

Mitchel Soni Felske

**GLHOVE: UMA ABORDAGEM PARA O
MONITORAMENTO UNIFORME EM RSSF IEEE
802.15.4 *CLUSTER TREE***

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de
Automação e Sistemas para a obten-
ção do Grau de Mestre em Engenharia
de Automação e Sistemas.

Florianópolis

2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Felske, Mitchel Soni

GLHOVE : Uma abordagem para o monitoramento uniforme em
RSSF IEEE 802.15.4 cluster tree / Mitchel Soni Felske ;
orientador, Carlos Barros Montez ; co-orientador, Alex
Sandro Roschildt Pinto. - Florianópolis, SC, 2013.
129 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Automação e Sistemas.

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Redes de
sensores sem fio. 3. Monitoramento uniforme. 4. Topologia
cluster tree. 5. Padrão IEEE.802.15.4. I. Montez, Carlos
Barros. II. Pinto, Alex Sandro Roschildt. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. IV. Título.

Mitchel Soni Felske

**GLHOVE: UMA ABORDAGEM PARA O MONITORAMENTO
UNIFORME EM RSSF IEEE 802.15.4 *CLUSTER TREE***

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

Florianópolis, 30 de agosto de 2013.

Prof. Dr. Jomi Fred Hubner
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Barros Montez
Presidente/Orientador - UFSC

Prof. Dr. Fabian Luis Vargas
PUC/RS

Prof. Dr. Ricardo Moraes
INE/UFSC

Prof. Dr. Marcelo Maia Sobral
IFSC

AGRADECIMENTOS

A conclusão dessa jornada não teria sido possível sem a colaboração de algumas pessoas, que foram muito importantes nessa trajetória, e que eu gostaria de prestar meus sinceros agradecimentos.

Ao professor e orientador Dr. Carlos Barros Montez e ao professor e coorientador Dr. Alex Sandro Roschildt Pinto, pelos excepcionais guias que foram ao longo deste trabalho, estando sempre disponíveis para discussões e esclarecimentos, e cujo comprometimento, dedicação e empenho, me estimularam e me conduziram para que eu conseguisse concluir mais essa etapa.

À empresa Bravi Software, mais especificamente ao Gustavo Hartmann e a Roberta Bertacco por toda compreensão e suporte para que eu pudesse dar prosseguimento a esta pesquisa.

À minha namorada, Stephanie, por ter estado sempre ao meu lado, me apoiando por toda essa jornada e me dando força para superar os momentos mais difíceis.

Ao meu pai Vilmar, minha mãe Kátia e minha irmã Mitchelle, por estarem sempre presentes, acreditando no meu potencial, me dando força e coragem para seguir em frente. Muito obrigado pela compreensão, incentivo, carinho e amor.

O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas.

Claude Lévi-Strauss

RESUMO

Em diversas aplicações de monitoramento, tais como aquelas que podem ser encontradas no chão da fábrica industrial ou com o propósito de observação ambiental, pode ser desejável obter uma cobertura de sensoriamento uniforme, de forma a proporcionar o mesmo grau de cobertura para toda rede. O padrão IEEE 802.15.4 tem se tornado um importante padrão para as Redes de Sensores Sem Fio. Entretanto, o uso da topologia *cluster tree* nessas redes dificulta a obtenção de uma cobertura uniforme e imparcial da área observada. *Clusters* mais distantes da estação base são eventualmente prejudicados, tendo as mensagens de seus sensores atrasadas e descartadas. Neste trabalho, é proposto o *framework* intitulado GLHOVE (*GLobal and HOmogeneous View of the Environment*), cujo objetivo é fornecer uma cobertura mínima e uniforme da área de interesse, reduzindo ao máximo o consumo energético da rede. Simultaneamente, o GLHOVE pode priorizar algumas regiões de maior importância para a aplicação, as chamadas *hotspots*, proporcionando diferentes níveis de QoS para os *clusters* que as monitoram. Os resultados das simulações mostram que o GLHOVE melhorou a imparcialidade da rede com relação à quantidade de mensagens recebidas pela estação base. Além disso, o GLHOVE atingiu a QoS desejada e proporcionou um considerável aumento do tempo de vida da rede.

Palavras-chave: Monitoramento uniforme, RSSF, topologia *cluster tree*, IEEE 802.15.4

ABSTRACT

In several monitoring applications, such as those that can be found in industrial factory floor or with environmental observing purpose, it may be necessary to obtain an uniform sensing coverage, providing as much as possible the same coverage degree for the entire network area. The IEEE 802.15.4 has become an important standard in wireless sensor networks. However, the use of cluster-tree topology in these networks hampers a fair and uniform coverage in the sensing area. Clusters more distant from the base station are eventually adversely affected, with messages from its sensors delayed and discarded. In this paper, we propose a framework, entitled GLHOVE (GLobal and HOMogeneous View of the Environment), whose goal is to make a trade-off between a minimum and uniform coverage area and the energy consumption of the network. At the same time, GLHOVE can prioritize hotspots regions due to its more importance for the application, providing different QoS levels for their clusters. The simulation results show that GLHOVE improved the fairness (w.r.t. messages received by base station). Besides that, GLHOVE reached the required QoS and provided a considerable increase in the network lifetime.

Keywords: Uniform Coverage, WSN, cluster tree topology, IEEE 802.15.4

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Pilha de protocolos da especificação ZigBee.	29
Figura 2	Exemplo de uma rede organizada sob a topologia estrela.	31
Figura 3	Exemplo de uma rede organizada sob a topologia agrupamento em árvore.	32
Figura 4	Modos de operação da subcamada MAC do padrão IEEE 802.15.4. Fonte: Semprebom (2012).	35
Figura 5	Estrutura do superquadro. Fonte: Adaptado de Semprebom (2012).	36
Figura 6	Estrutura do superquadro com CAP e CFP. Fonte: Adaptado de IEEE (2011).	38
Figura 7	Algoritmo <i>Binary Exponential Backoff</i> para o CSMA/CA com compartimentos. Fonte: Semprebom (2012), adaptado de IEEE (2011).	42
Figura 8	<i>Hardware</i> de um nodo sensor. Fonte: Adaptado de Loureiro et al. (2003).	43
Figura 9	Uma configuração típica de uma RSSF. Os nodos ampliados representam as estações base.	44
Figura 10	Ciclo de vida de uma RSSF. Fonte: Adaptado de Loureiro et al. (2003).	46
Figura 11	Exemplo de colisão direta entre <i>beacons</i>	50
Figura 12	Exemplo de colisão indireta entre <i>beacons</i>	51
Figura 13	Exemplo da abordagem <i>Beacon-Only Period</i>	52
Figura 14	Exemplo da abordagem <i>Time Division</i>	53
Figura 15	Problema da estação escondida.	55
Figura 16	Modelo de QoS.	56
Figura 17	Cenário usado para ilustrar os conceitos de cobertura e monitoramento uniforme. Os círculos delimitam o alcance do sinal de cada sensor.	58
Figura 18	Fusão de Sensores competitiva, complementar e cooperativa. Fonte: Adaptado de Elmenreich (2002).	63
Figura 19	Fluxograma do algoritmo distribuído do LEACH para formação dos <i>clusters</i> . Fonte: Adaptado de HEINZELMAN, CHANDRAKASAN, BALAKRISHNAN (2002).	66
Figura 20	Agrupamento dos nodos realizados pelos CHs do pri-	

meio nível da árvore. Fonte: Adaptado de Yamao, Takagishi (2008).....	68
Figura 21 Exemplo de uma escala de transmissão do TSGA. Fonte: Yamao, Takagishi (2008).....	69
Figura 22 Exemplo da utilização do <i>Dynamic Dual Rate Beacon Scheduling</i> . Fonte: Adaptado de Almeida, Chen, Wang (2010).....	70
Figura 23 Autômato de 6 estados que determina o comportamento dos nodos. Fonte: Semprebom et al. (2012).....	75
Figura 24 Exemplo da arquitetura de rede no GLHOVE.....	79
Figura 25 Escalonamento de <i>beacon</i> de acordo com o <i>Staggered Wakeup Scheduling</i> . Fonte: Adaptado de Yamao, Takagishi (2008)....	80
Figura 26 Modelo do OMNeT++: módulos simples e módulos compostos. Fonte: Adaptado de Varga, Hornig (2008).....	88
Figura 27 Modelo do padrão IEEE 802.15.4 no OMNeT++. Fonte: Chen, Dressler (2007).....	89
Figura 28 Rede <i>cluster tree</i> balanceada. Disposição aproximada dos 32 CHs e suas associações.	92
Figura 29 Árvore balanceada com 32 CHs: II do GLHOVE e da <i>Naive approach</i> a cada BI.	95
Figura 30 Árvore balanceada com 32 CHs: valores do Índice de Imparcialidade do GLHOVE e do <i>Naive approach</i> a cada BI para os três experimentos realizados.	96
Figura 31 Árvore balanceada com 32 CHs: quantidade média de mensagens recebidas pela estação base, dos diferentes <i>clusters</i> , por nível da rede.	97
Figura 32 Árvore balanceada com 32 CHs: comparação do atraso fim-a-fim entre o GLHOVE e a <i>Naive approach</i>	98
Figura 33 Árvore balanceada com 32 CHs: comparação do consumo de bateria do PC, dos CHs e dos sensores entre o GLHOVE e a <i>Naive approach</i>	99
Figura 34 Árvore balanceada com 32 CHs: comparação do consumo de bateria da rede entre o GLHOVE e a <i>Naive approach</i>	99
Figura 35 Rede <i>cluster tree</i> desbalanceada após a operação da RSSF por um longo período. Disposição aproximada dos 20 CHs e suas associações.	101
Figura 36 Árvore desbalanceada com 20 CHs: Índice de Imparcialidade do GLHOVE e da <i>Naive approach</i> a cada BI.	102
Figura 37 Árvore desbalanceada com 20 CHs: quantidade média	

