
MH_6	MH_6	1	S076_ MH_6
MH_7	MH_6	2	S128_ MH_7
MH_8	MH_6	3	S050_ MH_8

o *cluster-head* tem o endereço do coletor. Cada nó sensor da rede possui duas tabelas de roteamento. Uma contém o endereço dos *clusters head* para qualquer nó sensor de destino e a outra, contém o próximo passo para alcançar o coletor.

2.2.5 Protocolos de Roteamento Reativos

Também chamados de *Source-Initiated On-Demand Routing*, esses protocolos criam suas rotas somente quando o nó sensor deseja enviar seus dados para o coletor. Quando o protocolo encontra essa rota, ele a utiliza por um período de tempo determinado. Essa descoberta de rotas é feita por mensagens de inundação (*flooding*). Eles têm menor processamento que os protocolos proativos, mas gastam um maior tempo para descobrir

novas rotas. Exemplos desse tipo de protocolo são: *Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing* (AODV), *Dynamic Source Roting* (DSR).

2.2.5.1 AODV

O *Ad-hoc On-Demand Distance Vector* (AODV) (PERKINS; ROYER, 1999) tem como base o protocolo DSDV, mesmo tendo a característica de ser um protocolo do reativo. Utiliza o mecanismo de descoberta de rotas baseado na origem. Quando um nó sensor deseja encaminhar dados para um destino que ele não possui em sua tabela de roteamento, ele inicia um processo de descoberta desse caminho, demonstrado na Figura 2.18.

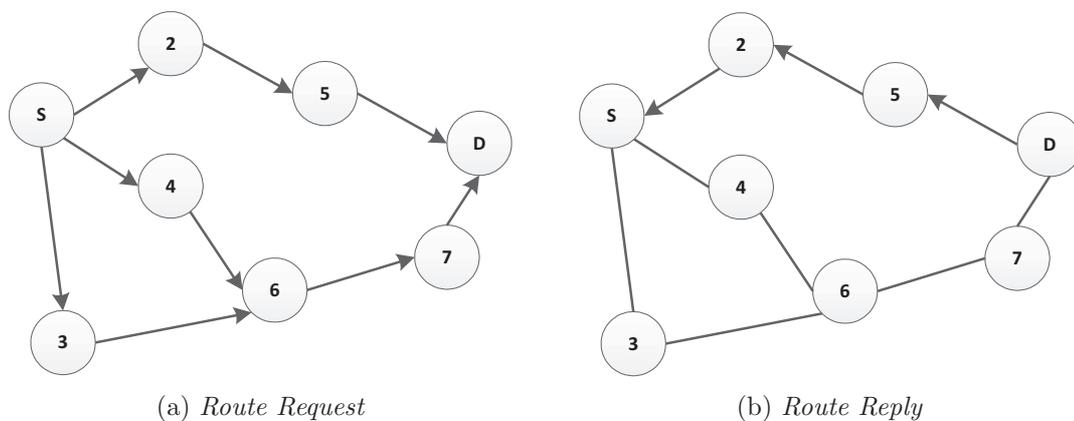


Figura 2.18: Criação de rota no protocolo AODV (PERKINS; ROYER, 1999)

O nó sensor interessado em descobrir uma nova rota encaminha aos seus vizinhos uma mensagem de requisição de rota (*RREQ - Route REQuest*), que por sua vez encaminham sucessivamente até o nó sensor destino, ou um nó sensor que possua o endereço interessado. O AODV utiliza um número de sequência de destino para se certificar que a rota possui as informações mais recentes e que está correta. Além do número de sequência ele utiliza uma identificação da mensagem RREQ, ou seja, a cada requisição um novo número é gerado, o qual o protocolo chama de *BroadcastID*.

Durante o processo de envio da mensagem de RREQ, os nós sensores vizinhos armazenam em suas tabelas de roteamento os endereços de seus vizinhos, estabelecendo desta forma o caminho reverso para o nó sensor que solicitou a mensagem. Desta forma quando o nó sensor destino é encontrado, é enviado para o nó sensor requisitante uma mensagem tipo *unicasting* com o endereço do nó sensor destino (*RREP - Route REPLY*). Quando o nó sensor recebe a mensagem RREP, ele armazena em sua tabela de roteamento essa rota e acrescenta a ela um campo com o tempo de vida, caso ela não seja utilizada nesse tempo é excluída da tabela de roteamento.

O protocolo AODV pode utilizar mensagens do tipo "hello", para informar seus vizinhos que está ativo. Esse protocolo pode ou não fazer uso do quadro de hello, que é enviado periodicamente de um nó sensor para seus vizinhos, informando e mantendo assim a sua conectividade local com os vizinhos. O AODV possui um menor *overhead* em relação aos protocolos proativos, mas tem um alto atraso devido ao processo de descoberta de rotas.

2.2.5.2 DSR

O *Dynamic Source Routing* (DSR) (JOHNSON et al., 2003) é um protocolo que usa um procedimento de descoberta de rotas baseado na origem. Com duas fases, sendo elas:

- Descoberta de rotas (*Routing Discovery*): quando um nó sensor precisa enviar um dado, ele consulta sua tabela para verificar se existe uma rota válida para o destino. Se possuir ele utilizará essa rota para fazer o envio, caso contrário, ele inicia um processo de descoberta de rotas com encaminhamento de mensagem RREQ. Nessa mensagem uma chave de identificação única é gerada, onde cada nó sensor que recebe essa mensagem faz uma verificação para saber se a rota é conhecida. Caso não conheça o endereço ele acrescenta a mensagem seu próprio endereço e encaminha a seus vizinhos, como ilustrado na Figura 2.19a.
- Manutenção de Rotas (*Route Maintenance*): utiliza pacotes de erros (*Route Error*) e de reconhecimento (*acknowledgments*). Os pacotes de erros são criados quando ocorre um erro fatal de transmissão em um nó sensor. Já os pacotes de reconhecimento são utilizados para verificar se as rotas estão ativas.

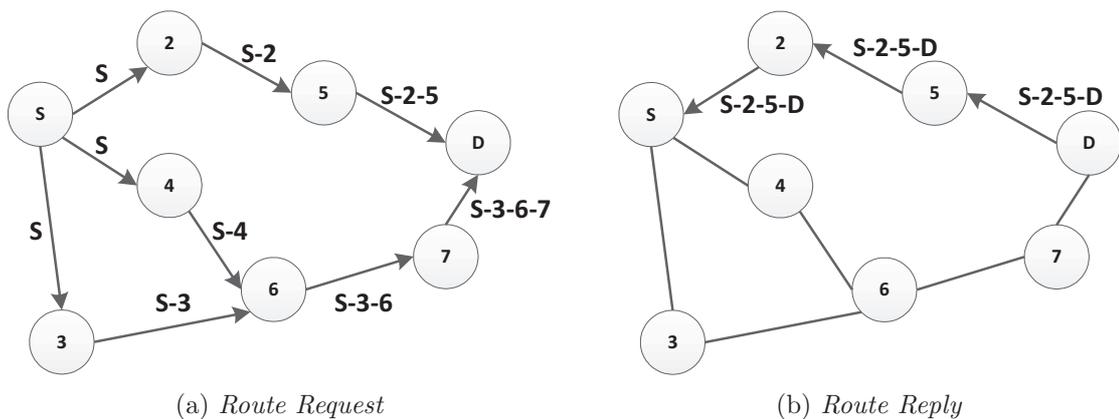


Figura 2.19: Criação de rota no protocolo DSR (JOHNSON et al., 2003)

O DSR é eficiente para RSSF de até 200 nós sensores, possuindo um menor *overhead* de controle. A desvantagem é que quando há quebra de links de rotas ape-

nas o nó sensor fonte informa esse erro.

2.3 Gerenciamento de Redes de Sensores sem Fio baseado em Políticas

A utilização do gerenciamento de redes para sensores sem fio permite determinar o comportamento do sistema, conforme a necessidade atual. Segundo Westerinen et al. (WESTERINEN et al., 2001) políticas são regras para administrar, gerenciar e controlar os recursos de rede. Nas redes de sensores sem fio onde encontra-se diversos tipos de ambientes de diferentes características, controlar esse sistema implicar em garantir um melhor desempenho, adaptando a rede as condições de cada um desses ambientes.

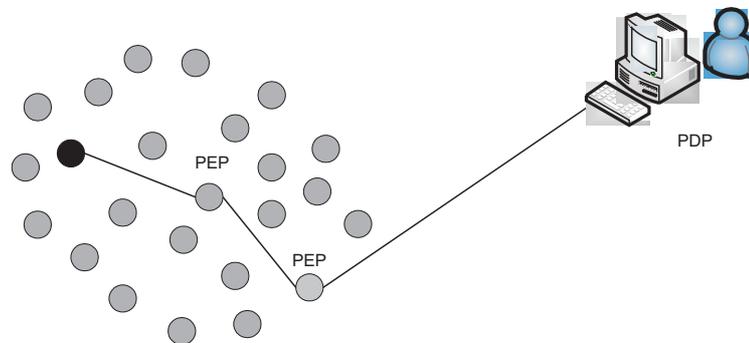


Figura 2.20: Implementação da Arquitetura de Gerenciamento de Políticas

Os estudos iniciais com gerenciamento de redes foram iniciados pela *Internet Engineering Task Force - IETF* em 2000 (DURHAM et al., 2000). Onde foi definido o protocolo que permitia troca de políticas de informação entre o Ponto de Decisão de Política (*Policy Decision Point - PDP*) e o Ponto de Aplicação da Política (*Policy Enforcement Point - PEP*), esse protocolo foi chamado de *Common Open Policy Service (COPS)*. O PDP gera as políticas e distribui para ser aplicado pelo PEP, onde as políticas normalmente ficam armazenadas em um repositório para eventual utilização (GUERIN; YAVATKAR; PENDARAKIS, 2000), ilustrado na Figura 2.20.

2.4 Considerações Finais

Os algoritmos de roteamento para Redes de Sensores Sem Fio são alvos de pesquisas pela comunidade acadêmica nos últimos anos. Sendo que cada um dos protocolos desenvolvidos atendem a uma determinada necessidade.

Nesse capítulo foram abordadas as Redes de Sensores Sem Fio, sua arquitetura e fatores que influenciam a topologia de uma rede. As operações utilizadas para a economia de energia em uma rede de sensores como, por exemplo, agregação de dados e sincronização dos dados. Em relação aos protocolos de roteamento de redes de sensores, foram demonstrados pesquisas, quais classificam estes protocolos em: i) protocolos centrados em dados; ii) protocolos de roteamento hierárquico; iii) protocolos baseados em localização; iv) protocolos proativos; v) protocolos reativos. A tabela 2.3, adaptada de Pazzi et al. (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004), descreve os protocolos e suas categorias.

Tabela 2.3: Classificação dos protocolos de roteamento para redes de sensores sem fio. Adaptado de (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004)

Protocolo de Roteamento	Centrado em Dados	Hierarquico	Baseado em Localização	Proativos	Reativos
<i>Directed Diffusion</i>	X				
<i>Rumor Routing</i>	X				
<i>CADR</i>	X				
<i>COUGAR</i>	X				
<i>ACQUIRE</i>	X				
<i>LEACH</i>		X			
<i>TEEN and APTEEN</i>	X	X			
<i>PEGASIS</i>		X			
<i>MECN and SMECN</i>			X		
<i>GAF</i>		X	X		
<i>GEAR</i>			X		
<i>SAR</i>			X		
<i>DSDV</i>				X	
<i>CGSR</i>				X	
<i>AODV</i>					X
<i>PEQ</i>	X				
<i>DSR</i>					X
<i>PBP</i>	X	X			

Os protocolos de roteamento onde os nós sensores não são identificados por seus endereços na rede, mas sim pelos dados dos eventos observados são chamados de protocolos centrado em dados. Sendo o *Directed Diffusion*, um dos principais protocolos dessa categoria. As informações são coletadas através de difusão de uma consulta de interesse na rede, e os nós sensores que possuem tal informação encaminham seus dados ao coletor. Aplicações que exijam consultas de alta complexidade acabam não utilizando essa categoria devido ao esquema de nomeação dos atributos não serem suficientes para essa finalidade.

Já os protocolos de roteamento hierárquicos têm por objetivo manter a eficiência

do consumo de energia dos nós sensores, através de comunicação *multi-hop* dentro de um grupo particular (*cluster*) e realizar agregação e fusão de dados, a fim de diminuir o número de mensagens transmitidas para o coletor.

Protocolos de roteamento baseados em localização utilizam informações da posição geográfica dos nós sensores, para ajudar no roteamento e economizar energia.

Protocolos Proativos utilizam uma ou mais tabelas de roteamentos garantindo dessa forma a tolerância a falhas, mas por sua vez não úteis em redes com grande número de nós sensores. Os protocolos reativos tem menor *overhead* que os protocolos proativos, mas gastam muito tempo tentando descobrir novas rotas.

O protocolo PEQ proposto por Pazzi et al. (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004) descrito para ser utilizado para o monitoramento de condições críticas. Ele utiliza um algoritmo tolerante a falhas e de baixa latência. O protocolo utiliza o caminho com menor atraso para entregas dos dados e possui um mecanismo de reconfiguração de rede que garante a tolerância a falhas. O protocolo proposto PBP baseou-se em PEQ e devido a isso foi utilizado em simulações.

Todos os protocolos analisados atendem a uma necessidade específica para qual foram implementados, às vezes a tolerância a falha, e outras a economia de energia. Esse trabalho apresenta um protocolo híbrido, com características em algumas classificações, que apresenta um mecanismo eficiente de controle de energia dos seus nós sensores, através do uso de políticas para gerenciamento dos intervalos de transmissão.

A utilização de políticas para o gerenciamento de redes em sensores sem fio, visa estabelecer regras que permitem controlar o comportamento dos sensores, estabelecendo o melhor gerenciamento da rede.

Capítulo 3

Protocolo Baseado em Políticas (PBP) para RSSF utilizado para monitoramento de eventos sazonais

Verifica-se na literatura diversas soluções propostas para protocolos de roteamento para redes de sensores sem fio, que possuem objetivos diversos, como por exemplo, a economia de energia em seus nós sensores dentre outras métricas. Alguns autores como Ruiz et al. (RUIZ; NOGUEIRA; LOUREIRO, 2003), Qwasmi e Liscano (QWASMI; LISCANO, 2012) e Rantos et al. (RANTOS et al., 2012) têm utilizado políticas para gerenciamento de redes de sensores sem fio para obter informações dos nós sensores, verificar seus recursos e gerenciar a troca de mensagens entre os nós sensores e não monitoramento sazonal.

Todavia o estudo de protocolos de roteamento em redes de sensores sem fio que utilizem políticas de gerenciamento de redes, para maximizar a vida útil da rede em relação aos eventos observados atuando assim de forma sazonal, pouco se produziu.

O embasamento teórico referencial para esse trabalho está descrito no capítulo 2, onde verifica-se as diversas categorias de protocolos de roteamento e suas principais características que foram utilizadas para implementação de um protocolo que atendesse aos objetivos propostos por esse trabalho.

Esse capítulo apresenta as premissas e requisitos para o protocolo PBP, sua arquitetura proposta nesse trabalho para redes de sensores sem fio, sua estrutura de funcionamento e o gerenciamento de políticas, descrevendo assim o protocolo implementado chamado de PBP (Protocolo Baseado em Políticas).

As seções 3.1 e 3.2 apresentam respectivamente as premissas e a arquitetura do protocolo PBP, suas características e componentes. A seção 3.3 apresenta a funcionalidade, sua estrutura de dados e troca de mensagens utilizado pelo protocolo proposto. Na seção 3.4 é descrito as políticas de gerenciamento do protocolo, que é o grande diferencial do PBP em relação aos demais protocolos de RSSF. Por fim a seção 3.5 apresenta os

mecanismos de tolerância a falha do protocolo PBP.