de mensagens recebidas pela estação base, de cada <i>cluster</i> da rede.	102
Figura 38 Árvore desbalanceada com 20 CHs: comparação do consumo de bateria do PC, dos CHs e dos sensores entre o GLHOVE e a <i>Naive approach</i> .	103
Figura 39 Rede <i>cluster tree</i> balanceada com 20 CHs.	104
Figura 40 Árvore balanceada com 20 CHs: Índice de Imparcialidade do GLHOVE e da <i>Naive approach</i> a cada BI.	104
Figura 41 Árvore balanceada com 20 CHs: quantidade média de mensagens recebidas pela estação base, de cada <i>cluster</i> da rede.	105
Figura 42 Árvore balanceada com 20 CHs: comparação do consumo de bateria do PC, dos CHs e dos sensores entre o GLHOVE e a <i>Naive approach</i> .	106
Figura 43 Comparação do Índice de Imparcialidade do GLHOVE entre as RSSFs balanceada e desbalanceada compostas por 20 <i>clusters</i> .	107
Figura 44 Índice de Imparcialidade do GLHOVE a cada BI para o cenário 1 (com 1 <i>cluster</i> sendo priorizado) e para o cenário 2 (com 4 <i>clusters</i> sendo priorizados).	109
Figura 45 Quantidade média de mensagens recebidas pela estação base de cada <i>cluster</i> da rede.	109
Figura 46 A gota da chuva possui um <i>momentum</i> vertical (p_v). Ao colidir com o transdutor piezoelétrico, seu sinal acústico é convertido em uma voltagem $U_{(t)}$, a partir da qual se pode inferir o diâmetro da gota.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Interfaces de rádio suportadas pelo IEEE 802.15.4.	33
Tabela 2	Índice de Imparcialidade.	60
Tabela 3	Resumo das características dos principais trabalhos apresentados relacionados à cobertura em RSSF.	77
Tabela 4	Agrupamento dos coordenadores e seus respectivos valores de <i>beaconOffset</i>	93
Tabela 5	Parâmetros de simulação.	94
Tabela 6	Desempenho da rede com relação a alguns fatores que influenciam no consumo de energia da rede.	97
Tabela 7	Novos valores de QoS para os <i>clusters</i> determinados pela aplicação.	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RSSF	Redes de Sensores sem Fio	23
GLHOVE	<i>GLobal and HOmogeneous View of the Environment</i> . .	25
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>	29
PHY	<i>Physical Layer</i>	29
MAC	<i>Medium Access Control Sublayer</i>	29
LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>	29
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>	29
FFD	<i>Full-function Device</i>	30
RFD	<i>Reduced-function Device</i>	30
PC	<i>PAN Coordinator</i>	30
CH	<i>Cluster Head</i>	32
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>	33
ED	<i>Energy Detection</i>	33
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>	34
LQI	<i>Link Quality Indication</i>	34
LAN	<i>Local Area Network</i>	34
DC	<i>Duty Cycle</i>	36
BI	<i>Beacon Interval</i>	36
BO	<i>Beacon Order</i>	36
CAP	<i>Contention Access Period</i>	36
SD	<i>Superframe Duration</i>	37
SO	<i>Superframe Order</i>	37
CFP	<i>Contention Free Period</i>	37
GTS	<i>Guaranteed Time Slots</i>	37
IFS	<i>Interframe Spacing</i>	37
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>	38
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>	39
NB	<i>Number of Backoffs</i>	39
CW	<i>Contention Window</i>	39
BE	<i>Backoff Exponent</i>	39
BEB	<i>Binary Exponential Backoff</i>	40
BP	<i>Backoff Period</i>	40

MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i>	43
SDS	<i>Superframe Duration Scheduling</i>	52
FIFO	<i>First In First Out</i>	55
QoS	<i>Quality of Service</i>	56
II	<i>Índice de Imparcialidade</i>	59
CES	<i>Cluster Effectively Sent</i>	59
IF	<i>Information Fusion</i>	61
LEACH	<i>Low-energy Adaptative Clustering Hierarchy</i>	65
TSGA	<i>Time Shift Grouping Access</i>	68
CCP	<i>Coverage Configuration Protocol</i>	76
OGDC	<i>Optimal Geographical Density Control</i>	76
NED	<i>Network Description Language</i>	88
AGV	<i>Automatic Guided Vehicle</i>	125
RSD	<i>Raindrop Size Distribution</i>	128

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 MOTIVAÇÃO	23
1.2 OBJETIVOS	25
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	26
2 PADRÃO IEEE 802.15.4	29
2.1 TOPOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO	30
2.2 CAMADA FÍSICA (PHY)	33
2.3 SUBCAMADA MAC	34
2.3.1 Modo de operação com <i>beacon</i>	35
2.3.2 Modo de operação sem <i>beacon</i>	37
2.3.3 Protocolo CSMA/CA	38
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
3 REDES DE SENSORES SEM FIO	43
3.1 MODELO FUNCIONAL DE UMA RSSF	46
3.2 APLICAÇÕES	48
3.3 DESAFIOS DE UMA RSSF <i>CLUSTER TREE</i>	49
3.3.1 Colisão Direta	50
3.3.2 Colisão Indireta	50
3.3.3 Abordagens para evitar a colisão de <i>beacons</i>	51
3.3.3.1 Abordagem <i>Beacon-Only Period</i>	51
3.3.3.2 Abordagem <i>Time Division</i>	52
3.3.4 Injustiça no acesso ao canal de comunicação	54
3.4 QUALIDADE DE SERVIÇO - QOS	56
3.4.1 Cobertura x Monitoramento Uniforme	57
3.4.2 Índice de Imparcialidade	59
3.4.2.1 Índice de Imparcialidade Ponderado	60
3.5 FUSÃO DA INFORMAÇÃO	61
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
4 TRABALHOS RELACIONADOS	65
4.1 LEACH	65
4.2 <i>TIME SHIFT GROUPING ACCESS</i>	67
4.3 <i>DYNAMIC DUAL-RATE BEACON SCHEDULING</i>	69
4.4 COBERTURA	71
4.4.1 Cobertura estática e dinâmica	72
4.4.2 <i>Sleep Scheduling</i>	74
4.4.3 Cobertura Uniforme	75
4.4.4 Estratégias de Implantação	76

4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
5	GLHOVE <i>FRAMEWORK</i>	79
5.1	ALGORITMOS	81
5.1.1	Coordenador PAN	81
5.1.2	<i>Cluster-Heads</i>	82
5.1.3	Sensores	82
5.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
6	AVALIAÇÃO DO GLHOVE	87
6.1	FERRAMENTA DE SUPORTE À SIMULAÇÃO: OMNET++	87
6.1.1	Visão Geral	87
6.1.2	Arquitetura do OMNeT++	88
6.2	CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO	90
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
6.3.1	Árvore balanceada com 32 <i>cluster heads</i>	94
6.3.2	Árvore desbalanceada com 20 <i>cluster heads</i>	100
6.3.3	Árvore balanceada com 20 <i>cluster heads</i>	103
6.3.4	Distribuição ponderada do recurso	107
7	CONCLUSÕES	111
7.1	REVISÃO DAS MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS	111
7.2	VISÃO GERAL DO TRABALHO	112
7.3	CONTRIBUIÇÕES E ESCOPO DO TRABALHO	113
7.4	TRABALHOS FUTUROS	114
	REFERÊNCIAS	115
	APÊNDICE A – Aplicações	125

1 INTRODUÇÃO

Muitos dos sistemas de automação atuais são tipicamente caracterizados por possuírem um elevado grau de distribuição espacial. Devido à complexidade das suas operações de produção, soluções que melhorem a produtividade e a eficiência destes sistemas são desafiadoras e consideradas de primordial importância. Dois exemplos importantes desses sistemas são: automação industrial e monitoramento ambiental. As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) têm emergido como uma importante ferramenta para esses sistemas. No chão de fábrica em sistemas de automação industrial, há uma clara tendência para a integração das RSSF com o legado de tecnologias cabeadas, sendo uma interessante abordagem para mudar gradativamente o sistema para uma completa solução sem fio (CENA; VALENZANO; VITTURI, 2007).