3.1 Requisitos do Protocolo PBP

Para o desenvolvimento de um protocolo otimizado para o monitoramento de eventos sazonais, foi definido um conjunto de premissas sobre as características da rede e o tipo de tráfego que esta carrega. Tais premissas têm por objetivo descrever o funcionamento e otimização do protocolo e do ambiente onde este opera previsto para seu melhor desempenho.

- **O Coletor é fixo:** em muitas aplicações de RSSF o coletor pode ser móvel, como por exemplo em aplicações com VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) coletando informações de nós sensores em uma determinada região, mas esses tipos de redes não são comuns. Assim o PBP utiliza o coletor fixo, facilitando o processo de manutenção da rede, como criação e configuração de rotas.
- **A mobilidade dos nós sensores é nula:** a mobilidade de nós sensores torna o protocolo complexo e com um custo energético maior para a rede. Algumas vezes pode haver o deslocamento natural do nó sensor em pequenas distâncias, por razões como deslizamentos de terra, mas isso é ocasional. Por isso optou-se em considerar redes estáticas para um melhor desempenho do protocolo e pelo motivo de sua utilização, que é o monitoramento de eventos ambientais, o qual não exigem mobilidade.
- **A comunicação do coletor para os nós sensores:** o coletor comunica-se com os nós sensores através de mensagens de inundação (AKKAYA; YOUNIS, 2005), para configuração inicial da rede e formação da tabela de roteamento. A utilização de políticas de gerenciamento de redes, podem ser distribuídas da mesma forma pelo coletor. Com a tabela de rotas criadas o coletor pode disseminar mensagens para determinadas regiões da rede, através da formação de *clusters*.

3.2 Arquitetura do PBP

A arquitetura proposta está dividida basicamente em duas partes facilitando assim a sua utilização. Na primeira parte encontra-se o coletor que é responsável pela decisão das políticas a serem aplicadas nos nós sensores e pelo armazenamento das informações coletadas, chamado também de Ponto de Decisão da Política (Policy Decision Point)–

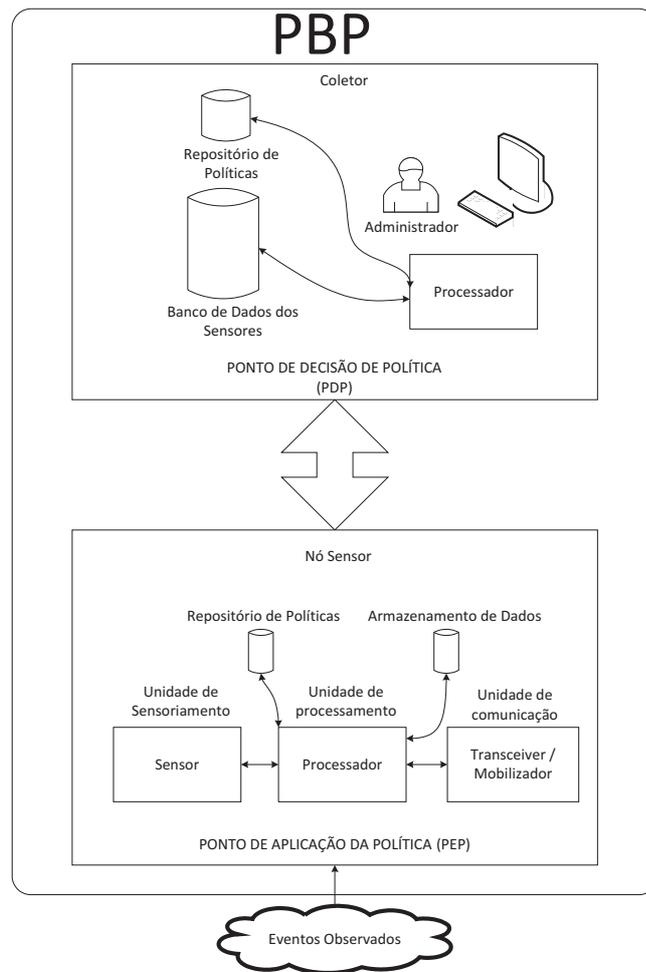


Figura 3.1: Componentes do Protocolo proposto PBP

PDP. A segunda parte é composta pelos nós sensores, responsáveis pelo sensoriamento e transmissão dos dados ao coletor, chamados de Pontos de Aplicação da Política (Policy Enforcement Point)– PEP.

Inicialmente, o coletor controla todas as informações recebidas dos nós sensores através do processador e armazena em um banco de dados, para posterior consulta do administrador, que é a pessoa responsável pelo gerenciamento do sistema, e definição das políticas a serem utilizadas na rede e distribuídas pelo protocolo PBP. Outra função do processador no coletor é o gerenciamento da topologia da rede, auxiliando na criação das rotas entre os nós sensores e reiniciando a rede em caso de falhas. O nó sensor, que representa a segunda parte da Figura 3.1, é composto de três componentes básicos: unidade de sensoriamento, unidade de processamento e unidade de comunicação (transceptor/mobilizador). A unidade de sensoriamento é composta por sensores que capturam as informações e transferem os dados observados para a unidade de processamento.

A unidade de processamento é responsável pelo armazenamento, gerenciamento e

aplicação das políticas transmitidas pelo PDP. Essas políticas são armazenadas em um repositório. Os dados coletados pelos nós sensores são processados e armazenados em um componente para posterior transmissão. A unidade de comunicação é responsável pela transmissão/recepção dos dados (transceptor). A função de mobilizador da unidade de comunicação possui a tarefa de 'acordar' o nó sensor para realização de tarefas atribuídas de acordo com a configuração pela unidade de processamento. O protocolo PBP utiliza o conceito de agregação de dados para evitar problemas de congestionamento da rede.

3.3 Funcionamento da Arquitetura

O diagrama de classes da Figura 3.2 apresenta a estrutura de dados do protocolo PBP, desenvolvido em C++ e implementado no Simulador de Redes NS-2 (FALL; VARADHAN, 2007). Tal estrutura apresenta as classes: *node*, *PBP*, *rtable* e *ptable*.

A estrutura *node* é responsável por armazenar informações dos sensores como seu número de identificação na rede, o endereço do nó coletor para onde as informações devem ser enviadas, a política que está sendo utilizado e o intervalo de transmissão que são utilizados pelas políticas. O endereço para onde o nó sensor encaminha suas transmissões, que é o nó sensor mais próximo, assim como o campo utilizado para especificar a região de sensores, onde esse nó sensor está localizado, criando a região de *cluster*. Além do nível de energia que o nó sensor possui. Campos esses estão descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Informações do Nó sensor

Campo	Descrição
nodeID	Endereço do nó
sink_id	Endereço do nó coletor
energy	Quantidade de energia residual do nó sensor
timer_send_rcv	Intervalo de transmissão
policy:ptable	Tabela de Políticas
next: rtable	Tabela de Roteamento
head_id	Identificador do cluster head

A classe *PBP* implementa e armazena informações dos dados de sensoriamento dos fenômenos observados a serem transmitidos ao coletor. Ela possui informações do pacote de origem, o qual pode ser oriundo de outro nó sensor ou dele próprio, o tamanho desse pacote, sua sequência e o tipo de mensagem desse pacote, que será comentado a seguir. O número de identificação de '*hop*' utilizado para gerar a tabela de roteamento,

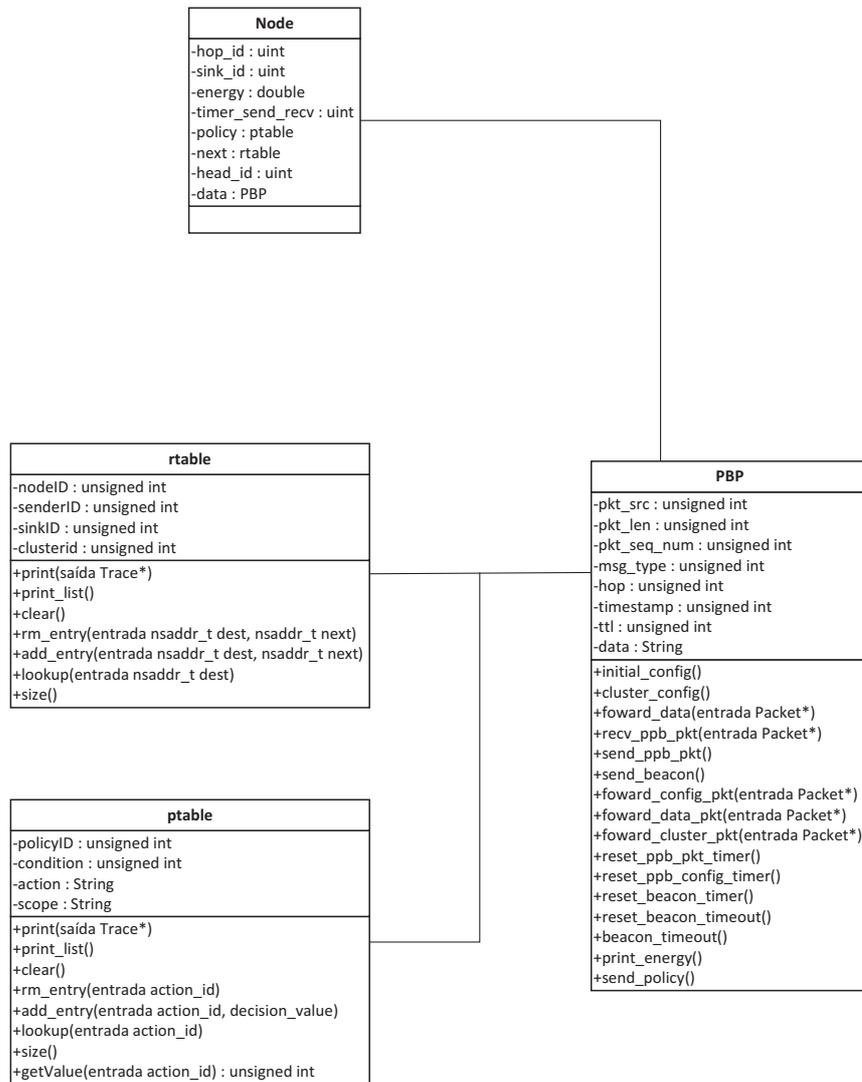


Figura 3.2: Diagrama de Classes do PBP

a identificação do nó centralizador do *cluster* e informações de geração do pacote pelo campo *timestamp*, descritas na Tabela 3.2.

Para controle da tabela de roteamento a classe *rtable* armazena e trata informações como o identificador do nó sensor, o endereço de destino e do nó coletor, descrito na Tabela 3.3.

Já a classe *ptable* trata informações referentes as políticas que serão armazenadas e utilizadas pelos nó sensor. Nela há informações como a identificação da política, as condições para utilização dessa, o que deverá ser feito caso a condição para a política seja verdadeira e onde dever ser aplicado essa política, demonstrado na Tabela 3.4. Esse funcionamento será tratado posteriormente nesse capítulo.

O diagrama de sequência da Figura 3.3 apresenta as iterações do protocolo PBP, com o coletor, nós sensores e nós sensores que atuam também como replicadores. Nele

Tabela 3.2: Informações do Pacote PBP

Campo	Descrição
pkt_src	Endereço do nó que originou o pacote
pkt_len	Tamanho do pacote (em bytes)
pkt_seq_num	Número de Sequência do pacote
msg_type	Tipo de Mensagem do pacote
hop	Número do hop
head_id	Identificador do cluster head
timestamp	Timestamp
ttl	TTL
data	Dados coletados

Tabela 3.3: Tabela de Roteamento

Campo	Descrição
nodeID	Endereço do nó
destID	Endereço do Destinatário
sinkID	Endereço do coletor
clusterID	Endereço do Cluster

Tabela 3.4: Tabela de Políticas

Campo	Descrição
policyID	Identificador da Política
condition	Condição para uso da Política
action	Ação a ser executada pela Política
scope	Local de atuação da política

são apresentadas as fases de funcionamento do protocolo, descritos a seguir.

Na primeira fase o coletor que dispara uma mensagem de inundação para configuração inicial da rede, criando o que o protocolo PEQ descreveu como árvore de saltos (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004), onde um nó sensor tem apenas informações de seus vizinhos mais próximos, sem uma visão geral da rede. A árvore é iniciada pelo coletor que envia aos seus vizinhos uma mensagem (*broadcast*) de transmissão de contador, que é incrementado a cada nó que o contador passa.

O Algoritmo de configuração inicial 1 descreve a fase de inicialização da árvore de saltos. A estrutura de dados compreende a tabela *configTable* e *routingTable*. A tabela *configTable* possui parâmetros associados aos coletores, já a tabela *routingTable* é usada como tabela de roteamento do nó sensor.

Algoritmo 1 Algoritmo de configuração inicial

```

1: //configTable (hop, sinkID, subTimeStamp);
2: //routingTable (nID, sID, sinkID, coord);
3: //Fase Inicial de Configuração
4: config.hop = 1;
5: config.sinkID = sinkID;
6: subTimeStamp = clock();
7: config.sendConfigMsg();
8: //quando um nó sensor recebe uma mensagem,
9: //ele busca na tabela configTable para ver se encontra
10: entry = configTable.get(config.sinkID);
11: if entry then
12:   //entrada existe?
13:   if entry.hop > config.hop then
14:     entry.hop = config.hop;
15:     config.hop = config.hop + 1;
16:     config.sendConfigMsg();
17:   end if
18: else
19:   // entrada não existe!!
20:   entry.sinkID = config.sinkID;
21:   entry.hop = config.hop;
22:   configTable.add(entry);
23:   config.hop = config.hop + 1;
24:   config.sendConfigMsg();
25: end if

```

Como em redes de sensores sem fio a comunicação é feita através de sinais de Rádio Frequência (RF), o PBP utiliza regras como as utilizadas no protocolo PEQ para evitar o congestionamento de mensagens oriundas de nós sensores próximos. Por exemplo, na transmissão da mensagem de inundação para criação da tabela de roteamento, um

nó sensor pode receber uma mensagem de transmissão de contador de vários sensores próximos, o que poderia ocasionar no envio de várias mensagens. Para evitar isso, ao receber a mensagem ele compara o valor recebido com o seu valor de contador. Se o esse for maior que o recebido, o nó sensor atualiza esse valor ao seu incrementado-o e transmitindo ao seu vizinho, caso contrário, o nó sensor não atualiza e não transmite esse contador.

Pode-se ter em uma rede de sensores, nós sensores que funcionam somente como replicadores de mensagens, com a unidade de sensoriamento desativada, e nós sensores, que além de coletar informações também replicam mensagens de outros nós sensores.