As RSSF também têm sido amplamente utilizadas para o monitoramento ambiental. O monitoramento de desastres usando RSSF têm se tornado uma importante aplicação em áreas urbanas. As catástrofes naturais decorrentes de chuvas intensas, que registram um grande volume de água precipitado em um curto espaço de tempo, como as enchentes e os deslizamentos de terra, têm aumentado a uma taxa alarmante e são grandes ameaças à vida humana (RAMESH, 2010).

1.1 MOTIVAÇÃO

O uso de uma RSSF para o monitoramento e controle de aplicações industriais apresenta várias vantagens como: facilidade de implantação e configuração, atuação remota e redução dos custos com a manutenção da infraestrutura. No entanto, um dos principais obstáculos para a utilização de RSSF em ambientes industriais é a hostilidade desse tipo de ambiente. A exposição a altas temperaturas, vibração, pressão, umidade e poeira, incorre em erros de leitura de sensores e reduz a confiabilidade das medições (GUNGOR; HANCKE, 2009). Ademais, os canais sem fio utilizados na comunicação são afetados por equipamentos industriais ruidosos (máquinas de solda, por exemplo); por momentânea obstrução no caminho de transmissão (por exemplo, veículos guiados automaticamente - AGVs - movendo-se em uma linha de montagem) e pela interferência de canal causada por outros dispositivos sem fio (por exemplo, uma outra tecnologia sem fio operando na banda 2.4 GHz ISM compartilhada).

Nas aplicações de monitoramento ambiental, mais especificamente no monitoramento de chuvas, uma RSSF de disdrômetros (JONG, 2010) pode ser uma solução efetiva, confiável e de baixo custo de manutenção, capaz de capturar, processar e transmitir dados críticos com uma frequência elevada. Todavia, um obstáculo para a sua implantação é a não confiabilidade das medições dos disdrômetros individuais. A água retida em folhas de árvores, por exemplo, pode gotejar no sensor após a chuva, resultando em leituras imprecisas. Uma solução é a utilização de uma RSSF densa e de larga escala executando técnicas de fusão de sensores competitiva (ELMENREICH, 2002). Essas técnicas exploram a redundância das leituras dos sensores a fim de manter a confiabilidade da aplicação, visto que alguns nodos podem apresentar falhas temporais ou de valor (decorrente de medições imprecisas).

Dessa forma, é possível desativar alguns nodos utilizando políticas de escalonamento do sono, visto que nem todos os sensores terão de operar simultaneamente (TIAN; GEORGANAS, 2002). Desse modo, um efeito global é causado na rede, aumentando a sua vida útil e reduzindo o uso de canal sem fio. Portanto, é necessário considerar um *trade-off* entre a minimização do número de nodos sensoriando/enviando mensagens para a estação base (aumentando o tempo de vida da rede) e a maximização da QoS (número de mensagens utilizado pelo elemento tomador de decisão) para aumentar a confiabilidade da aplicação.

Nas RSSF, sejam aquelas implantadas em aplicações industriais ou de monitoramento ambiental, o padrão IEEE 802.15.4 tornou-se um padrão *de facto* para as camadas física e MAC devido às suas características de baixo custo de implantação e baixo consumo energético. O padrão IEEE 802.15.4 permite a configuração de mecanismos de acesso ao meio como CSMA/CA e GTS para comunicação em tempo real; além disso, essas redes podem ser organizadas em diferentes tipos de topologias, como estrela, malha e *cluster tree*.

A necessidade de desenvolvimento de aplicações para o monitoramento de grandes áreas tem demandado novas soluções para o estabelecimento de RSSF de larga escala. Dessa forma, tem se visto um crescente aumento nos estudos sobre as topologias mais favoráveis a implantação desse tipo de rede, como a topologia *cluster tree*.

Algumas aplicações de monitoramento em tempo real, como as citadas anteriormente, enviam um grande número de mensagens periódicas curtas incorrendo em uma alta taxa de ocupação dos canais sem fio, o que pode resultar em colisões de mensagens e falhas de comunicação, comprometendo o desempenho da rede. A natureza aleatória e imprevisível do protocolo CSMA/CA nas redes IEEE 802.15.4 não é ca-

paz de lidar com objetivos conflitantes que são impostos pela aplicação (STANKOVIC et al., 2003) como a realização de um balanceamento entre a QoS e a economia de energia. Portanto, as aplicações que necessitam de uma visão global e homogênea de toda a área monitorada (uma visão uniforme dos dados coletados por diferentes nodos localizados em *clusters* distintos) não conseguem atingir esse objetivo.

Este desafio é a principal motivação para a proposta do GLHOVE (*GLobal and HOMogeneous View of the Environment*) - um *framework* para redes IEEE 802.15.4 *cluster tree* cuja comunicação obedece o protocolo CSMA/CA. A topologia *cluster tree* é formada por vários agrupamentos (*clusters*), cada um auto-organizado em uma topologia estrela, ligados entre si pelos *Cluster Heads* (CHs). Neste contexto, a topologia *cluster tree* pode modelar uma ampla variedade de plantas industriais, desde as mais simples, compostas por um único *cluster* em topologia em estrela, até as mais complexas, formadas por diferentes regiões dentro de uma grande área monitorada.

1.2 OBJETIVOS

Essa dissertação investiga principalmente a seguinte questão:

- É possível desenvolver novas abordagens que estendam o Controle de Acesso ao Meio (MAC) de redes IEEE 802.15.4 de forma a promover o monitoramento uniforme da rede?

Sendo assim, o principal objetivo do GLHOVE envolve um balanceamento entre dois fatores:

1. Maximizar a QoS da RSSF (número de mensagens recebidas pela estação base);
2. Garantir o fornecimento de uma visão homogênea do fenômeno observado para o sistema externo, maximizando a imparcialidade na comunicação dos diferentes fluxos de dados.

Para atingi-lo, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

- Implementar a topologia *cluster tree* no simulador OMNeT++;
- Estudar, através de experimentos, o comportamento do padrão IEEE 802.15.4 em topologia *cluster tree* utilizando CSMA/CA com *beacon*;

- Definir um cenário de simulação (plataforma para os experimentos), estipulando a quantidade de nodos/*clusters* que irão compor a rede, qual a ligação lógica de comunicação entre os CHs, qual a profundidade da árvore de comunicação, etc.;
- Propor um algoritmo para o controle e padronização do envio das mensagens dos diferentes *clusters* que seja compatível com o padrão IEEE 802.15.4 e, portanto, capaz de ser implementado nos dispositivos atualmente disponíveis no mercado, como o MicaZ;
- Implementar e avaliar a abordagem proposta através de simulações (a serem realizadas no simulador OMNeT++).

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Essa dissertação está dividida em sete capítulos. Além dessa introdução, este documento está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 é dada uma visão geral sobre o padrão IEEE 802.15.4. É realizado um contraponto entre as topologias de comunicação estrela e *cluster tree*, mostrando as suas principais características e diferenças. Em seguida são detalhadas as camadas que o compõe, PHY e MAC, dando ênfase ao protocolo CSMA/CA que controla o acesso ao canal de comunicação.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão sobre RSSF, apresentando as suas características e seu ciclo de vida (modelo funcional). Após, são discutidas aplicações que se beneficiam com a utilização do *framework* proposto. Em seguida, são apresentados os desafios para a implantação de uma RSSF *cluster tree*, com o foco principal na questão da manutenção da sincronização da rede – é levantado o problema da colisão de *beacons* e as abordagens propostas para contorná-lo. Por fim, são discutidos aspectos da Fusão da Informação e da QoS em RSSF, com foco especial na métrica conhecida como Índice de Imparcialidade, a qual é de fundamental importância para a abordagem proposta.

O Capítulo 4 traz um estudo detalhado dos principais trabalhos relacionados encontrados na literatura. São abordados trabalhos relacionados com o padrão IEEE 802.15.4, passando pelas técnicas mais conhecidas de *sleep scheduling* e finalizando com os trabalhos que exploram o conceito de cobertura uniforme.

O GLHOVE é examinado minuciosamente no Capítulo 5. É mostrada a arquitetura da rede e são detalhados os algoritmos que norteiam o funcionamento do Coordenador PAN, CHs e sensores.

O Capítulo 6 contém uma visão geral das ferramentas utilizadas para a simulação. Em seguida, os parâmetros de configuração da simulação são detalhados. Na sequência, são apresentados os resultados e discussões a cerca dos três cenários simulados: distribuição equitativa do recurso com uma árvore balanceada; distribuição equitativa do recurso com uma árvore desbalanceada; e a distribuição ponderada do recurso, priorizando regiões onde eventos foram detectados (*hotspots*).

Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho, indicando as vantagens da utilização da abordagem proposta, os seus pontos fortes e fracos, com as possíveis soluções que possam vir a ser desenvolvidas em trabalhos futuros.