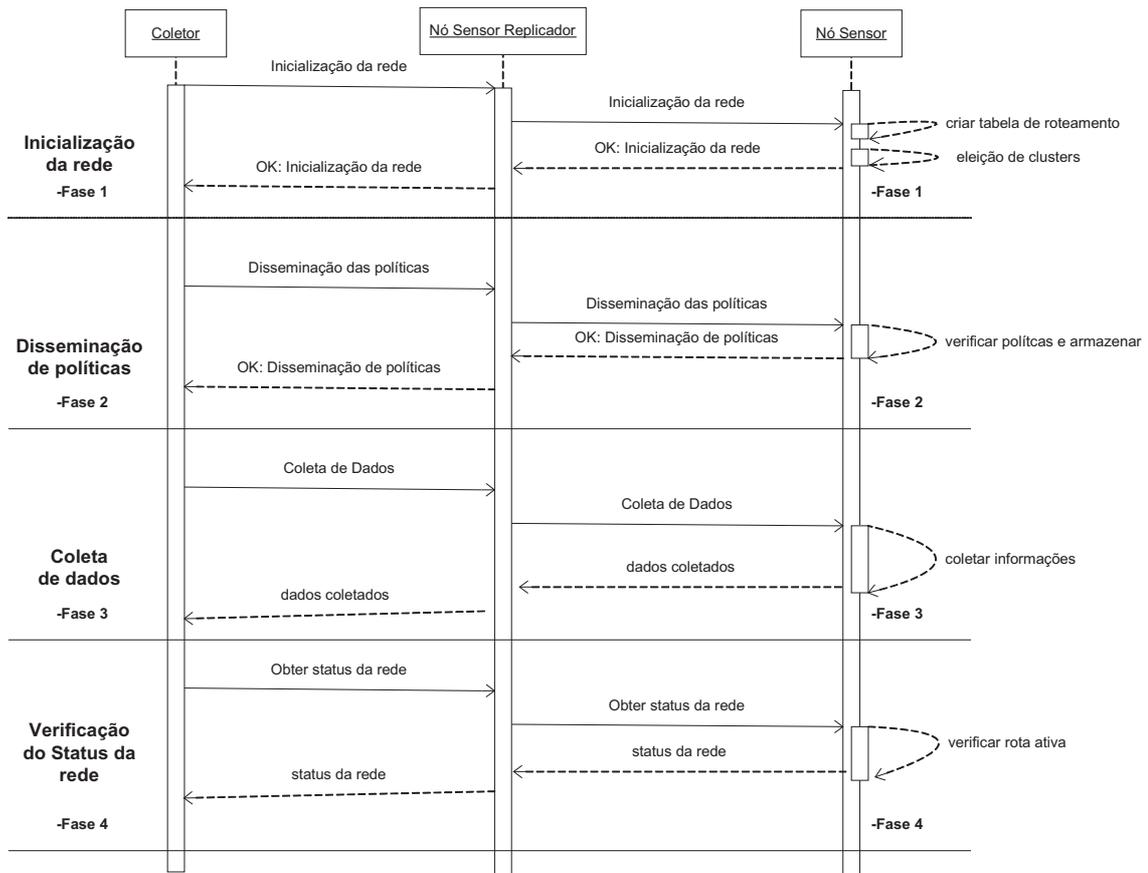


Figura 3.3: Diagrama de Sequência do PBP

Nessa fase de inicialização também acontece a criação dos *clusters* de sensores, cujo conceito é utilizado por protocolos hierárquicos como em Heinzelman et al. (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000), para disseminação de informações em grandes regiões geográficas, onde pode-se ter *clusters* atuando de formas distintas, evitando o congestionamento de toda rede com a inundação de determinadas mensagens a áreas que não tenham interesse, ilustrada na fase um da Figura 3.5.

A utilização de *clusters* de sensores tem por objetivo também a economia de ener-

gia, muito útil para RSSF com grande número de sensores e grandes regiões geográficas. O PBP possibilita a utilização ou não de *clusters*, podendo adaptar-se a vários tipos de redes.

A eleição dos *clusters* acontece na fase de inicialização de rede, utilizando sempre um nó centralizador de comunicação com o coletor chamado de *cluster-head*. Quando um *cluster-head* é eleito, ele repassa a informação aos seus vizinhos que armazenam seu endereço em sua tabela de roteamento. A Figura 3.4 ilustra a o fluxograma para formação dos *cluster-heads*. O algoritmo verifica se a rede está utilizando a opção de *cluster*, quando calcula o custo mínimo, que leva em consideração o menor número de saltos até o coletor (distância) e a energia residual do nó sensor. Este algoritmo determinará um nó sensor como *cluster-head* quando o este cálculo é o menor valor encontrado, e repassa aos demais nós sensores sua identificação aos nós sensores de sua região.

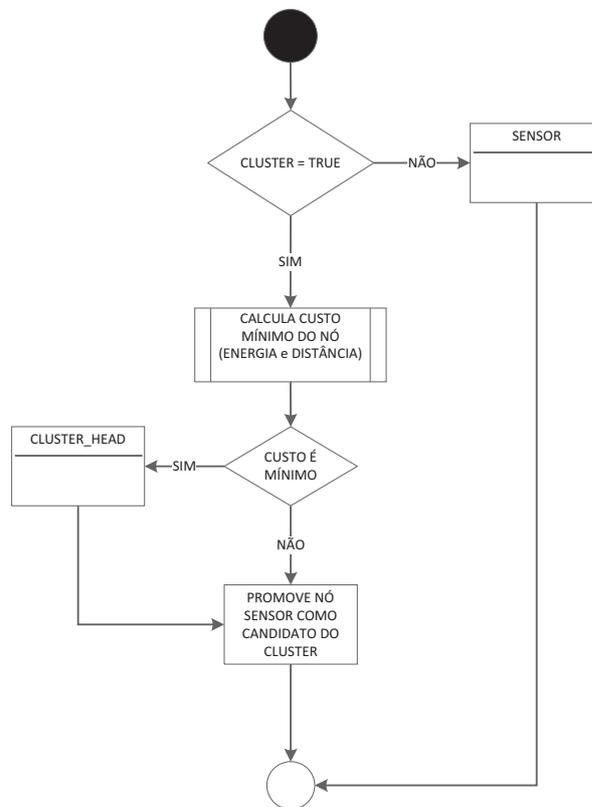


Figura 3.4: Eleição de Clusters-Heads

Logo após a configuração da topologia da rede com a criação das rotas dos sensores, inicia-se a segunda fase, onde as políticas de gerenciamento da rede são encaminhadas aos nós sensores através de mensagens pelo coletor, como demonstrada fase dois da Figura 3.5. As políticas podem ser disseminadas para toda a rede ou grupos de *clusters* específicos. O nó sensor ao receber essa mensagem verifica em sua tabela de políticas se ela existe,

então a substituí, caso contrário a nova política é inserida no repositório. Na seção 3.4 tratamos sobre as políticas de gerenciamento da rede.

Na terceira fase do diagrama há o início do processo de coleta de informações dos fenômenos observados pelos nós sensores. Os valores observados são comparados com as condições utilizadas pelas políticas e conforme os critérios utiliza a ação determinada pela por esta política, ilustrada na fase quatro da Figura 3.5.

A quarta e última fase do diagrama referem-se ao monitoramento do status da rede. Neste processo o protocolo PBP faz uma monitoração da rede para verificar se os nós sensores ainda estão ativos, podendo refazer o roteamento de dados dos sensores, ilustrado na fase três da Figura 3.5. A seção 3.5 trata esta questão de monitoração da rede, como mecanismo de tolerância a falhas.

O protocolo PBP utiliza troca de mensagens para garantir o funcionamento da rede de sensores e das informações coletadas. Com isso garante o uso eficiente de energia da rede, desta forma prolongando sua vida.

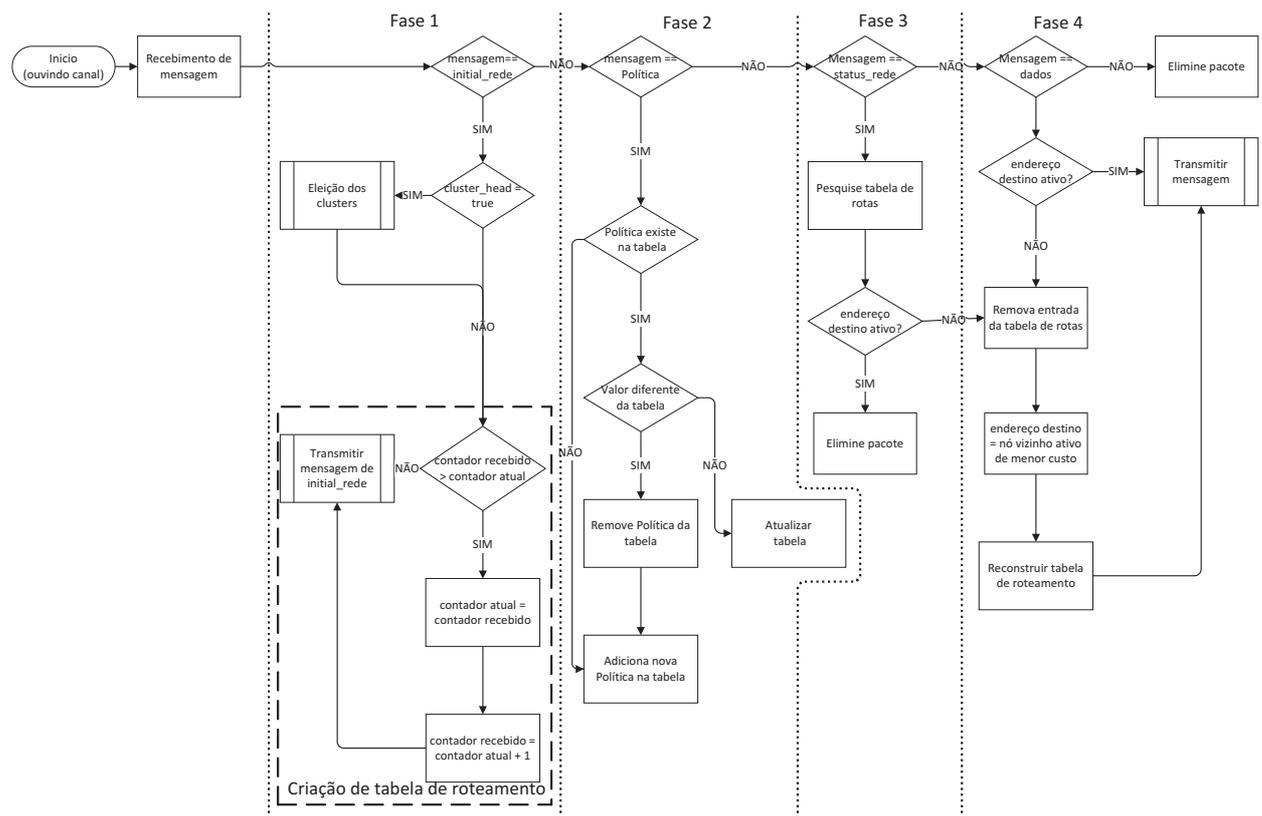


Figura 3.5: Diagrama de troca de mensagens do protocolo PBP

3.4 Políticas de Gerenciamento

Conforme já citado, políticas são regras para administrar, gerenciar e controlar os recursos de rede. O protocolo PBP utiliza o *Policy Framework Definition Language* - PFDL (Linguagem de Definição de Estrutura Política) descrito por Westerinen et al. (WESTERINEN et al., 2001) para expressar as regras de gerenciamento da rede. O PFDL expressa listas condicionais, onde os valores observados pelos nós sensores são comparados e ações sobre esses valores são atribuídas no nó sensor.

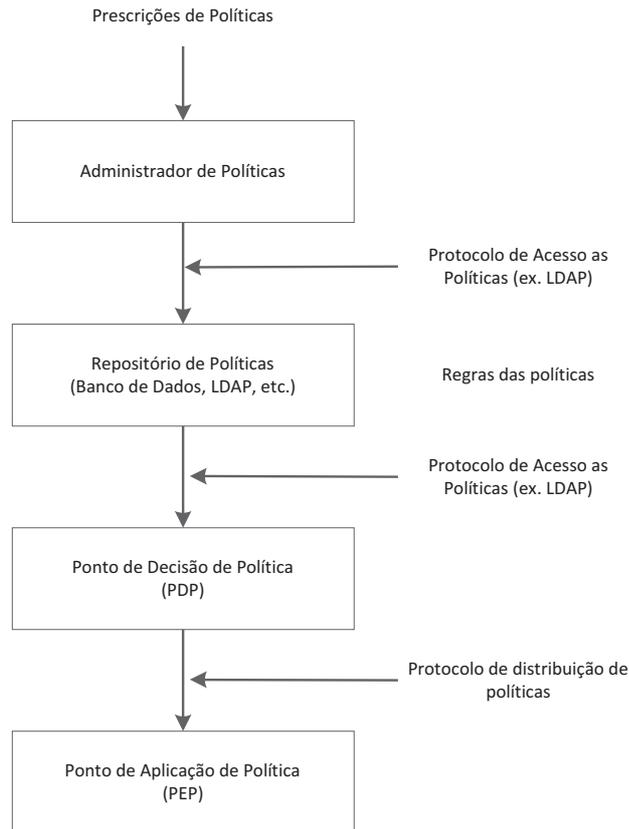


Figura 3.6: Modelo de Referência do PFDL (WESTERINEN et al., 2001)

Na Figura 3.6 observa-se o modelo de referência o qual o PBP utilizou para implantar o gerenciamento de políticas em sua arquitetura, onde as políticas são definidas pelo administrador e armazenadas em um banco de dados, para posterior distribuição pelo PDP aos nós sensores (PEP).

O PDP distribui as políticas através de mensagens, com já ilustrado na Figura 3.5, onde o nó sensor, ao receber uma mensagem identificada como de política, verifica em seu repositório a existência ou não dessa política para armazenamento.

Caso a política já exista no repositório, o PBP elimina os dados existentes e insere os novos registros, o Algoritmo 2 descreve essa funcionalidade, onde têm-se os dados de

identificação da política, a condição para uso da política que é uma instrução de decisão, a ação a ser aplicada e o escopo é o endereço no qual a política será aplicada.

As regras das políticas geralmente são condições simples que não exigem muito processamento pelos nós sensores, o que não exige maior processamento e conseqüentemente menor consumo de energia. Tais regras são formadas por:

- **Condição:** SE *valor observado* $\geq z$ E *valor observado* $\leq y$ ENTÃO
- **Ação:** *intervalo de transmissão* = tempo
- **Escopo:** LOCAL

No exemplo acima, conforme fenômenos observados, o nó sensor compara o '*valor observado*' com limites estabelecidos pelo PDP (z, y), e altera o '*intervalo de transmissão*' do transceptor entre uma mensagem e outra, dessa forma controlando de forma eficiente o consumo de energia da rede.

Outra característica importante na arquitetura proposta pelo PBP diz respeito às políticas que podem ser atualizadas dinamicamente pelo nó sensor, sem que haja interferência humana, diferente de protocolos que possuem esses valores de limites fixos na programação do nó sensor e tais alterações necessitam da intervenção humana para substituição desses limites.

Na Tabela 3.5 observa-se exemplos de regras de políticas de gerenciamento da rede de nós sensores usando a linguagem PDFL, onde o parâmetro *rainfall* refere-se a valores pluviométricos (*em milímetros*) capturados pelo nó sensor e a ação (*intervalo_transmissao*) é o tempo de transmissão (*em minutos*) do *transceptor* a ser aplicado pelo protocolo no nó sensor e que foram utilizados pelo protocolo PBP em suas simulações.

Tabela 3.5: Exemplos de Regras

Policy ID	Condition	Action	Scope
1	IF rainfall ≥ 0 AND rainfall ≤ 100 THEN	INTERVALO_TRANSMISSAO = 60min	LOCAL
2	IF rainfall ≥ 101 AND rainfall ≤ 120 THEN	INTERVALO_TRANSMISSAO = 30min	LOCAL
3	IF rainfall ≥ 121 AND rainfall ≤ 150 THEN	INTERVALO_TRANSMISSAO = 10min	LOCAL
4	IF rainfall ≥ 151	INTERVALO_TRANSMISSAO = 01min	LOCAL

Esses valores foram utilizados como base em estudos de correlação '*Chuva x Deslizamento*' (Defesa Civil, 2012) feitos pela Defesa Civil do município de Jaraguá do Sul no estado de Santa Catarina, no capítulo de Experimentos e Resultados pode-se observar esses estudos.

Os rádios de comunicação dos nós sensores contém em seu circuito integrado um dispositivo chamado de relógio de tempo real (*RTC - Rel Time Clock*), que os mantém informado sobre o tempo. Isso permite que cada nó sensor possa ser programado para realizar ações relacionadas com o tempo, tais como:

- 'Durma 1h 20 min e 15 seg, depois acordar e realizar a seguinte ação'
- 'Acorde todo dia 5 de cada mês às 00:20 e realizar a seguinte ação'

Tais ações podem ser programadas no RTC especificando o tempo em que o rádio permanecerá desligado, permitindo controle total sobre quando o rádio deve tornar a acordar.

O protocolo PBP ao se aplicar a política altera seu intervalo de transmissão e recepção através do RTC, controlando assim o estado de ligado e desligado do nó sensor. Esses estágios são controlados fazendo com que o nó sensor desligue suas funções e 'acorde' após o tempo determinado pela política. Um temporizador do RTC é utilizado para esta função que após o tempo determinado liga o nó sensor e este restabelece suas funções, passando o protocolo PBP a verificar os dados de sensoriamento, conforme demonstrado no diagrama de estado máquina finito da Figura 3.7 .

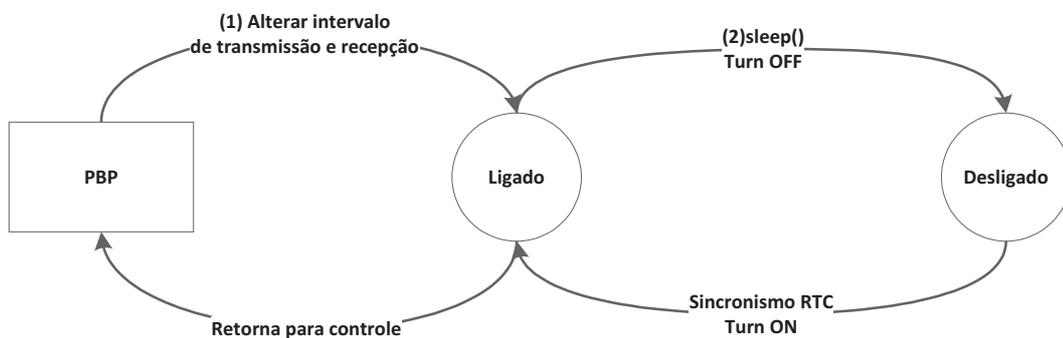


Figura 3.7: Diagrama de Estado de Máquina Finito da Unidade de Comunicação

O controle de recebimento das políticas é demonstrado pelo Algoritmo de Recebimento de Políticas 2. Ao receber a mensagem com a identificação de mensagem de política ("*policy_msg*"), o protocolo PBP verifica o escopo da política a ser aplicada, que pode ser um determinado nó sensor, um *cluster* ou ainda em toda a rede. Após identificação do escopo o protocolo trata as informações recebidas e verifica se a política recebida encontra-se em seu repositório de políticas. Em caso positivo, o protocolo elimina a política existente, entendendo que houve uma atualização da mesma e substitui pela recebida. Caso contrário insere esta política em seu repositório para posterior utilização.

Algoritmo 2 Recebimento de Mensagem de Política

```

1: myaddress  $\leftarrow$  nsaddrt;
2: myclusterid  $\leftarrow$  clusterid;
Require: receive(msg_type);
3: if msg_type == "policy_msg" then
4:   if myaddress == scope OR myclusterid == scope OR scope == NETWORK
      then
5:     //armazena os valores recebidos da mensagem no objeto policy
6:     policy.policyID = policyID;
7:     policy.condition = condition;
8:     policy.action = action;
9:     policy.scope = scope;
10:    //verifica se a política existe na tabela
11:    pid = policyTable.lookup(policy.policyID);
12:    if pid then
13:      policyTable.rm_entry(policy.policyID); // remove item da tabela
14:    end if
15:    //insere valores na tabela de políticas
16:    policyTable.add_entry(policy.policyID, policy.condition, policy.action, po-
      licy.scope);
17:  end if
18: end if

```

Em um nó sensor, o maior consumo de energia se relaciona à operação da unidade de comunicação, nos estágios de recepção e transmissão (CORREIA et al., 2005), sendo esse último o que mais consome. Trabalhando sazonalmente, verificando os eventos observados e comparando-os com as políticas, o protocolo PBP garante a eficiência energética esperada, adaptando o tempo de operação do nó sensor para garantir um melhor desempenho da rede de acordo com a especificação das políticas aplicadas pelo administrador do sistema.

Inicialmente o nó sensor passa a coletar dados, em seguida o protocolo analisa as informações observadas, verificando se os parâmetros estão dentro dos limites definidos pela política vigente. Se positivo o nó sensor aguarda o tempo necessário para transmitir, caso contrário, o protocolo altera o intervalo de transmissão e encaminha um pacote de sincronismo para o nó sensor destino de sua tabela de roteamento.

3.5 Mecanismos de Tolerância a Falhas

O protocolo PBP possui dois mecanismos de tolerância a falhas: a monitoração da rede e utilização de caminhos múltiplos. Esses mecanismos procuram minimizar os efeitos de falhas que podem ocorrer em RSSF, como fenômenos atmosféricos, interferências de

comunicação, desastres naturais e esgotamento da bateria.

- **Monitoração da rede:** o coletor utiliza de mensagens de '*status de rede*' para verificar se os nós sensores continuam ativos, dessa forma o protocolo PBP pode restabelecer possíveis falhas da rede, refazendo a tabela de roteamento dos nós sensores. Esse mecanismo pode ser acionado pelo coletor ao verificar possível falha em um nó sensor, quando não há recebimento de informações desse. Ou ainda quando detecta o baixo nível de energia em um determinado nó sensor que pode causar falha na rede, uma vez que a energia residual dos nós sensores são transmitidas, conforme descrito na Tabela 3.1. Dessa forma o protocolo controla esses intervalos de monitoramento, evitando que mensagens não necessárias sejam dissimuladas pela rede.
- **Caminhos múltiplos:** o protocolo PBP utiliza um mecanismo diferente da camada MAC para detecção de falhas em envio de mensagens. Antes de enviar uma mensagem de dados o protocolo encaminha uma mensagem do tipo ACK ao nó sensor destino de sua tabela de roteamento e fica aguardando o recebimento de sucesso da mensagem enviada através de outra mensagem do tipo ACK encaminhada pelo nó sensor destino. A falha na entrega dessa mensagem, após o intervalo de *timeout*, indica que o nó destino está inativo por algum motivo. O que pode ter ocorrido devido a uma falha na transmissão. Por isso o PBP utiliza a taxa de erro de pacotes (PER - *Packet Error Rate*), para determinar a quantidade de mensagens do tipo ACK, necessárias para verificar realmente que o nó sensor destino está inativo. Esse valor está fixado em quatro mensagens, que após o não recebimento irão excluir esse endereço da tabela de roteamento e uma eleição do vizinho mais próximo ativo como novo endereço de destino descrito no Algoritmo 3. Estudos mostram que a utilização de quadros de confirmação não influenciam no consumo de energia e latência da rede (POLASTRE; HILL; CULLER, 2004). A escolha de um valor de mensagens do tipo ACK alto, faz com que uma grande quantidade de mensagens precise ser encaminhadas até que a falha seja percebida, mas ao mesmo tempo a certeza da falha é maior, enquanto um valor baixo aumenta a quantidade de erros de retransmissão, entretanto tem-se um tempo menor para a detecção de falhas. O protocolo PBP utilizou o valor de quatro mensagens ao verificar que estudos citados por (SANKARASUBRAMANIAM; AKYILDIZ; MCLAUGHLIN, 2003) a média ficou próxima da taxa padrão de erros para o padrão de transceptores utilizados na simulação.

O protocolo PBP utiliza o Algoritmo 3 para retornar o nó sensor com o menor caminho, onde para o cálculo leva-se em consideração o número de saltos (*hop*) e a energia

Algoritmo 3 Atualizacao de Rotas

```

Require: node;
1: procedure UpdateRoute( )
2: if node == true then
3:   min(node, hop, energy); //retorna o menor caminho até o nó sensor mais próximo,
   levando em consideração o número de saltos (hop) e a energia residual (energy)
4: end if
5: end procedure
6:
7: //função para menor caminho
8: function min(node, hop, energy)
9: hmenor ← 100000; //valor alto para comparar com primeiro elemento
10: emenor ← 100000; //valor alto para comparar com primeiro elemento
11: for all node do
12:   // verifica o menor caminho para cada vizinho do nó sensor
13:   if hop < hmenor and energy < emenor then
14:     //compara os valores dos atributos recebidos dos nós sensores próximos
15:     hmenor = hop;
16:     emenro = energy;
17:     nodeid = node;
18:   end if
19: end for
20: return nodeid;
21: end function

```

residual (*energy*) dos nós sensores próximos. A função para encontrar esse caminho verifica entre os nós sensores mais próximos quais tem esses valores e retorna o endereço do nó sensor que satisfaz essas condições.

A Figura 3.8 representa a opção de múltiplos caminhos para o protocolo PBP em caso de falha. Existem duas opções de caminhos com o mesmo número de saltos até o coletor. A linha tracejada representa o caminho com maior custo energético para protocolo, ou seja, onde a energia residual do nó sensor é menor. A linha sólida apresenta o menor custo, a energia residual do nó sensor próximo é maior e por isso o protocolo PBP escolhe esse nó sensor com endereço de roteamento para seus dados, como explicado no Algoritmo 3.

3.6 Considerações Finais

Esse capítulo apresenta o protocolo PBP, um protocolo para monitoramento de eventos sazonais desenvolvido para RSSF estáticas que utiliza políticas para controlar e gerenciar a rede, com objetivos de ser tolerante a falhas e ter um baixo consumo de energia nos nós sensores. Inicia-se o capítulo mostrando na Seção 3.1 as premissas do protocolo

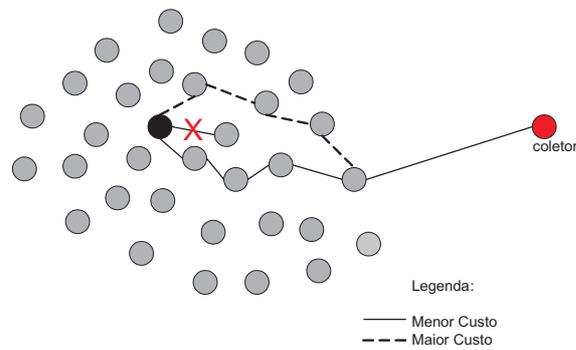


Figura 3.8: Múltiplos caminhos de rota

PBP. Essas premissas apresentam as características e tipo de rede que o protocolo opera. Em seguida apresenta-se a arquitetura do protocolo, que foi dividido em partes, sendo que a primeira representa o nó coletor, também chamado de Ponto de Decisão de Política (PDP), já a segunda representa os nós sensores, chamados também de Pontos de Aplicação de Políticas (PEP). Na Seção 3.3 apresenta-se o funcionamento da arquitetura, sua estrutura de dados e classes utilizados no PBP. Em seguida discorre-se sobre as políticas de gerenciamento, que são o diferencial do PBP em relação aos protocolos existentes para monitoramento de eventos sazonais. As políticas de gerenciamento permitem ao PBP um melhor controle e gerenciamento da rede, fazendo assim com que ele atinja seus objetivos. O protocolo implementa mecanismos de tolerância a falhas descritos na Seção 3.5. Esses mecanismos procuram contornar falhas que possam ocorrer em uma RSSF.

Capítulo 4

Experimentos e Resultados

Nesse capítulo descreve-se a investigação da avaliação de desempenho do protocolo PBP através de um conjunto de experimentos, utilizando o simulador NS-2 (FALL; VARADHAN, 2007), exhaustivamente utilizado na literatura para simulações de redes. Os resultados são comparados a outros protocolos utilizados por redes de sensores, como PEQ (BOUKERCHE; PAZZI; ARAUJO, 2004) e o protocolo LEACH (ZHANG et al., 2007) de acordo com a configuração de parâmetros utilizados em Pazzi et al. (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004).

O texto desse capítulo organiza-se da seguinte maneira. A seção 4.1 descreve o cenário das simulações. As seções seguintes apresentam os cenários das simulações e as métricas utilizadas para comparação, sendo que na seção 4.2 apresenta-se o desempenho da métrica de consumo de energia, a seção 4.3 apresenta o desempenho sob a métrica de atraso fim-a-fim. A seção 4.4 apresenta a métrica de tempo de vida do protocolo e finalmente a seção 4.5 apresenta a aplicação prática do protocolo PBP no monitoramento ambiental de Jaraguá do Sul/SC.

4.1 Descrição dos cenários das simulações e métricas

Como grande parte da comunidade científica de redes utiliza o simulador NS-2 (FALL; VARADHAN, 2007), o protocolo PBP foi desenvolvido em C e OTCL e implementado nesse simulador. O cenário da simulação apresentado é formado por uma rede de 100 nós sensores distribuídos de forma aleatória em uma área com limites definidos, esta densidade de nós sensores foi utilizado por Boukerche et al. (BOUKERCHE; PAZZI; ARAUJO, 2004) e utilizado para a comparação com o PBP.

Para que houvesse a mudança das políticas dos nós sensores foram simulados eventos para que o comportamento da rede fosse equivalente ao ambiente real em estudos do

município de Jaraguá do Sul/SC, com relação à quantidade de chuvas ocorridas durante um ano, ou seja, a duração da simulação foi equivalente a 365 dias.

Os valores dos intervalos utilizados pelas políticas no experimento foram definidos por técnicos da Defesa Civil do município de Jaraguá do Sul (Defesa Civil, 2012), através de estudos com índices de correlação chuva x deslizamentos de solos, conforme demonstrados na Figura 4.1. Esses parâmetros foram utilizados no cenário de simulação avaliado.

NÍVEL	CHUVA ACUMULADA (72h) mm		OCORRÊNCIAS
	de	a	
NORMALIDADE	0	100	Baixa possibilidade da ocorrência de deslizamentos, possibilidade da ocorrências de pequenos deslizamentos de terra/rocha localizados.
ATENÇÃO	101	120	Grande possibilidade da ocorrência de escorregamentos localizados e pontuais, podendo ser agravado nas áreas de riscos.
ALERTA	121	150	Grande possibilidade da ocorrência de escorregamentos de média proporção, podendo ser agravado nas áreas de riscos.
ALERTA MÁXIMO	acima de 151		Grande possibilidade da ocorrência de grandes escorregamentos com alto poder de destruição, principalmente nas áreas de riscos mapeadas.

Figura 4.1: Estudo de correlação Chuva x Deslizamento (Defesa Civil, 2012)

Os rádios transmissores utilizados nas simulações utilizam o padrão IEEE 802.15.4 com capacidade de transmissão de até 38,4 Kbps e com raio de alcance de 108 metros, com frequência de 914 MHz. A mobilidade não foi considerada nos cálculos de consumo de energia dos protocolos analisados PEQ (BOUKERCHE; PAZZI; ARAUJO, 2004) e LEACH (ZHANG et al., 2007), uma vez que torna o protocolo complexo e com um custo energético maior para a rede. Na Tabela 4.1 descreve-se os parâmetros de simulação utilizados para as comparações realizadas baseados nas mesmas configurações utilizadas para avaliação do protocolo PEQ e LEACH.

Todos os protocolos foram testados com os mesmos parâmetros, para simular o mesmo cenário. Para chegar aos resultados apresentados foram realizadas em média de 15 simulações com sementes diferentes, que devido ao período de simulação gerou um grande volume de dados para análise, um dos problemas citados pela comunidade acadêmica em relação ao simulador NS-2 (FALL; VARADHAN, 2007).

As métricas analisadas para comprovar a eficiência do PBP foram a energia consumida, o atraso de entrega de pacotes, número de pacotes descartados e tempo de vida da rede. A seguir apresenta-se os cenários utilizados para comparar as métricas estabelecidas para avaliação do protocolo proposto.