2 PADRÃO IEEE 802.15.4

As redes sem fio de área pessoal (*Wireless Personal Area Networks* - WPANs) foram concebidas para a transferência de dados em curtas distâncias. Por necessitarem de pouca ou nenhuma infraestrutura, as WPANs são redes de fácil implantação, baixo custo e energeticamente eficientes.

O padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011) define a camada física (*Physical Layer* - PHY) e a subcamada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control Sublayer* - MAC) para as chamadas *Low-Rate Wireless Personal Area Networks* (LR-WPANs). Essas redes são um tipo especial de WPAN caracterizadas pelas baixas taxas de transmissão dos dispositivos que a compõe.

Pelo fato das RSSF possuírem requisitos similares aos das LR-WPANs, o padrão IEEE 802.15.4 se enquadra perfeitamente com as suas necessidades, tendo por esse motivo se consolidado como o padrão *de facto* dessas redes (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008; PINTO, 2010).

Por contemplar somente as camadas PHY e MAC, outras tecnologias foram desenvolvidas para habilitar a operação das RSSF na prática. Uma das normalizações predominantes é a tecnologia ZigBee (DWIVEDI; VYAS, 2010). Sua arquitetura de rede, mostrada na Figura 1, é baseada no padrão *Open Systems Interconnection* (OSI).

Usuário	Aplicação
ZigBee	Suporte a Aplicação
	Rede/Segurança
IEEE 802.15.4	Enlace (MAC)
	Física

Figura 1 – Pilha de protocolos da especificação ZigBee.

O ZigBee assume a responsabilidade de padronizar a camada de rede, provendo mecanismos para gerenciar o roteamento, e também a de aplicação, na medida em que fornece uma estrutura que define “perfis de aplicação” os quais podem ser compartilhados entre soluções que possuam características similares (ZIGBEE, 2008; DWIVEDI; VYAS, 2010). As camadas inferiores (PHY e MAC) são delegadas para os protocolos do IEEE 802.15.4.

O IEEE 802.15.4 especifica dois tipos de dispositivos que podem compor a rede: o Dispositivo de Função Completa (*Full-function Device* - FFD) e o Dispositivo de Função Reduzida (*Reduced-function Device* - RFD).

Um FFD pode atuar como:

- **Dispositivo Simples:** é o mais comum dos dispositivos, cuja atividade é fazer o sensoriamento do ambiente, coletando e transmitindo dados.
- **Coordenador (ou Roteador):** estes nodos normalmente são utilizados em topologias mais complexas, como a *cluster tree*, proporcionando maior robustez ao sistema. Desse modo, uma de suas atribuições é oferecer serviços de sincronização através da transmissão de *beacons*, os quais não são mandatórios em redes mais simples. Pelo fato de uma das suas principais tarefas ser o repasse de mensagens de um nodo para outro, também são chamados de roteadores.
- **Coordenador PAN (*PAN Coordinator* - PC):** é um tipo especial de Coordenador. Distingue-se dos demais pelo fato de ser um identificador único e global para a rede, sendo responsável pela sua inicialização e gerenciamento. É associando-se a eles ou aos Coordenadores (quando esses existirem) que outros dispositivos se integram à rede.

Por outro lado, um RFD opera com a implementação básica do padrão IEEE 802.15.4, utilizando o mínimo de recursos necessário. Por isso, um RFD pode se comunicar somente com um FFD. Dessa forma, ele é destinado a aplicações simples, que não necessitam transmitir grandes quantidades de dados. Suas atribuições são equivalentes às de um FFD exercendo o papel de um “Dispositivo Simples”.

2.1 TOPOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO

De acordo com os requisitos da aplicação, uma RSSF pode ser organizada segundo a topologia estrela ou ponto-a-ponto.

A mais simples das topologias é a estrela, sendo caracterizada por seu paradigma de comunicação centralizado. Cada dispositivo (FFD ou RFD) que deseja se comunicar com outro elemento da rede deve primeiramente encaminhar seus dados para o coordenador PAN, o qual irá repassá-los para o dispositivo adequado (Figura 2).

Por alcançar a estação base em um único salto, a área de abrangência da rede é limitada ao alcance do sinal de rádio do PC. Além disso, essa solução apresenta severas restrições quanto a escalabilidade, pois conforme se aumenta o número de nodos, o PC pode se tornar um gargalo, ocasionando o congestionamento da rede. Outra desvantagem é que se esse mesmo PC falhar, não há rotas alternativas para a transmissão das mensagens, tornando a rede inoperante.

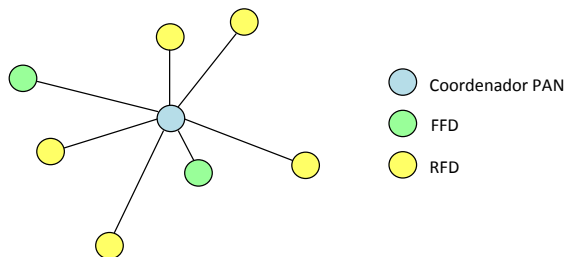


Figura 2 – Exemplo de uma rede organizada sob a topologia estrela.

Assim, pelo fato de muitas das aplicações para RSSF precisarem cobrir um extenso território, é indispensável soluções que forneçam a descentralização da comunicação. Uma solução ponto-a-ponto se mostra mais viável na medida em que os dispositivos podem se comunicar diretamente entre si.

A flexibilidade oferecida pela comunicação multissalto torna a rede mais escalável e robusta. Ademais, a proximidade entre os dispositivos permite diminuir a potência do rádio dos nodos, aumentando a sua eficiência energética, além de eliminar alguns efeitos indesejáveis de propagação do sinal em comunicações de longa distância (AKYILDIZ et al., 2002).

É importante ressaltar que, como consequência dessa característica, se estabeleceu uma falsa concepção de que a comunicação multissalto é energeticamente mais eficiente do que a comunicação com salto único (PESOVIC et al., 2010). Somando-se os pequenos gastos de energia dos nodos ao longo do caminho entre um elemento de origem e outro de destino, obtém-se um consumo energético maior do que em uma única transmissão de longa distância. Um fator que contribui para esse resultado é a necessidade de manter os nodos intermediários permanentemente acordados para repassar as mensagens, causando a redução da capacidade das suas baterias.

Outra desvantagem dessa abordagem é a complexidade adicional

gerada em virtude da necessidade de utilização de algoritmos de roteamento, pois eles aumentam a sobrecarga de processamento e também a latência das mensagens enviadas (DARGIE; POELLABAUER, 2010).

Um caso especial da topologia ponto-a-ponto é o agrupamento em árvore (*cluster tree*). Ele pode ser visto como uma composição de diversas topologias estrela, interconectadas através dos seus respectivos coordenadores (comumente denominados *Cluster Heads* - CHs) (Figura 3).

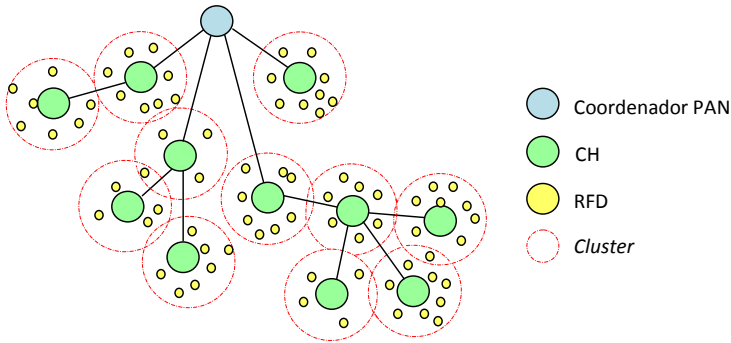


Figura 3 – Exemplo de uma rede organizada sob a topologia agrupamento em árvore.

Conforme mencionado anteriormente, a formação da topologia da rede faz parte da etapa de Configuração da rede. Por ser uma tarefa complexa, há diversas propostas na literatura com o objetivo de fornecer algoritmos para a formação dos agrupamentos. Sem perda de generalidade, os seguintes passos podem ser seguidos para realizar essa tarefa (CUOMO et al., 2005):

Inicialmente, o PC assume a posição de raiz da árvore e inicia a formação do primeiro *cluster* enviando *beacons* periodicamente para seus dispositivos vizinhos. Qualquer nodo que receber um *beacon* pode requisitar a sua entrada na rede. Se o PC permitir a associação desse dispositivo e esse for um FFD, ele também pode atuar como coordenador, constituindo o seu próprio *cluster*. Dessa forma, redes de maiores dimensões podem ser formadas, uma vez que dispositivos que pertencem a área de cobertura desse CH mas estão fora do alcance de sinal de outros coordenadores, podem se integrar à rede a partir dele. Caso o dispositivo seja um RFD, ele se tornará uma folha da árvore, pois não possui a capacidade de incorporar outros dispositivos à rede.