O protocolo PEQ utilizou valores de limites determinados no nó sensor, comportando-se conforme os valores observados e transmitindo informações a cada trinta minutos se

Tabela 4.1: Parâmetros de Simulação (BOUKERCHE; PAZZI; ARAUJO, 2004)

Parâmetros	Valores
Topologia	nós sensores distribuídos aleatoriamente
Tamanho da Topologia (m)	1000 x 1000
Tempo de Simulação (s)	10.000
Número de Nós	100
Modelo de Propagação de Rádio	Two Ray Ground
Tipo MAC	IEEE 802.15.4
Alcance do Rádio (m)	108
Energia inicial do nó sensor (W)	1000
Energia para Transmissão (mW)	14,8800
Energia para Recepção (mW)	12,5000
Dissipação em repouso (mW)	12,3600
Dissipação em dormência (mw)	0,0160

houvesse necessidade. O protocolo LEACH atuou criando *clusters* de sensores entre os nós e transmitindo informações observadas conforme a medida que leitura dos eventos acontecessem e transmitindo informações a cada trinta minutos.

4.1.1 Cenário I

Nesse cenário de simulação os dados foram divididos em 52 partes, relacionando a semanas, em analogia a um ano de informações. Dessa forma o protocolo PBP atuou durante 32 semanas com o uso da política para o estado normal do fenômeno observado. Após houve mudança dos fenômenos observados, alterando a política dos nós sensores, atuando durante 16 semanas em um estado de atenção, por fim observou a transição de aplicação das políticas para um período de crítico do evento observado durante as quatro últimas semanas. Essa simulação foi feita com leituras reais de ocorrências de precipitação no município de Jaraguá do Sul/SC e a operação de sazonalidade do protocolo, agindo com as políticas descritas a seguir:

- Política de Estado Normal: está política é utilizada quando os fenômenos observados mantém seus padrões estáveis, conforme valores obtidos na Figura 4.1. Nessa política o protocolo PBP faz com que o período de transmissão seja de uma hora, fazendo com que os nós sensores entrem em estado de dormência para economizar energia.
- Política de Estado de Atenção: com está política o protocolo PBP faz com que

o período de transmissão dos nós sensores seja a cada trinta minutos, conforme a leitura dos dados dos fenômenos observados.

- Política de Estado Crítico: nessa política o PBP opera transmitindo informações a cada um minuto, entrando no estado de alerta máximo, tendo seu maior consumo de energia.

4.1.2 Cenário II

No segundo cenário realizou-se simulações com o protocolo PBP sem atualização da política durante o tempo de funcionamento. O protocolo fez uso durante todo tempo de simulação com a política de normalidade (intervalos de transmissão de uma hora), gerando informações para análise. Em seguida o experimento foi repetido utilizando a política para sensoriamento em estado crítico (intervalos de transmissão de minuto em minuto).

4.2 Resultados obtidos

Para avaliar o desempenho do protocolo PBP, apresenta-se os resultados das simulações realizadas com os protocolos PEQ (BOUKERCHE; PAZZI; ARAUJO, 2004) e o protocolo hierárquico LEACH (ZHANG et al., 2007). As seguintes métricas foram utilizadas para avaliar o protocolo PBP:

- Energia Consumida: provê informações sobre o gasto de energia nos nós sensores no decorrer do tempo de simulação. Essa métrica é importante para comprovar a eficiência energética do protocolo.
- Atraso fim-a-fim: é a latência da leitura do evento até a chegada do pacote no coletor, está é outra métrica importante utilizada para verificar o comportamento do protocolo durante a simulação.
- Taxa de Entrega dos pacotes: é relação entre os pacotes gerados pelos nós sensores e os pacotes recebidos pelo coletor.
- Tempo de vida da rede: essa métrica apresenta o tempo de atividade da rede de nós sensores em relação aos fenômenos observados, comprovando assim a eficiência do protocolo.

4.2.1 Métrica de Energia Consumida

A primeira métrica a ser avaliada foi a energia consumida, particularmente importante para RSSF, já que o fator energia é primordial para a vida útil da rede. O grande diferencial do PBP, como já citado, é a utilização de políticas para o gerenciamento dos tempos de transmissão dos eventos observados, já que o consumo de energia é maior entre os componentes do nó sensor (CORREIA et al., 2005).

Inicialmente foi realizado o experimento utilizando o Cenário I, comparando os valores do PBP com os demais protocolos citados.

A Figura 4.2 demonstra os resultados da simulação da métrica de energia consumida pelos diferentes protocolos. A curva resultante do protocolo PBP apresenta os valores com limites inferiores e superiores de intervalo de confiança e a linha de tendência calculada pela regressão linear dos valores.

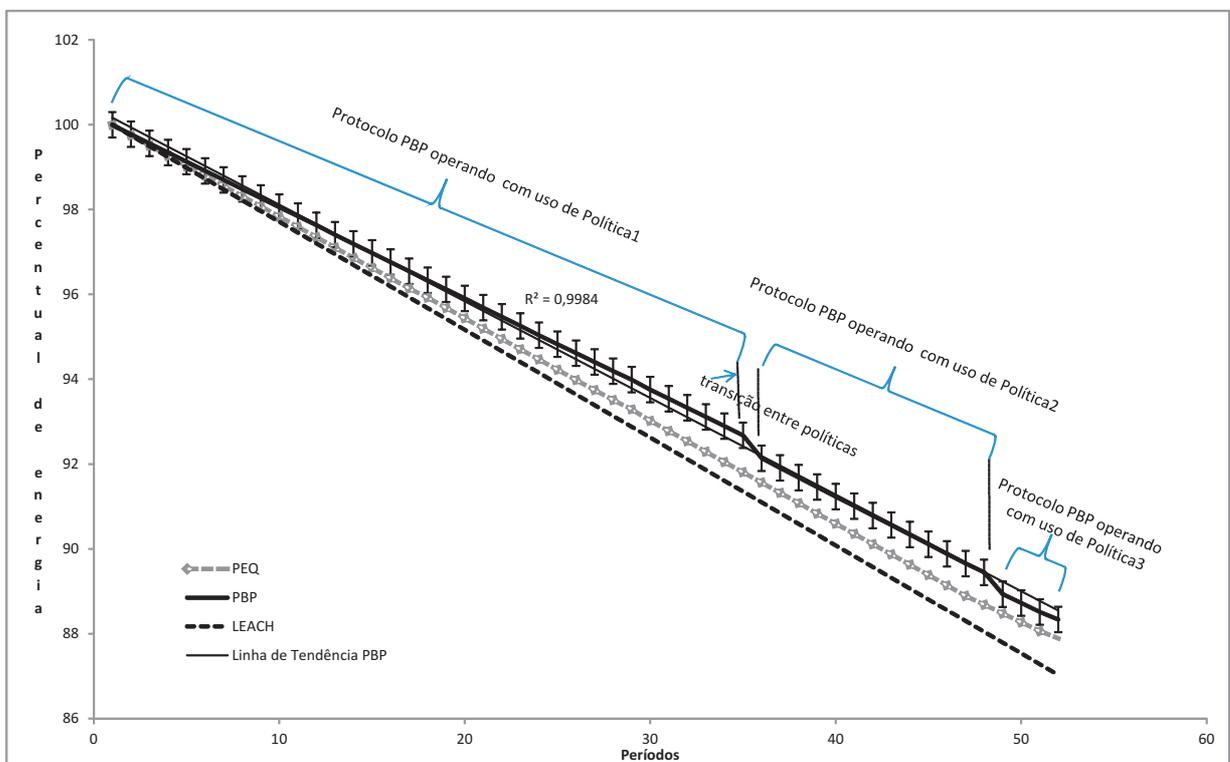


Figura 4.2: Comparação da Métrica de Energia Consumida - Cenário I com mudanças de políticas durante a simulação

Essas curvas mostram claramente que o protocolo proposto tem o menor consumo de energia ao longo do tempo, mesmo considerando a troca de políticas que seria a parte de maior custo no consumo de energia. Na Figura 4.2 verifica-se a transição das políticas encaminhadas pelo administrador durante a simulação, se essas estivessem armazenadas nos nós sensores, não haveria tanto gasto como o apresentado. O protocolo PBP apre-

sentou um acréscimo de 16,84% na vida útil da rede em relação aos demais protocolos avaliados.

No Cenário II realizou-se simulações com o protocolo PBP sem atualização da política durante a simulação para verificar a possibilidade do protocolo trabalhar em tempo real. Na Figura 4.5, a linha PBP- representa o uso de política para o estado normal, transmissões acontecem em períodos de uma hora, e a linha PBP+, da Figura 4.4, representa a política de estado crítico para o sensoriamento, com períodos de transmissão a cada minuto. Para a verificação dos melhores resultados alcançados pelo PBP, utilizamos o modelo ANOVA (MAGALHÃES; LIMA, 2002) com o teste de variância de energia dos protocolos deste experimento e utilizamos o padrão Levene (Tabela 4.2), para verificar o desempenho dos protocolos. Esse modelo é empregado quando é necessário comparar três ou mais valores, e permite estabelecer se os valores em estudo são, ou não, estatisticamente iguais através do teste de variância.

Tabela 4.2: Dados do processo do Teste de Variância

<i>Informação</i>	<i>Valor</i>
Levene (estatística do teste)	0,529639470551
Graus de Liberdade	2
P-valor	0,9904013873382

Na Tabela 4.3 pode-se observar os valores obtidos de energia consumida (em joules) para os limites inferiores, superiores e desvio padrão dos resultados simulados e percebemos que o protocolo PBP teve um melhor rendimento sobre os demais em relação a métrica Energia Consumida, comprovando assim a validade da utilização de políticas para controlar os intervalos de transmissão.

Tabela 4.3: Intervalos de Confiança para o Desvio padrão

<i>Fator</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite Superior</i>
LEACH	35,74109686	36,39291489	37,06729059
PBP	31,39265543	31,96517001	32,55749777
PEQ	35,04035914	35,67939766	36,34055159

Verifica-se que o P-valor da Tabela 4.2 é menor que o nível de significância escolhido de 1%, portanto os valores não apresentam igualdades e o protocolo PBP apresenta os menores valores de consumo de energia, na Figura 4.3 apresenta-se o intervalo de confiança para o desvio padrão gerado pelos testes realizados pelo software R (TEAM et al., 2008), que demonstra este melhor resultado pelos estudos.

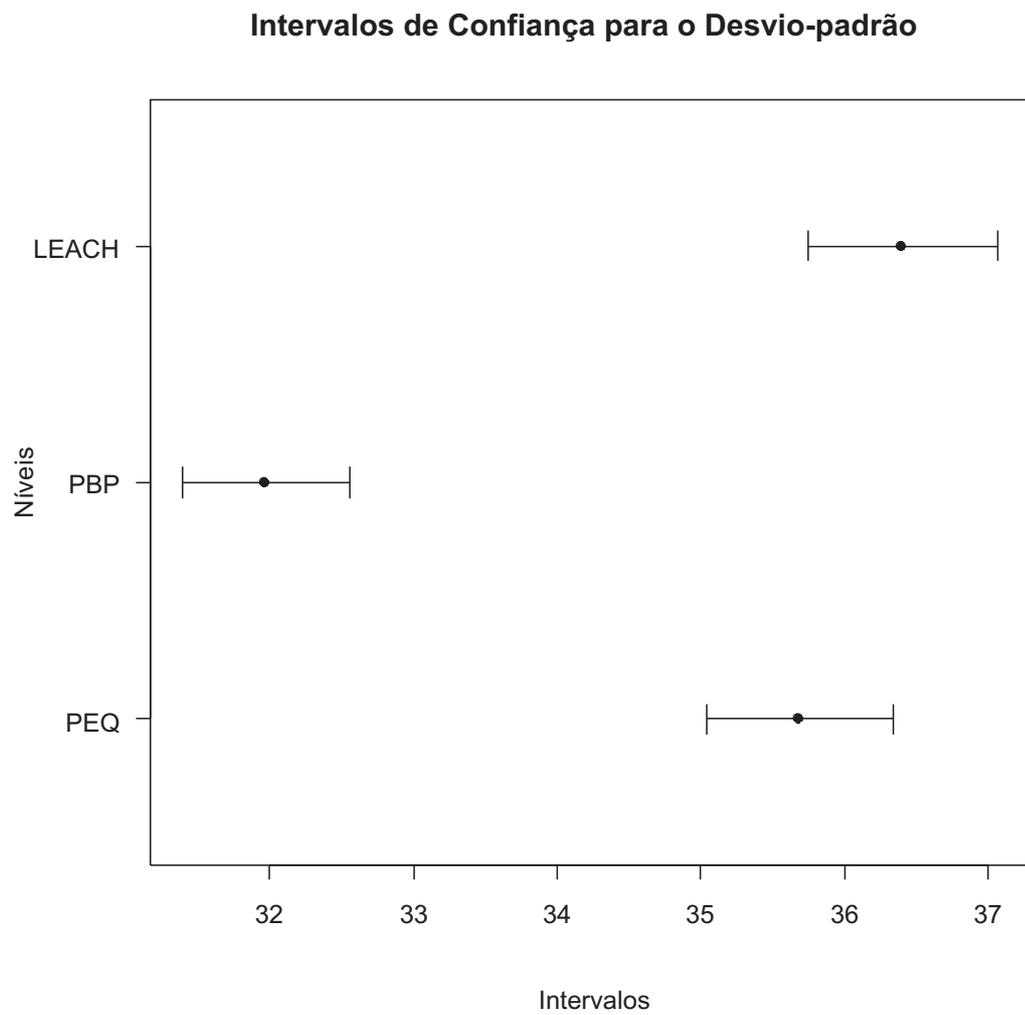


Figura 4.3: Intervalos de Confiança

A Figura 4.4 apresenta o consumo de energia dos nós sensores em relação ao período de tempo em segundos, apresentando o protocolo PBP com melhor desempenho, tanto na análise dos valores em estado crítico (PBP+), com transmissões a cada minuto. Mesmo com o protocolo utilizando a política que utiliza o maior consumo de energia, o PBP apresentou um resultado melhor que os demais, aumentando o tempo de vida útil da rede em 12,28%.

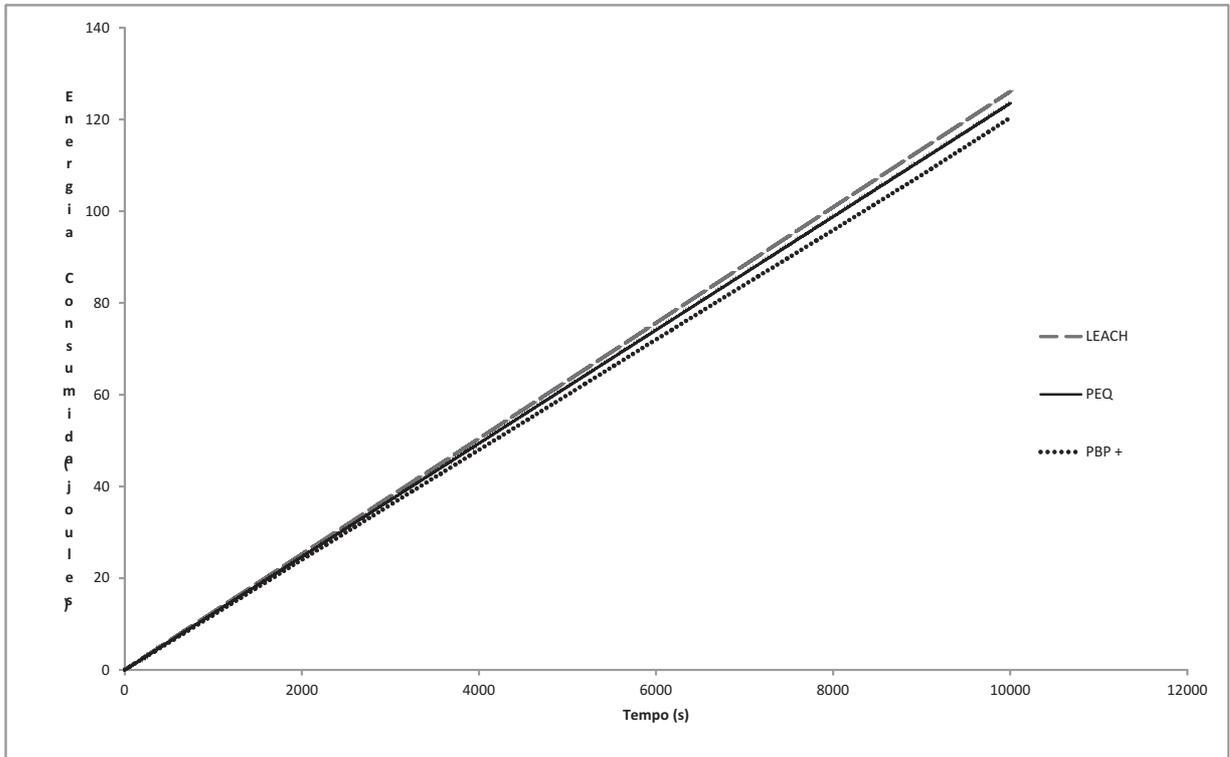


Figura 4.4: Energia Consumida com protocolo PBP - Cenário II atuando estado crítico

Na Figura 4.5 observa-se o protocolo PBP, com uso de política para eventos de normalidade onde o tempo de transmissão é maior, isso faz com que o rádio transmissor entre no estado de dormência por tempo determinado fazendo que a rede economize energia. Esse experimento fez com que o protocolo apresentasse uma eficiência energética de 35% na média sobre os demais protocolos utilizados nos testes. A utilização da estratégia de política é o grande diferencial do protocolo PBP, provando que pode ser utilizado no uso de redes de sensores sem fio para monitoramento de eventos sazonais e também o qualificando para uso em tempo real.

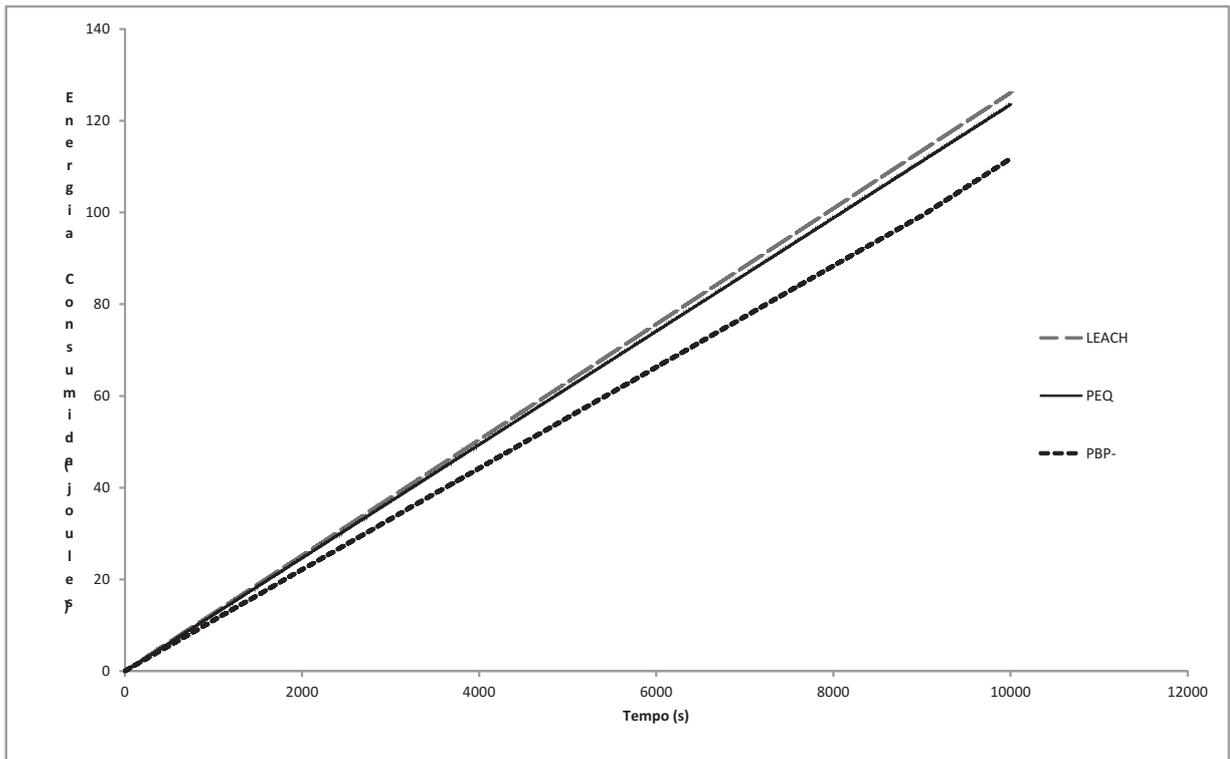


Figura 4.5: Energia Consumida com protocolo PBP - Cenário II atuando estado normal

4.2.2 Métrica de Atraso fim-a-fim

Outra métrica importante utilizada para verificar o comportamento do protocolo durante a simulação foi latência da leitura do evento até a chegada do pacote no coletor, chamadas aqui de "atraso fim-a-fim". O protocolo PBP apresentou uma média de 0,2347 segundos, estando dentro da margem de erro padrão da média do protocolo PEQ, contra 0,29094 do protocolo LEACH, conforme observamos na Figura 4.6.

O protocolo PBP apresentou o melhor desempenho com um percentual de 29% de ganho em relação ao total da média de atraso fim-a-fim dos demais protocolos nesta métrica.

4.2.3 Métrica de Taxa de entrega dos pacotes

O PBP apresentou resultado semelhante aos protocolo PEQ em relação a taxa média de entrega de pacotes apresentando um percentual de 99,99944%, provando que o protocolo assegura a garantia de entrega das informações que podem ser primordiais para o objetivo proposto. Na Figura 4.7 pode-se observar esses valores e verificar os resultados dos demais protocolos. Essa taxa é obtida pela quantidade de pacotes gerados e o pacotes

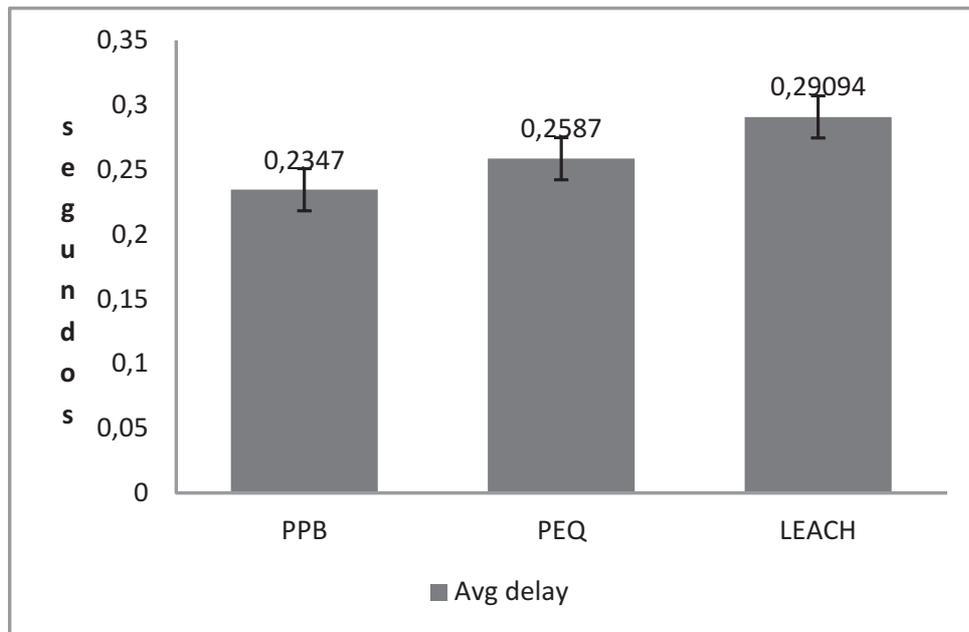


Figura 4.6: Média de atraso fim-a-fim

que foram entregues.

O protocolo PBP também apresentou uma baixa relação de pacotes eliminados, mostrando um rendimento de 0,06% contra 0,10% do protocolo PEQ e 0,13% do LEACH, em relação aos pacotes eliminados com total aos pacotes gerados pelos protocolos. A Figura 4.8 apresenta os resultados dos dados simulados e comprovando a eficiência do protocolo PBP em relação aos protocolos avaliados pelos testes.

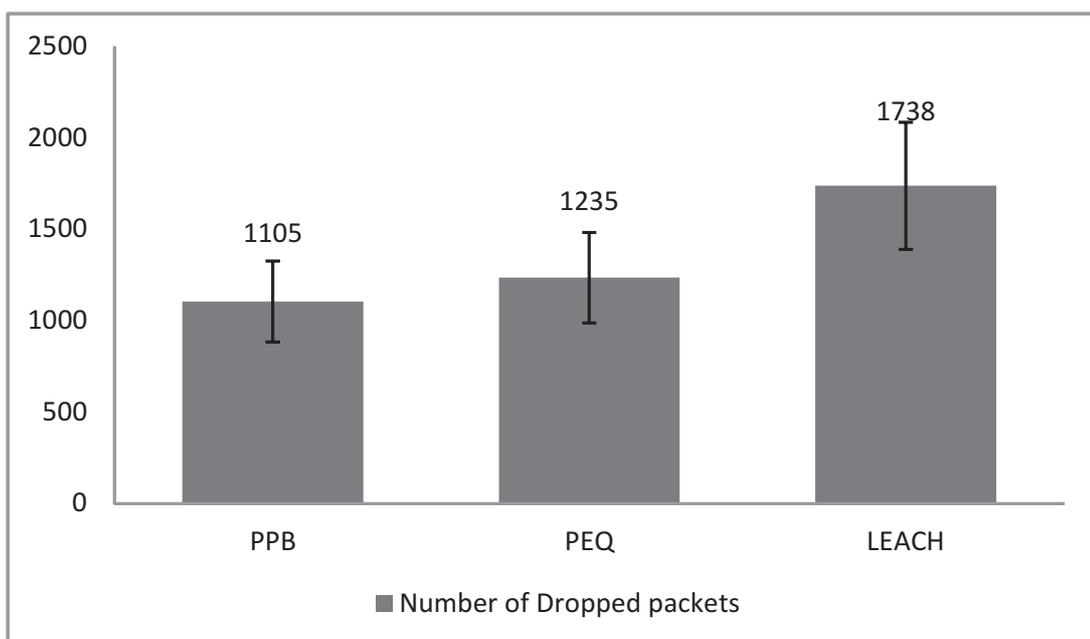


Figura 4.8: Número de Pacotes eliminados

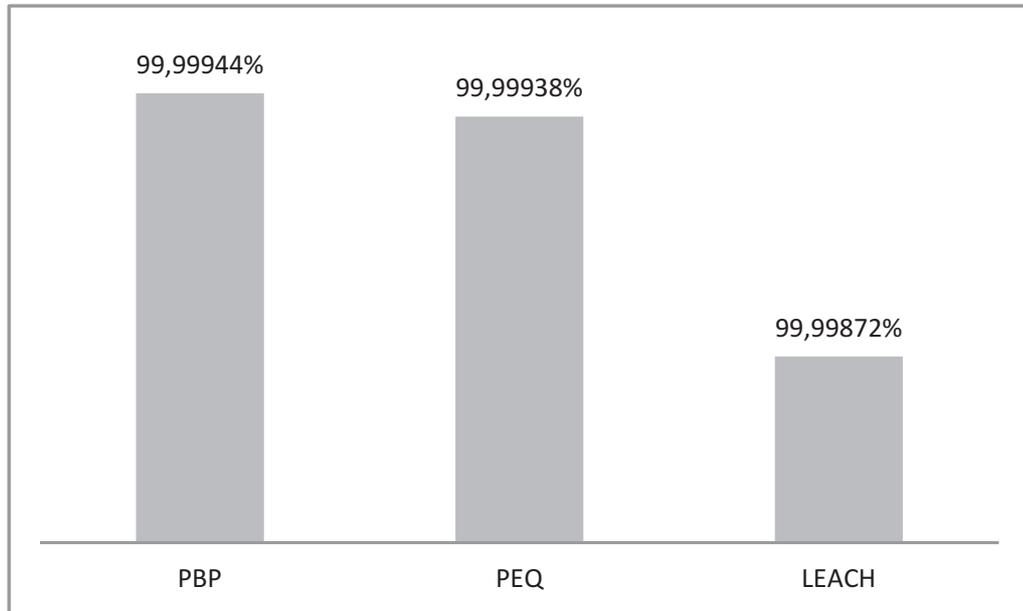


Figura 4.7: Taxa Média de Entrega de pacotes

4.2.4 Métrica de tempo de vida da rede

Essa métrica comprova a eficiência energética dos protocolos testados, demonstrando a vida útil das redes de sensores sem fio em um período de tempo. Para essa simulação foram utilizados parâmetros da Tabela 4.1, alterando os itens energia inicial do nó sensor e o tempo de simulação que foi utilizado os valores de 100 joules e 12.000 segundos respectivamente, devido ao tamanho do arquivo de *trace* do simulador NS-2.

Na Figura 4.9 observa-se os valores de tempo de vida dos nós sensores dos protocolos avaliados. O protocolo PBP apresentou melhor desempenho em relação aos demais protocolos avaliados. Em relação ao protocolo PEQ o ganho do tempo de vida da rede foi de 25%, já em relação ao protocolo LEACH foi de 33,33%.

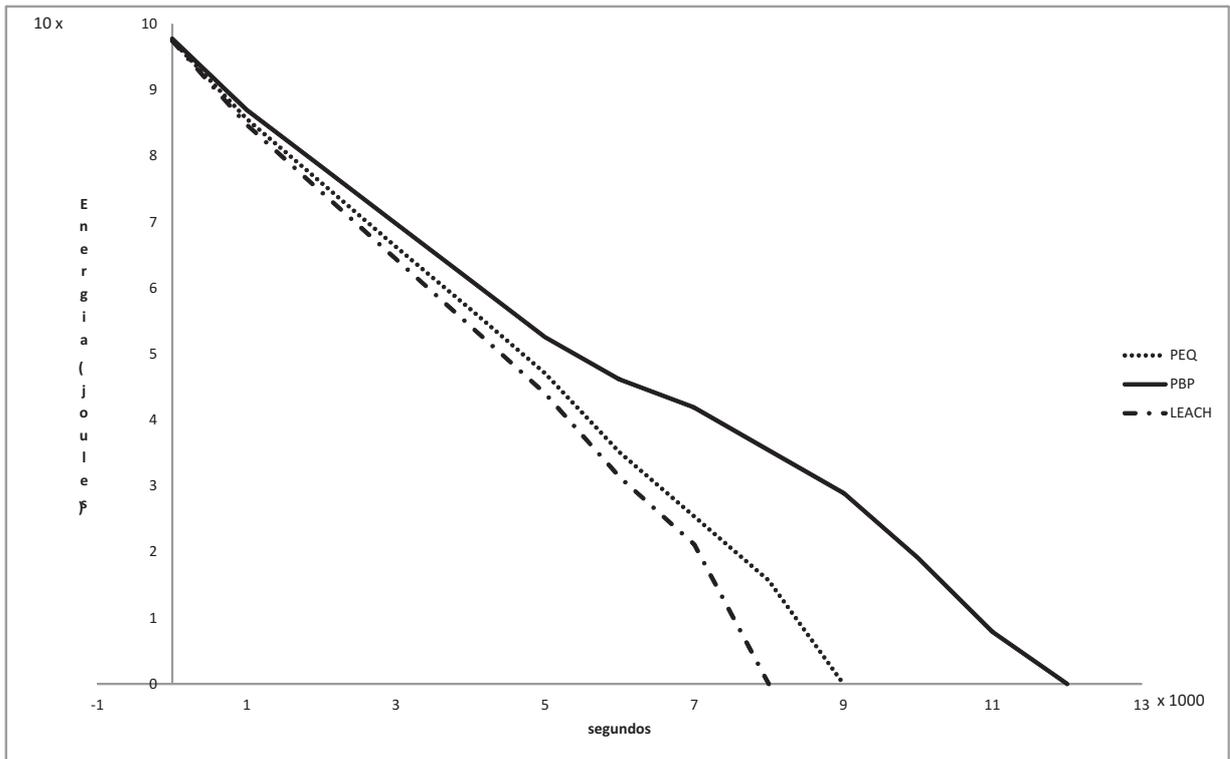


Figura 4.9: Análise do tempo de vida da rede de sensores

4.2.5 Conclusão

Esse trabalho descreve o protocolo PBP como Protocolo Baseado em Políticas para redes de sensores sem fio, proposto para o controle eficiente de energia de uma RSSF, prolongando assim a sua vida útil. A avaliação do protocolo foi realizada utilizando um estudo de caso onde os nós sensores fazem leitura de valores pluviométricos, que interferem nos valores do nível de umidade de encostas, que é um dos fatores de deslizamento por saturação do solo. Métricas como: consumo de energia, latência, perda de pacotes e tempo de vida útil da rede foram utilizadas nas comparações entre os demais protocolos e o protocolo proposto PBP. O PBP apresentou o melhor resultado comparado aos protocolos analisados. A baixa latência dos eventos observados e entregues ao coletor também provou que o PBP pode ser utilizado para tais situações de monitoramento crítico, uma vez que apresentou também o menor valor comparado aos demais e também o tornando apto para monitoramento de eventos em tempo real.