A hierarquia formada entre os nodos determina as regras de co-

municação. Um nodo folha pode se comunicar diretamente somente com o seu predecessor na árvore, enquanto que um CH pode se comunicar com seus filhos e o seu pai (que é outro coordenador). Normalmente, o fluxo de dados segue o sentido de baixo para cima na árvore em direção à estação base.

2.2 CAMADA FÍSICA (PHY)

A camada física é responsável pela transmissão dos dados através de ondas de rádio. Conforme mostrado na Tabela 1, o IEEE 802.15.4 suporta três interfaces de rádio que utilizam diferentes bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). A frequência de 2.4 GHz está disponível em escala global, enquanto as demais são restritas a determinadas regiões.

As bandas ISM se caracterizam por apresentarem um amplo espectro de alocação, permitindo que diferentes RSSF compartilhem a mesma frequência. Ademais, por não estarem condicionadas a um padrão em particular, oferecem maior liberdade para o desenvolvimento de estratégias que visam a economia de energia em uma RSSF.

Tabela 1 – Interfaces de rádio suportadas pelo IEEE 802.15.4.

Frequência	Taxa de transmissão de dados
868 MHz ISM	20 kbps
915 MHz ISM	40 kbps
2.4 GHz ISM	250 kbps

Por proporcionarem melhor sensibilidade ao canal, baixas frequências são mais adequadas para transmissões de longas distâncias, pois reduzem as perdas de propagação. Por outro lado, altas frequências implicam em uma maior vazão e uma menor latência na comunicação.

As principais tarefas e características da camada PHY são:

- **Ativação e desativação do transceptor de rádio:** o transceptor pode operar em um dos três modos: transmitindo, recebendo ou *sleeping* (quando o nodo é colocado em um estado de baixo consumo energético, não contribuindo com a atividade da rede). Dependendo da solicitação da subcamada MAC, o rádio pode ser ligado ou desligado.
- **Detecção de energia no canal (*Energy Detection* - ED):** estimativa da energia do sinal recebido. É utilizado por outra

atividade da camada PHY, o *Clear Channel Assessment (CCA)* e também pelo algoritmo de seleção do canal na camada de rede.

- **Link Quality Indication (LQI):** caracteriza a qualidade do sinal recebido em um enlace. Pode ser usado pelas camadas de rede e de aplicação para a implementação de suas políticas, como por exemplo, aceitação/descarte de uma mensagem.
- **Clear Channel Assessment (CCA):** é responsável por reportar o estado do meio (ocioso ou ocupado) sendo essencial para a implementação do protocolo CSMA/CA. O CCA pode ser realizado de três formas:
 - Modo de detecção de energia: o CCA reporta que o canal está ocupado quando detecta energia acima de um limiar (ED) no canal.
 - Modo de detecção de portadora: o CCA reporta que o canal está ocupado apenas se ele detecta um sinal com as mesmas características definidas no IEEE 802.15.4, não importando o valor de ED.
 - Modo de detecção de portadora com modo de detecção de energia: é a combinação dos dois métodos anteriores.
- **Seleção de frequência do canal:** o IEEE 802.15.4 define 27 diferentes canais e a rede pode optar por operar em um conjunto desses canais. A tarefa da camada PHY é configurar o transceptor para um canal específico, previamente determinado pela subcamada MAC.

2.3 SUBCAMADA MAC

A troca de informação entre dois ou mais elementos computacionais pode ocorrer sobre uma variedade de meios físicos, chamados canais. Um canal pode ser um simples cabo de par trançado, coaxial ou óptico, facilmente encontrado em redes de computadores locais (*Local Area Networks* - LANs), ou até mesmo o ar atmosférico, como é o caso das RSSF.

Por ser um canal de múltiplo acesso, se for permitido que os nodos de uma RSSF transmitam dados sempre que eles desejarem, inevitavelmente acontecerão transmissões simultâneas entre diferentes nodos sobre o mesmo canal, ocasionando as chamadas colisões. Quando

ocorre uma colisão as mensagens dos diferentes nodos se sobrepõem, impossibilitando a extração correta das informações pelos receptores.

Portanto, pelo fato do canal de comunicação ser compartilhado, uma questão fundamental é como gerenciar e coordenar o acesso ao meio, evitando ou detectando essas colisões. No IEEE 802.15.4 esse papel é atribuído à subcamada MAC. Nela é definido o protocolo CSMA/CA para controle e gerenciamento do acesso ao meio, cujo propósito é maximizar a probabilidade de sucesso da transmissão dos dados na rede.

Além disso, a subcamada MAC também é responsável por efetuar a associação e dissociação entre os dispositivos, bem como prover a estrutura para o desenvolvimento de soluções de segurança para as aplicações. Ela deve dar suporte à Qualidade de Serviço (QoS) e executar preferencialmente algoritmos descentralizados, superando a não confiabilidade dos sensores individuais e mantendo a escalabilidade da rede (STANKOVIC et al., 2003).

Conforme mostrado na Figura 4, o padrão IEEE 802.15.4 suporta dois modos de operação, com *beacon* e sem *beacon*. Essa escolha é efetuada previamente pelo PC ao se configurar a rede e irá determinar o mecanismo de comunicação a ser utilizado (CSMA/CA com ou sem compartimentos).

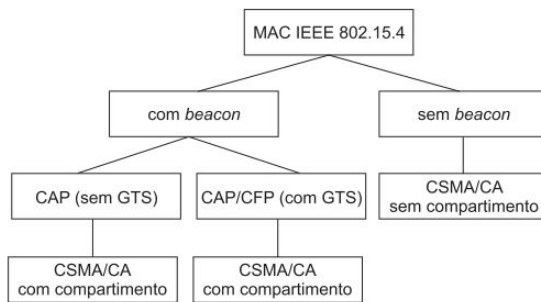


Figura 4 – Modos de operação da subcamada MAC do padrão IEEE 802.15.4. Fonte: Semprebom (2012).

2.3.1 Modo de operação com *beacon*

Um *beacon* é um quadro especial enviado periodicamente pelos coordenadores para sincronizar os dispositivos e identificar a PAN. Ele também contém a estrutura do superquadro, definida pelo coordena-

dor e que é adotada para gerenciar a comunicação quando o modo de operação com *beacon* é habilitado.

O superquadro é o intervalo de tempo correspondente a 16 compartimentos (do Inglês, *slots*) do mesmo tamanho no qual os nodos que compõem a rede podem transmitir. O *beacon* faz parte do primeiro compartimento do superquadro. Um período inativo pode existir após o superquadro no qual os nodos desligam os seus rádios de comunicação entrando em um estado de baixo consumo energético (Figura 5).

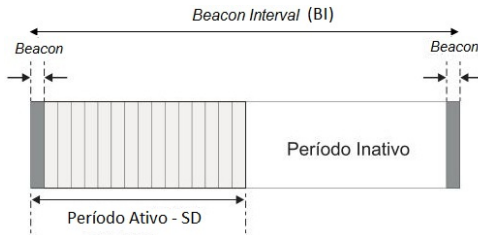


Figura 5 – Estrutura do superquadro. Fonte: Adaptado de Semprebom (2012).

A relação do tamanho do período ativo frente ao do período inativo corresponde ao ciclo de trabalho (do Inglês, *duty cycle*) da rede, e é determinada pela aplicação. Essa característica é bastante pertinente para as RSSFs, onde a economia de energia dos nodos é essencial para o prolongamento do tempo de vida da rede.

A frequência de transmissão dos quadros de *beacon* é denominada *Beacon Interval (BI)* e é dependente do valor do *Beacon Order (BO)*. O BI pode ser calculado a partir da Equação 2.1.

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO}, \text{ para } 0 \leq BO \leq 14 \quad (2.1)$$

O período ativo sempre contém o chamado Período de Acesso com Contenção (*Contention Access Period - CAP*), no qual todos os dispositivos que queiram se comunicar irão competir entre si pelo acesso ao canal usando o CSMA/CA com compartimentos. Todas as transações envolvendo troca de mensagens entre os nodos devem ser completadas nesse intervalo. Entretanto, diferentemente do que ocorre com o protocolo Aloha (ABRAMSON, 1970), por exemplo, o CSMA/CA com compartimentos permite um melhor aproveitamento do canal de comunicação, visto que um nodo não necessita aguardar o início de um compartimento para iniciar sua transmissão e nem concluí-la antes

do término desse compartimento. Caso contrário, a rede suportaria a transmissão de no máximo 16 nodos simultaneamente por CAP (valor correspondente ao número máximo de compartimentos disponíveis).

A duração do superquadro (*Superframe Duration* - SD), ou seja, o tempo de acesso ao canal concedido para a comunicação entre um coordenador e os nodos a ele associados, pode ser obtida através da Equação 2.2 e é uma consequência do valor do *Superframe Order* (SO) escolhido.