4.3 Aplicação prática do PBP

Devido ao relevo da cidade e a proximidade ao mar, Jaraguá do Sul têm sofrido com altos índices de precipitações. Em meados de 2008 a região sofreu um grande desastre climático, ocasionado 11 mortes na cidade, por deslizamento de encostas causadas devido as chuvas. Toda a cidade ficou devastada pela enchente dos principais rios da região. Surgiu então a proposta com essa dissertação de desenvolver um protocolo para monitoramento ambiental crítico, que operasse sazonalmente e baseado em políticas, a ser utilizado na cidade, capturando valores pluviométrico das bacias hidrográficas do município, monitoramento das principais encostas que oferecem riscos de deslizamento e níveis de rios da região. Tal proposta foi apresentada a Secretaria de Defesa Civil do Município, que prontamente aderiu à ideia desse trabalho.

Foi realizado um convênio com a Prefeitura Municipal de Jaraguá do Sul para aquisição de sensores e rádios transmissores para utilização do protocolo, que coletará informações e alimentará um sistema de monitoramento ambiental que será controlado por técnicos da Defesa Civil, para possíveis tomadas de decisão. Dessa forma antecipando ações que possam causar mais estragos a região e até perda de vidas.

Os equipamentos utilizados foram adquiridos da empresa Libelium (LIBELIUM, 2012a), uma *startup* da Universidade de Zaragoza na Espanha. Foram adquiridos os sensores e os rádios comunicadores para transmissão dos dados obtidos. Os rádios operam na faixa de 900MHz, e pode ser programados e configurados para serem utilizados com qualquer protocolo de roteamento, e várias universidades utilizam em projetos de pesquisa (LIBELIUM, 2012b).

O projeto encontra-se em fase de configuração e instalação dos sensores (Figura 4.10). Os locais de instalação foram definidos por técnicos da Defesa Civil. O protocolo PBP foi implantado e os testes iniciais estão sendo realizados em campo. No decorrer desta seção apresenta-se os sensores utilizados pelo projeto.

4.3.1 Sensores Pluviométricos e de Velocidade do Vento

A estação meteorológica da Libelium é composta por um pluviômetro, um anemômetro e uma palheta que aponta a direção do vento. Os sensores são dispostos em uma haste que são instaladas nos locais para coleta das informações, conforme ilustrado na Figura 4.11. No projeto serão utilizados 18 sensores pluviométricos espalhados pelas bacias hidrográficas do município para coleta das informações. Esses sensores serão instalados em postes em áreas definidas e mapeadas pela Defesa Civil.



Figura 4.10: Instalação dos sensores



Figura 4.11: Estação Metereológica Libelium

4.3.2 Sensores de Umidade

Um dos principais problemas em nossa região é o deslizamento de terra em encostas. Esses problemas acontecem devido a característica da região, que fica sobre a área de Mata Atlântica, onde o solo está depositado sobre rochas e a grande quantidade de chuva, faz

com que esse solo acabe se deslocando da rocha. Os sensores medirão a quantidade de umidade em áreas selecionadas por técnicos da Defesa Civil, determinadas como críticas. Para essas medidas serão utilizados três sensores em diferentes profundidades para ter-se a medida precisa de umidade do solo, conforme Figura 4.12, onde vemos a utilização e o sensor de umidade.

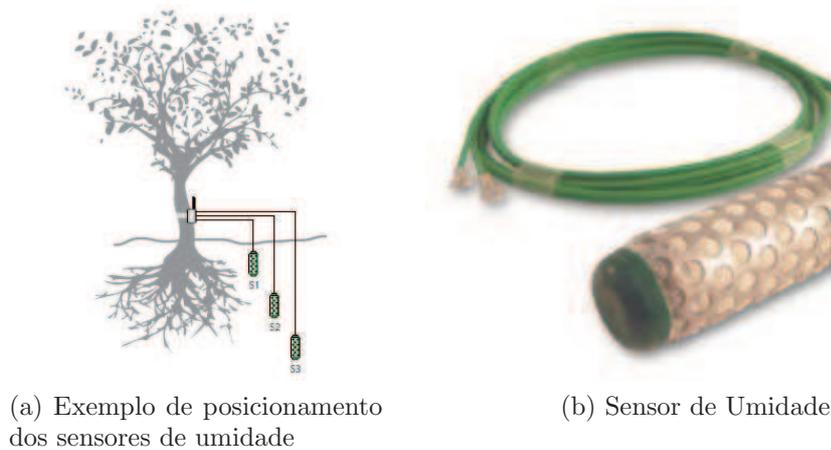


Figura 4.12: Configuração do Sensor de Umidade

4.3.3 Sensor de Nível de Rio

Utiliza-se no projeto sensores que medem força ao invés de utilizarmos sensores do tipo sonar para medir o nível dos rios da região. Em sensores do tipo sonar qualquer objeto que fique sobre este sensor pode gerar um valor falso. Os sensores de força utilizam a Fórmula 4.1 para calcular a força peso através do produto entre a massa do corpo e a aceleração da gravidade.

$$\vec{P} = m\vec{g} \quad (4.1)$$

Na Figura 4.13 observa-se o exemplo de medição de um reservatório de água, que quando vazio ele possui uma massa e conforme o reservatório vai ficando cheio ele obtém outro valor. O sensor é pressionado em um bloco de concreto que fica submerso no rio, e mede a massa de água sobre ele, assim tendo um valor mais preciso, pois ele estará no leito do rio em uma área livre de entulhos.

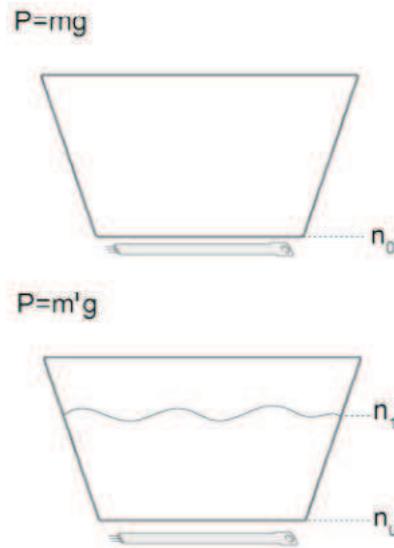


Figura 4.13: Metodologia de medição de nível de rio

4.3.4 Placa de Leitura dos Sensores

Para leitura dos valores dos sensores é utilizado uma placa desenvolvida pela empresa Libelium (LIBELIUM, 2012a), que possui interface para os sensores utilizados. Essa placa utiliza os sinais analógicos e digitais obtidos pelos sensores para gerar informações para serem transmitidas pelo rádio transmissor que fica acoplada a ela. Na Figura 4.14 podemos observar o *layout* da placa com os conectores dos sensores que ela pode suportar.

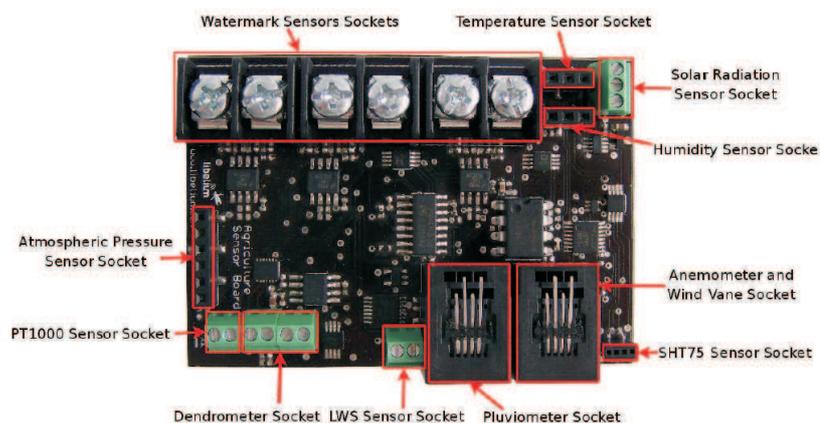


Figura 4.14: Placa de leitura de dados dos sensores

4.3.5 Rádios Transmissores/Receptores

Foi utilizado rádios XSC de 900MHz de frequência (INTERNATIONAL, 2012), que segundo fabricante tem 12Km de alcance do sinal, utilizando informação da intensidade do sinal recebido (RSSI) para controle do sinal, e com uma sensibilidade de até -106dBm, ou seja, sinais de baixa potência. Os equipamentos possuem cartão de memória tipo micro SD para armazenar informações coletadas e as tabelas de roteamento e políticas.



Figura 4.15: Rádios Transmissores

4.3.6 Coletores

Foi utilizado o coletor Libelium que será utilizado como coletor, responsável por capturar todos os eventos transmitidos pelos nós sensores e armazenar estas informações em um banco de dados externo. Há dois equipamentos que serão instalados no município que coletaram informações de nós sensores dentro de seu alcance e gravaram os dados em um banco de dados que será espelhado por estes dois coletores, tendo assim uma redundância das informações em caso de problemas que possam acontecer. Esses coletores possuem conexão LAN, e podem ser acessados para gerenciar a rede e enviar informações aos nós sensores, como as políticas de gerenciamento de dados. Na Figura 4.16 pode-se observar o coletor descrito nesta seção.



Figura 4.16: Coletores

4.4 Resultados Preliminares

Foi realizado testes preliminares com os equipamentos adquiridos e o protocolo PBP. Os nós sensores são equipados com baterias Li-Íon de 2300 *mAH* e na Tabela 4.4 pode-se verificar o consumo de energia nos estágios de operação.

Tabela 4.4: Valores de Consumo dos Sensores

Estágio	Consumo
Transmissão e Recepção	9mA
Dormência	0,7 μ A

Os parâmetros observados foram o nível de um rio, índice pluviométrico e velocidade do vento. Ainda existem ajustes a serem feitos em relação aos sensores e o consumo de energia dos mesmos. Por exemplo, o protocolo PBP está fazendo com que o transmissor entre em estado de dormência, mas os sensores continuam ativos. Está sendo realizadas alterações para que os sensores também entrem em estado de dormência.

Como a intenção desses testes preliminares são verificar o comportamento dos sensores e dos valores observados utilizou-se uma política que transmite as informações a cada trinta minutos, e foram coletadas informações de trinta e um dias desse experimento.

Na Figura 4.17 observam-se os valores do nível de energia da bateria apresentado pelo nó sensor, esse valor é retornado pelo sensor em forma de percentual.

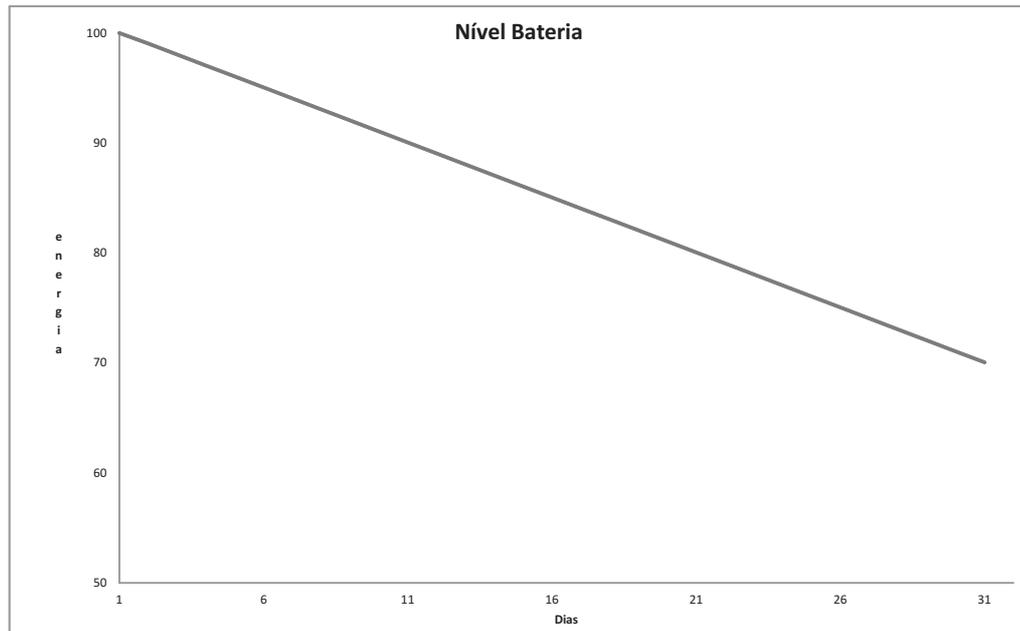


Figura 4.17: Coletores

Na Figura 4.18 observam-se os valores do sensoriamento do nível de rio, esses valores foram obtidos por experimento em um tanque com água.

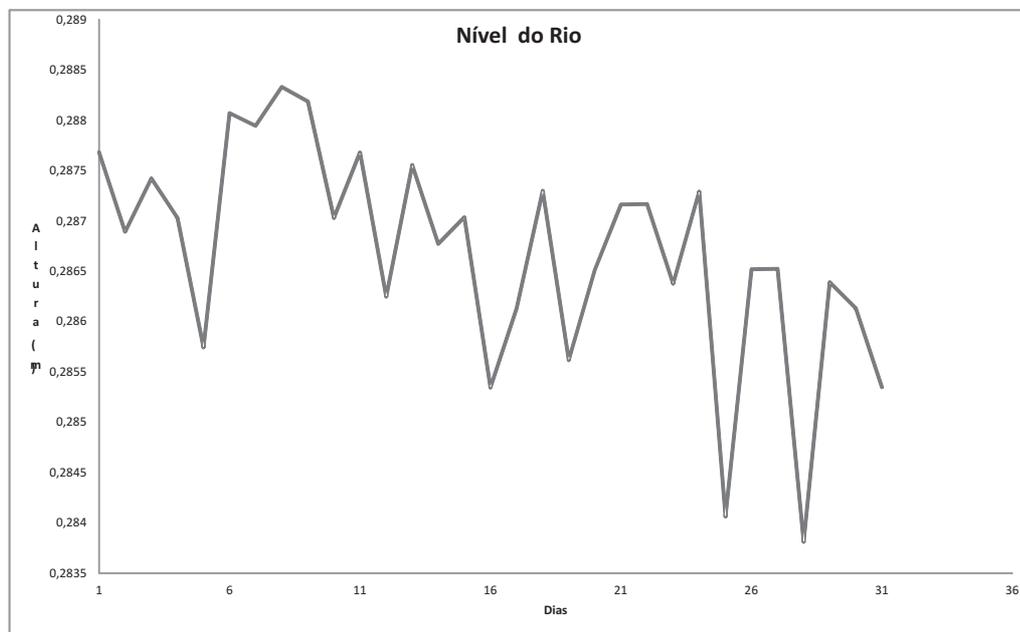


Figura 4.18: Coletores

A Figura 4.19 apresenta os valores observados do parâmetro de velocidade do vento,

esses valores são apresentados em metros por segundo.