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO}, \text{ para } 0 \leq SO \leq BO \leq 14 \quad (2.2)$$

O parâmetro *aBaseSuperframeDuration* que aparece nas Equações 2.1 e 2.2 denota a duração mínima do superquadro. O padrão IEEE 802.15.4 fixa seu valor em 960 símbolos (um símbolo corresponde a 4 bits). Para dispositivos que se comunicam a uma frequência de 2.4 GHz esse valor corresponde a 15.36 ms.

Se existir a necessidade de provimento de alguma garantia, como por exemplo, baixas latências para aplicações com restrições temporais, pode-se opcionalmente habilitar o Período Livre de Contenção (*Contention Free Period* - CFP). O CFP consiste na alocação de compartimentos garantidos (*Guaranteed Time Slots* - GTSs), os quais possibilitam o oferecimento de larguras de banda bem definidas.

Conforme mostrado na Figura 6, o CFP é uma parte do superquadro que se inicia imediatamente após o término do CAP. De acordo com a especificação do IEEE 802.15.4, o PC pode alocar no máximo sete GTSs, sendo que cada um pode ocupar mais de um compartimento de forma contígua. Além dessa restrição, outra desvantagem é que o GTS só pode ser utilizado para comunicação ponto-a-ponto entre o PC e outro nodo a ele associado (não está prevista no padrão a comunicação direta entre os nodos).

A subcamada MAC necessita de um tempo para processar os dados recebidos da camada PHY. Portanto, a transmissão de dois quadros sucessivos por um dispositivo deve ser separada por ao menos um *Interframe Spacing* (IFS) para evitar que a subcamada MAC tenha que descartar um dado por estar processando outro.

2.3.2 Modo de operação sem *beacon*

Quando $BO = SO = 15$, a estrutura do superquadro não existirá e a rede irá operar no modo sem *beacon*. Nesse caso, o algoritmo CSMA/CA sem compartimentos é utilizado para controlar o acesso ao

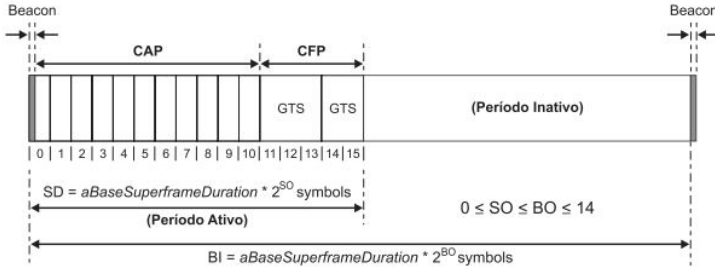


Figura 6 – Estrutura do superquadro com CAP e CFP. Fonte: Adaptado de IEEE (2011).

meio físico. Logo, os tempos dos diferentes nodos não estarão alinhados, ou seja, não haverá sincronia entre os dispositivos. Assim, não haverá relação direta entre o tempo de espera dos diferentes nodos para verificar se o canal está livre após uma tentativa de transmissão malsucedida.

2.3.3 Protocolo CSMA/CA

Conforme mencionado no início da seção 2.3, o problema central nos enlaces de múltiplo acesso é determinar qual o dispositivo que irá transmitir em um determinado tempo. Uma abordagem tradicionalmente empregada em LANs Ethernet é o CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*).

O CSMA é um protocolo probabilístico, baseado na detecção de portadora (*carrier sense*), no qual um nodo “escuta” o meio para verificar a existência de outros tráfegos antes de fazer a sua transmissão. Caso o canal esteja ocioso, o nodo envia sua mensagem (quadro) imediatamente; porém, caso ele detecte a presença de um sinal de outro dispositivo, o envio de sua mensagem é postergado. O nodo irá então monitorar constantemente o meio até que a transmissão em andamento seja concluída, momento no qual enviará o quadro. Por esse motivo, esse modo de acesso empregado pelo CSMA é chamado de 1-persistente (100% de probabilidade de transmissão após detectar que o canal está ocioso).

Entretanto, em ambientes sem fio, essa característica de “escuta” contínua do meio tem um alto custo associado. No caso das RSSF, essa técnica se mostra inadequada pois eleva demasiadamente o consumo

energético dos nodos, algo que é altamente indesejável para esse tipo de rede. Por esse motivo, as RSSF utilizam uma variação do CSMA conhecida como CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), a qual tenta evitar que uma colisão ocorra ao invés de posteriormente ter que detectá-la. Para atingir esse objetivo, os nodos devem esperar um tempo aleatório (chamado *backoff*) antes de verificar a disponibilidade do canal. Nesse período, o rádio pode ser desligado para poupar energia dos nodos.

O padrão IEEE 802.15.4 estabelece duas versões do CSMA/CA: com e sem compartimentos (*slots*). O primeiro é utilizado no modo com *beacon* e o segundo no modo sem *beacon*. O princípio básico de funcionamento de ambas as versões é o mesmo. Porém, no modo com *beacon*, o limite do período de *backoff* de cada dispositivo deve estar alinhado com o limite de um *slot* do superquadro do seu coordenador. Dessa forma, o CSMA/CA com compartimentos tem uma complexidade um pouco maior, pois auxilia na manutenção da sincronia entre os nodos.

Três variáveis estão envolvidas com o processo de escalonamento do meio no protocolo CSMA/CA:

- NB - *Number of Backoffs*: representa o número de vezes que o algoritmo CSMA/CA, na tentativa de acessar o canal, foi obrigado a entrar em *backoff*. Seu valor deve ser inicializado em zero antes da transmissão de cada nova mensagem.
- CW - *Contention Window*: a janela de contenção é dividida em uma série de compartimentos de mesmo tamanho, sendo numerados de 0 até CW. Para reduzir a probabilidade de colisão, um nodo escolhe aleatoriamente um valor entre $[0, CW]$ para configurar seu tempo de *backoff*. Além disso, o CW é utilizado para determinar a quantidade de vezes em sequência que o CCA deve reportar que o canal está ocioso antes do dispositivo começar a sua transmissão. Isso é feito com o intuito de prevenir potenciais colisões de quadros de reconhecimento, sendo por esse motivo utilizado somente na versão do CSMA/CA com compartimentos. Cada vez que o canal é detectado como ocupado, o CW é reiniciado novamente para o seu valor inicial.
- BE - *Backoff Exponent*: valor utilizado pela função de cálculo do *backoff* $[0, 2^{BE} - 1]$, o qual estabelece um limite superior para esse tempo de espera.

O fluxograma da Figura 7 sintetiza o modo de operação do

CSMA/CA com compartimentos. Conhecido como *Binary Exponential Backoff* (BEB), o algoritmo que define o seu funcionamento pode ser dividido nas seguintes etapas (o número entre parênteses no fluxograma da Figura 7 corresponde ao início de cada etapa):

1. Primeiramente, a subcamada MAC deve inicializar as variáveis NB, CW e BE. O valor padrão inicial de NB é 0 e de CW é 2. Se o dispositivo não for configurado para estender a vida útil da bateria, então BE será inicializado com o valor mínimo previamente estabelecido (*macMinBE*). Caso contrário, o BE será o menor valor entre 2 e o *macMinBE*. Logo na sequência, o algoritmo busca determinar o limite para o próximo período de *backoff*, de acordo com o *slot* atual do superquadro.
2. Espera aleatória para evitar colisões: o algoritmo determina o tempo que um dispositivo deve esperar para avaliar novamente a atividade do canal. O intervalo de números a partir do qual esse novo *backoff* será estabelecido obedece a função $[0, 2^{BE} - 1]$. O tempo total de *backoff* será o resultado da multiplicação do valor aleatoriamente selecionado dentro desse intervalo pelo *Backoff Period* (BP), que é a unidade básica de tempo e corresponde a 0,32 ms.
3. Após o término do período de *backoff*, a subcamada MAC requisita à camada PHY que execute o CCA, o qual deve ser iniciado no limite do período de *backoff*.
4. Se o canal é detectado como ocupado, CW é reiniciado para 2 e NB e BE são incrementados em uma unidade. Entretanto, BE não pode ultrapassar seu valor máximo previamente definido (*macMAXBE*). A cada aumento do BE, o máximo da função que regula o cálculo do *backoff* cresce exponencialmente. A tendência é que o aumento desse intervalo espalhe os *backoffs* dos diferentes dispositivos, diminuindo a probabilidade de ocorrerem novas colisões e, conseqüentemente, melhorando a chance de sucesso das futuras transmissões. Se NB for menor que o número máximo de *backoffs* sucessivos permitidos à um dispositivo (*macMAXCS-MABackoffs*), uma nova tentativa de transmissão será realizada e o algoritmo retorna a etapa 2. Caso contrário o algoritmo encerra com um erro de falha ao acessar o canal.
5. Porém, se o canal é avaliado como ocioso, o MAC decrementa o valor de CW em uma unidade. Caso CW for diferente de 0, o

algoritmo voltará ao passo 3 para executar uma nova verificação do canal. No momento em que CW for igual a 0, o MAC está apto a iniciar a transmissão do seu quadro no limite do próximo período de *backoff*, desde que toda a transação (envio da mensagem e resposta de reconhecimento) possa ser finalizada antes do término do CAP. Se esse não for o caso, a transmissão é postergada para o CAP do próximo superquadro.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O IEEE 802.15.4 possui como características as baixas taxas de transmissão e o baixo consumo energético. O modo de operação com *beacon* oferecido pelo MAC do IEEE 802.15.4 possibilita manter a sincronia entre os nodos, habilitando a formação de redes densas, capazes de cobrir extensos territórios. Apesar da especificação do IEEE 802.15.4 citar a possibilidade do uso de topologias *cluster tree*, a maior parte de seus mecanismos não são por ela definidos, sendo delegados para outros padrões, como o ZigBee.

O protocolo CSMA/CA para controle de acesso ao canal reduz efetivamente o número de colisões, possibilitando uma boa vazão de dados à rede. O padrão fornece a possibilidade de serem utilizados compartimentos de tempo garantidos, tornando-o útil para diversas aplicações de tempo real. A possibilidade de ser definido um período inativo, no qual os nodos “dormem” para economizar energia, contribui para o aumento do tempo de vida da rede. Em virtude dessas características o padrão IEEE 802.15.4 tem sido amplamente utilizado pelas RSSFs, as quais são o foco do próximo capítulo.

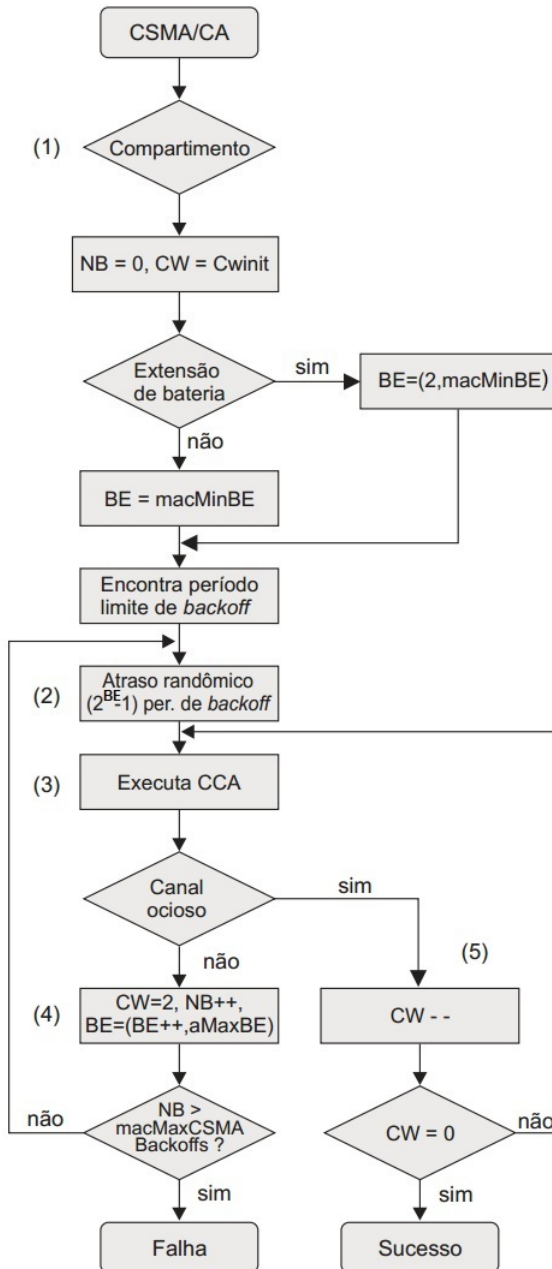


Figura 7 – Algoritmo *Binary Exponential Backoff* para o CSMA/CA com compartimentos. Fonte: Semprebom (2012), adaptado de IEEE (2011).

3 REDES DE SENSORES SEM FIO

Sensores são dispositivos que medem uma grandeza física e a convertem em sinais mensuráveis, os quais podem ser processados e analisados. Diferentes propriedades físicas, as quais estão sujeitas às constantes variações decorrentes de mudanças no ambiente, podem ser monitoradas, como temperatura, pressão, luminosidade, umidade, radiação, entre outros (ELMENREICH, 2002; DARGIE; POELLABAUER, 2010).

A evolução dos Sistemas Microeletromecânicos (*Microelectromechanical Systems* - MEMS), possível graças à contínua miniaturização dos processadores, em conjunto com a modernização da comunicação sem fio, proporcionaram o surgimento dos chamados “sensores inteligentes”¹ ou nodos sensores (AKYILDIZ et al., 2002; YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008; DARGIE; POELLABAUER, 2010).

Nodos sensores são elementos computacionais que, além de possuírem um ou mais tipos de sensores, são equipados com processador, memória, fonte de energia (geralmente uma bateria) e módulo de comunicação sem fio de curto alcance (Figura 8). Suas principais características são o tamanho reduzido, as severas restrições dos recursos, principalmente de energia, e a redução significativa do seu custo quando comparado aos sensores tradicionais (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

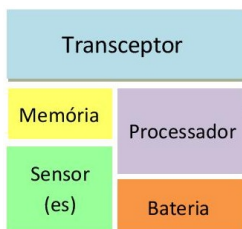


Figura 8 – *Hardware* de um nodo sensor. Fonte: Adaptado de Loureiro et al. (2003).

A disseminação no uso de nodos sensores e o emprego desses em novas aplicações deram origem ao paradigma das Redes de Sensores

¹Formalmente, essa denominação é aplicada para referenciar o *chip* que contém todos os módulos necessários para medir, processar, armazenar e transmitir os dados obtidos do ambiente. Contudo, o termo sensor também é comumente empregado com esse propósito, sendo utilizado como sinônimo.

sem Fio (RSSFs). Na literatura científica há diversas definições para o conceito de RSSF. A definição mais comum teve origem em meados dos anos 1990 e assume que o custo dos nodos sensores iria cair muito rapidamente, fazendo surgir aplicações nas quais milhares desses dispositivos pudessem ser implantados no ambiente de forma aleatória.

Seguindo essa ideia, uma Rede de Sensores sem Fio (RSSF) pode ser definida como um tipo de rede de computadores *ad-hoc*², composta por uma grande quantidade desses nodos de baixo custo (STANKOVIC et al., 2003; YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Esses sensores são dispostos em um ambiente a ser monitorado e, normalmente, trocam dados a fim de construir uma visão global da região de interesse. Conforme ilustrado na Figura 9, uma ou mais estações base (sorvedouros) servem como interface da rede para o usuário do sistema.

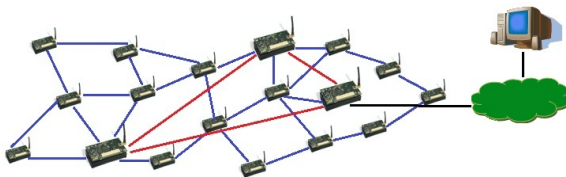


Figura 9 – Uma configuração típica de uma RSSF. Os nodos ampliados representam as estações base.

Uma rede *ad hoc* ou não estruturada pode ter seus nodos espalhados de forma aleatória, favorecendo a implantação de redes densas em locais inóspitos e de difícil acesso. A inserção de centenas ou milhares de sensores de baixo custo oferece algumas vantagens significativas quando comparado ao uso de poucos nodos confiáveis e de custo elevado, como: facilidade de implantação; maior resolução espacial; cobertura uniforme; redundância, acarretando em uma alta robustez contra falhas; e o aumento do tempo de vida da rede (HAENGGI, 2005).

A interação intrínseca com o ambiente confere as RSSF uma ampla utilidade prática, permitindo o desenvolvimento de inúmeras aplicações para as mais diferentes áreas, como por exemplo: em sistemas de segurança críticos, para detecção de alvos e vigilância; monitoramento ambiental, como auxílio na detecção de incêndios, enchentes,

²Redes *ad-hoc* são redes que não possuem uma infraestrutura responsável por coordenar a comunicação, por exemplo, um ponto de acesso. Assim, os nodos são capazes de trocarem dados diretamente entre si e podem ser disseminados de forma aleatória no ambiente, não exigindo um local fixo para sua implantação (LI et al., 2001).

atividades vulcânicas e catástrofes em geral; agricultura de precisão; monitoramento e proteção da infraestrutura civil, como pontes e túneis; área da saúde e até mesmo em sistemas de entretenimento, como parques de diversão e museus (AKYILDIZ et al., 2002; STANKOVIC et al., 2003; HAENGGI, 2005; DARGIE; POELLABAUER, 2010).

Na maioria das aplicações de RSSF assume-se que os nodos são implantados de forma aleatória e precisam operar autonomamente, possibilitando a utilização dessas redes em ambientes hostis. Ademais, espera-se que o tempo de vida dessas redes seja o maior possível. Essas características exacerbam preocupações já existentes em sistemas distribuídos tradicionais. Requisitos de economia de energia, tempo real, tolerância a alta ocorrência de faltas e aspectos não controláveis do meio são alguns exemplos (STANKOVIC et al., 2003). Além disso, outros fatores que influenciam no projeto das RSSF é a preocupação com a escalabilidade, a segurança e as severas restrições de *hardware* dos nodos (AKYILDIZ et al., 2002).