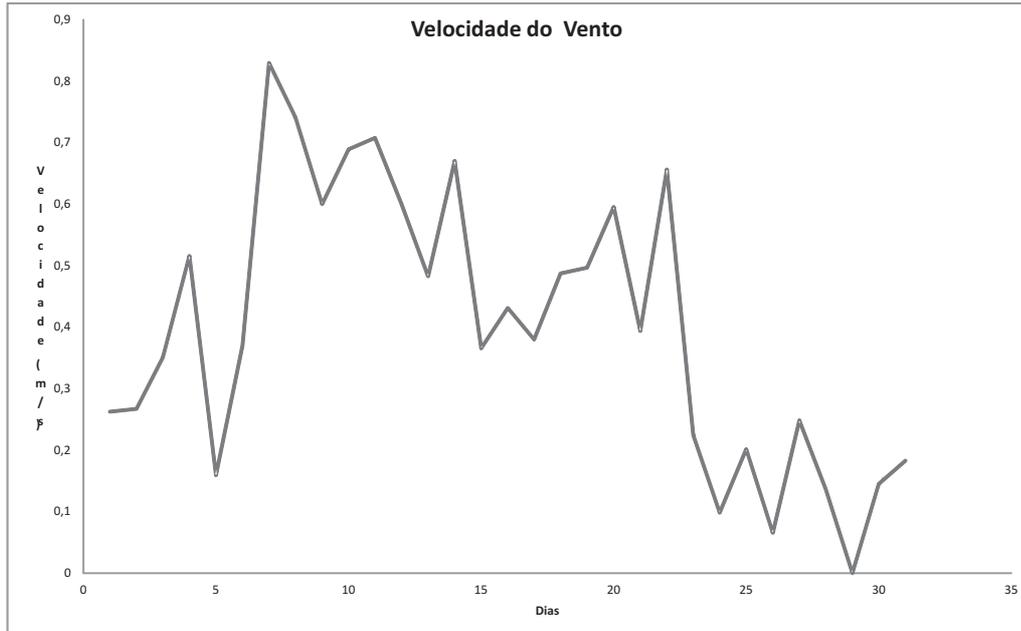


Figura 4.19: Coletores

E por fim a Figura 4.20 apresenta os valores pluviométricos observados pelo sensor, nela os valores são expressos em milímetros por dia.

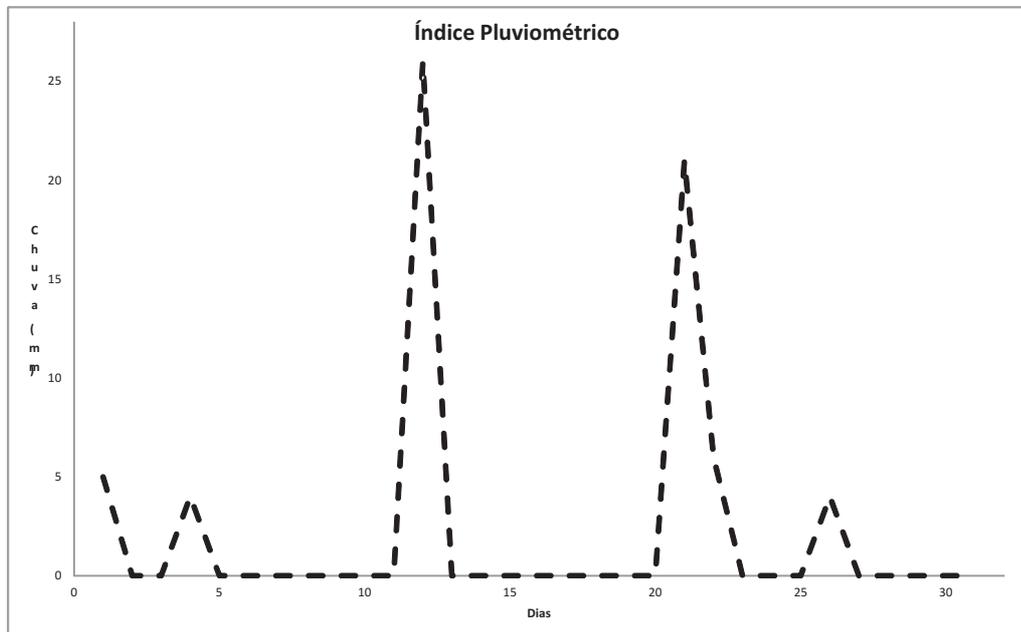


Figura 4.20: Coletores

Novos testes serão realizados para validar os valores reais com os parâmetros observados, pois é prematuro com esses valores preliminares chegar a alguma hipótese. Mas

inicialmente os testes foram válidos para verificar o comportamento do protocolo em um ambiente real.

4.5 Considerações Finais

Esse capítulo apresentou a implementação do PBP, um protocolo para redes de sensores sem fio para monitoramento de eventos sazonais com a utilização de políticas para o gerenciamento da rede. O protocolo procurou utilizar um padrão que permita sua utilização nas plataformas mais comuns em RSSF, independente do tipo de tecnologia de comunicação utilizada. O protocolo está fase de teste com sensores fabricados pela empresa Libelium uma *startup* da Universidade de Zaragoza na Espanha, utilizando transceptores de 900MHZ e coletores que armazenaram os dados em banco de dados, para utilização de um sistema de monitoramento de riscos pela Secretária de Defesa Civil do município de Jaraguá do Sul.

Capítulo 5

Conclusão

Esse trabalho apresentou o PBP como protocolo para redes de sensores sem fio baseado em políticas para monitoramento de parâmetros ambientais sazonais, proposto para atuar em áreas de risco. A avaliação do protocolo foi realizada utilizando um estudo de caso onde os nós sensores fazem leitura de valores pluviométricos em bacias hidrográficas, que interferem nos valores do nível de umidade de encostas, que é um dos fatores de deslizamento por saturação do solo. Métricas como: consumo de energia, latência e perda de pacotes foram utilizadas nas comparações entre os demais protocolos e o protocolo proposto PBP. Os resultados das simulações foram analisados estatisticamente pelo modelo ANOVA utilizando o teste de variância no software R (TEAM et al., 2008). O uso de política no gerenciamento da rede de sensores mostrou-se eficiente no controle da energia residual. O PBP apresentou o melhor resultado comparado aos protocolos analisados. A baixa latência dos eventos observados e entregues ao coletor, também provou que o PBP pode ser utilizado para tais situações de monitoramento ambiental, uma vez que apresentou também o menor valor comparado aos demais, qualificando também sua utilização em tempo real. Atualmente, um protótipo do protocolo proposto, encontra-se em fase de implementação para ser usado em sensores já adquiridos para monitoramento de áreas de risco no município de Jaraguá do Sul em Santa Catarina. Permitindo assim a implementação de um sistema de alerta para a Secretaria de Defesa Civil do município.

Como resultado desse trabalho até o momento foi publicado o seguinte artigo:

- PBP - um protocolo baseado em políticas para controle eficiente de energia em redes de sensores sem fio. In: SBRC-2013 – WGRS, 2013.

5.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros do protocolo pretende-se implementar o protocolo nos equipamentos adquiridos e analisar seus resultados reais com os resultados obtidos pelos experimentos de simulação para verificar seu desempenho. Também pretende-se adicionar funcionalidades que permitam a utilização em cenários com mobilidade. Também pretende-se ampliar o cenário de eventos observados e desenvolver um sistema de alerta para eventos climáticos críticos.

Referências Bibliográficas

- AGNOLI, A. et al. Sensor fusion and estimation strategies for data traffic reduction in rooted wireless sensor networks. In: IEEE. *Communications, Control and Signal Processing, 2008. ISCCSP 2008. 3rd International Symposium on*. [S.l.], 2008. p. 677–682.
- AKKAYA, K.; YOUNIS, M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, Elsevier, v. 3, n. 3, p. 325–349, 2005.
- AKYILDIZ, I. et al. A survey on sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*, IEEE, v. 40, n. 8, p. 102–114, 2002.
- AL-OBAISAT, Y.; BRAUN, R. On wireless sensor networks: architectures, protocols, applications, and management. 2007.
- BOUKERCHE, A.; PAZZI, R.; ARAUJO, R. A fast and reliable protocol for wireless sensor networks in critical conditions monitoring applications. In: ACM. *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. [S.l.], 2004. p. 157–164.
- CAM, H. et al. Espda: Energy-efficient and secure pattern-based data aggregation for wireless sensor networks. In: *Sensors, 2003. Proceedings of IEEE*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 732 – 736 Vol.2.
- CHEN, Y.; YANG, Y.; YI, W. A cooperative routing algorithm for lifetime maximization in wireless sensor networks. In: IET. *Wireless Sensor Network, 2010. IET-WSN. IET International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 167–172.
- CHU, M.; HAUSSECKER, H.; ZHAO, F. Scalable information-driven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks. *International Journal of High Performance Computing Applications*, SAGE Publications, v. 16, n. 3, p. 293–313, 2002.

- CORREIA, L. et al. Uma taxonomia para protocolos de controle de acesso ao meio em redes de sensores sem fio. *Annales des Telecommunications.(Paris: 2005)*, 2005.
- CROSSBOW, I. *Technology MICA2: Wireless measurement system*. 2004.
- Defesa Civil. *Alerta de Solos do Município de Jaraguá do Sul/SC*. 2012.
- DURHAM, D. et al. Rfc 2748. *The COPS (Common Open Policy Protocol)*, 2000.
- FALL, K.; VARADHAN, K. *The network simulator (ns-2)*. 2007.
- GUERIN, R.; YAVATKAR, R.; PENDARAKIS, D. *A framework for policy-based admission control*. [S.l.], 2000.
- 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.
- HEINZELMAN, W.; KULIK, J.; BALAKRISHNAN, H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In: ACM. *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 1999. p. 174–185.
- INTANAGONWIWAT, C. et al. Directed diffusion for wireless sensor networking. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 2–16, 2003.
- INTERNATIONAL, D. *Digi International*. 2012. Disponível em: <<http://www.digi.com/products/model?mid=4154>>. Acesso em: 20 dez. 2012.
- JAYAKUMAR, G.; GOPINATH, G. Ad hoc mobile wireless networks routing protocols—a review. *Journal of Computer science*, v. 3, n. 8, p. 574–582, 2007.
- JOHNSON, D. et al. The dynamic source routing (dsr) protocol for mobile ad hoc networks. *IETF Draft, draft-ietf-manet-dsr-009. txt*, 2003.
- KRZHIZHANOVSKAYA, V. et al. Flood early warning system: design, implementation and computational models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCE, ICCS 2011, 2011, Nanyang, Singapore. *Anais...* [S.l.]: Elsevier, 2011.

- LI, L.; HALPERN, J. Minimum-energy mobile wireless networks revisited. In: *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1, p. 278 –283 vol.1.
- LIBELIUM. *Libelium Corporation*. 2012. Disponível em: <<http://www.libelium.com>>. Acesso em: 11 nov. 2012.
- LIBELIUM. *Libelium Corporation*. 2012. Disponível em: <<http://www.libelium.com/company/customers>>. Acesso em: 11 nov. 2012.
- LINDSEY, S.; RAGHAVENDRA, C. Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems. In: IEEE. *Aerospace conference proceedings, 2002. IEEE*. [S.l.], 2002. v. 3, p. 3–1125.
- MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. de. Noções de probabilidade e estatística. Editora da Universidade de São Paulo, 2002.
- MALLADI, R.; AGRAWAL, D. Current and future applications of mobile and wireless networks. *Communications of the ACM*, ACM, v. 45, n. 10, p. 144–146, 2002.
- PAZZI, R. W. N.; ARAUJO, R. B. de; BOUKERCHE, A. Um algoritmo tolerante a falhas e de baixa latência para redes de sensores sem fio. *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBT*, 2004.
- PERKINS, C.; BHAGWAT, P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, ACM, v. 24, n. 4, p. 234–244, 1994.
- PERKINS, C.; ROYER, E. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In: IEEE. *Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA '99. Second IEEE Workshop on*. [S.l.], 1999. p. 90–100.
- POLASTRE, J.; HILL, J.; CULLER, D. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In: ACM. *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*. [S.l.], 2004. p. 95–107.
- QWASMI, N.; LISCANO, R. Distributed policy-based management for wireless sensor networks. *Procedia Computer Science*, v. 10, n. 0, p. 1208 – 1212, 2012. ISSN 1877-0509. ANT 2012 and MobiWIS 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050912005327>>.

- RANTOS, K. et al. Secure policy-based management solutions in heterogeneous embedded systems networks. In: *Telecommunications and Multimedia (TEMU), 2012 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 227–232.
- RODOPLU, V.; MENG, T. Minimum energy mobile wireless networks. In: *Communications, 1998. ICC 98. Conference Record. 1998 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 1998. v. 3, p. 1633–1639 vol.3.
- RUIZ, L. B.; NOGUEIRA, J. M.; LOUREIRO, A. A. Manna: A management architecture for wireless sensor networks. *Communications Magazine, IEEE, IEEE*, v. 41, n. 2, p. 116–125, 2003.
- SADAGOPAN, N.; KRISHNAMACHARI, B.; HELMY, A. The acquire mechanism for efficient querying in sensor networks. In: IEEE. *Sensor Network Protocols and Applications, 2003. Proceedings of the First IEEE. 2003 IEEE International Workshop on*. [S.l.], 2003. p. 149–155.
- SANKARASUBRAMANIAM, Y.; AKYILDIZ, I.; MCLAUGHLIN, S. Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks. In: IEEE. *Sensor Network Protocols and Applications, 2003. Proceedings of the First IEEE. 2003 IEEE International Workshop on*. [S.l.], 2003. p. 1–8.
- SCHURGERS, C.; SRIVASTAVA, M. Energy efficient routing in wireless sensor networks. In: IEEE. *Military Communications Conference, 2001. MILCOM 2001. Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force. IEEE*. [S.l.], 2001. v. 1, p. 357–361.
- SHAH, R.; RABAEY, J. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. In: *Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 350 – 355 vol.1.
- SHIH, E. et al. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In: ACM. *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 2001. p. 272–287.
- TEAM, R. et al. R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation Statistical Computing*, 2008.
- TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N. B.; HEINZELMAN, W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, ACM,

New York, NY, USA, v. 6, n. 2, p. 28–36, abr. 2002. ISSN 1559-1662. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/565702.565708>>.

WESTERINEN, A. et al. Rfc 3198?terminology for policy-based management. *The Internet Society, Network Working Group*, 2001.

WOO, A.; CULLER, D. A transmission control scheme for media access in sensor networks. In: ACM. *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 2001. p. 221–235.

XU, Y.; HEIDEMANN, J.; ESTRIN, D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In: ACM. *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 2001. p. 70–84.

YAO, Y.; GEHRKE, J. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. *ACM Sigmod Record*, ACM, v. 31, n. 3, p. 9–18, 2002.

ZHANG, W.-y. et al. A power efficient routing protocol for wireless sensor network. In: IEEE. *Networking, Sensing and Control, 2007 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 20–25.

ZOU, C.; LU, Y. A time synchronization method for wireless sensor networks. In: *Information Computing and Applications*. [S.l.]: Springer, 2012. p. 221–228.