Além das condições adversas do ambiente, a quantidade elevada de nodos comunicando-se através de uma rede sem fio e que possuam tantos objetivos distintos (eficiência energética, auto-organização, requisitos temporais e tolerância a faltas) dificulta a manutenção dos nodos, como a troca de suas baterias (AKYILDIZ et al., 2002; DARGIE; POELLABAUER, 2010).

Células de fonte de energia alternativa, como a solar, podem ser acopladas aos sensores. Mesmo assim, a conservação de energia permanece como uma questão chave nas RSSF. Por conseguinte, essas redes devem apresentar soluções que buscam um compromisso entre atingir as metas de desempenho específicas da aplicação e, simultaneamente, tentar maximizar o tempo de vida da rede (STANKOVIC et al., 2003; YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). O tempo de vida da rede, de uma forma geral, pode ser visto como a principal métrica a ser considerada em qualquer abordagem desenvolvida para as RSSF.

Por todos esses fatores supracitados é imprescindível que a rede opere de forma autônoma, sem a intervenção humana. Nesse caso, protocolos e algoritmos com propriedades de autogerenciamento são extremamente importantes, pois confere a rede a capacidade de se adaptar às mudanças ocorridas no ambiente bem como no próprio sistema. Um cuidado especial deve ser tomado ao projetá-los de forma a não incorrer em excessivos *overheads* que reduzam rapidamente a capacidade da bateria dos nodos, comprometendo o tempo de vida útil da rede (DARGIE; POELLABAUER, 2010).

Uma evolução natural no emprego das RSSF foi sua aplicação

em ambientes onde é possível a implantação de nodos de forma pré-planejada. Um exemplo é o uso das RSSFs em ambientes industriais, dando origem ao que hoje é chamado de RSSF Industriais (do inglês, *Industrial Wireless Sensor Network*). Outro exemplo é encontrado no uso de RSSF em aplicações de agricultura de precisão (DARGIE; POELLA-BAUER, 2010). Nessas aplicações, posições fixas podem ser atribuídas aos nodos *a priori*, durante o projeto da rede, permitindo que a cobertura espacial da área monitorada seja otimizada (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

3.1 MODELO FUNCIONAL DE UMA RSSF

O ciclo de vida de uma RSSF compreende cinco grupos de atividades, conforme ilustrado na Figura 10. Com exceção da fase de Configuração, que é a primeira a ocorrer, as demais podem estar ativas em diferentes momentos do tempo de vida da rede e são totalmente independentes.

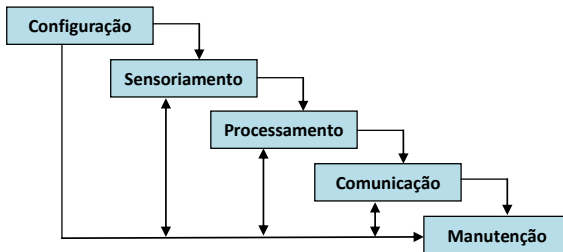


Figura 10 – Ciclo de vida de uma RSSF. Fonte: Adaptado de Loureiro et al. (2003).

A etapa de Configuração engloba todas as tarefas relacionadas ao projeto da RSSF, as quais são dependentes da aplicação. Algumas dessas atividades são: definir os requisitos da aplicação; determinar a forma e o tamanho da área de monitoramento; definir quais sensores serão necessários de acordo com as características do ambiente a ser monitorado; definir o tipo de RSSF a ser implantada. Além disso, todo processo de disseminação dos nodos bem como a construção da rede (descoberta de localização dos nodos e a formação da topologia) também fazem parte desse processo (RUIZ; NOGUEIRA; LOUREIRO, 2005).

Nesse contexto, fica evidente uma mudança de paradigma das RSSF quando comparada às redes tradicionais: como a aplicação nor-

malmente tem interesse em um valor associado a uma região específica, não importando qual nodo irá enviar aquela informação, pode-se dizer que as RSSF são centradas a dados e não a endereços. Essa característica é extremamente importante, pois, em virtude da elevada quantidade de nodos que comumente compõe uma RSSF, a utilização de um identificador global para cada sensor causaria um enorme sobrecusto no tamanho do cabeçalho das mensagens (devido ao número de bits necessários em cada identificador) (AKYILDIZ et al., 2002; STANKOVIC et al., 2003; RUIZ; NOGUEIRA; LOUREIRO, 2005).

A principal atividade desenvolvida na fase de Sensoriamento é a coleta de dados. Ela inclui a determinação da frequência de amostragem, o volume de dados gerado e o cálculo da área de cobertura dos sensores (LOUREIRO et al., 2003). De acordo com Ruiz, Nogueira e Loureiro (2005), uma RSSF pode ser classificada em termos da coleta de dados como: contínua, quando os nodos sensores coletam dados continuamente ao longo do tempo; periódica, quando é definido pela aplicação intervalos de tempo regulares nos quais os dados são obtidos; ou reativa, quando a rede detecta eventos no ambiente e os sensores agem em resposta a esses estímulos.

O processamento pode estar relacionado às atividades de suporte, como as envolvidas com os protocolos para o gerenciamento, comunicação e manutenção da rede; ou com as de dados, como compressão, criptografia, Agregação de Dados e Fusão de Sensores, estes dois últimos examinados em detalhes na Seção 3.5, a qual através da combinação de informações de diferentes sensores promove um aumento da qualidade do sensoriamento.

A fase de Comunicação está relacionada com a atividade de envio e recepção de dados. Elas são regidas pelos protocolos de comunicação, os quais definem a maneira como a informação será trocada. A determinação da topologia da rede, do controle de acesso ao canal e da frequência do sinal de transmissão são alguns exemplos. Devido à possibilidade de falhas na comunicação e nos próprios nodos, a topologia das RSSF é dinâmica e imprevisível (STANKOVIC et al., 2003; NAKAMURA; LOUREIRO; FRERY, 2007). Dessa forma, os protocolos tradicionais existentes não são adequados para esse tipo de rede.

Por fim, a etapa de Manutenção é encarregada de detectar falhas e degradações de desempenho na rede, oriundas do seu comportamento dinâmico – mudanças de topologia, variações de energia e falhas dos nodos. Por conseguinte, suas atividades estão relacionadas com as ações para realizar esse diagnóstico e tomar as devidas ações corretivas quando necessário. Por depender do conhecimento do estado atual da

rede, garantir a robustez e otimizar o desempenho do sistema não é uma tarefa trivial. A manutenção também está relacionada com as características de autogerenciamento da rede e tem por objetivo promover confiabilidade, disponibilidade e segurança dos dados para a aplicação, podendo também contribuir para o aumento do tempo de vida da rede (LOUREIRO et al., 2003; RUIZ; NOGUEIRA; LOUREIRO, 2005).

3.2 APLICAÇÕES

A flexibilidade das RSSFs, em virtude de suas características como facilidade de implantação, auto-organização e operação autônoma dos nodos, permite vislumbrar uma ampla gama de aplicações as quais eram inviáveis ou impossíveis de serem realizadas com sistemas sensores cabeados tradicionais (WANG; KAR, 2005).

A possibilidade de disseminação de centenas a milhares de pequenos sensores sem fio, baratos e auto-configuráveis, impulsionou o surgimento de inúmeras aplicações que envolvem o monitoramento colaborativo entre os nodos (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Nesta categoria se enquadram as RSSFs utilizadas para o monitoramento de pontes e prédios, as quais possibilitam a identificação de fadiga e estresse das estruturas dessas construções; para a agricultura de precisão, auxiliando na manutenção da concentração de fertilizante dentro dos limites tolerados; para o planejamento urbano, no controle das emissões de gases poluentes, como o CO_2 ; para o transporte terrestre, no controle de tráfego de veículos; para o monitoramento de gasodutos, cuja dificuldade de acesso exige um acompanhamento contínuo e não intrusivo; para o controle de temperatura em grandes prédios comerciais, entre muitas outras (AKYILDIZ et al., 2002; HAENGGI, 2005; WANG; KAR, 2005; DARGIE; POELLABAUER, 2010).

A manutenção de grandes plantas industriais também pode se beneficiar com a utilização de uma RSSF. O monitoramento da linha de produção deve ser eficaz de forma que os problemas por ela apresentados possam ser rapidamente detectados e corrigidos.

As RSSF também podem ser utilizadas para a prevenção de desastres naturais, como deslizamentos de terra e enchentes. Por ser um dos principais fatores que causam essas catástrofes, a chuva deve ser monitorada com precisão.

O Apêndice A apresenta duas aplicações que podem se beneficiar do uso de uma RSSF com capacidade de monitorar o ambiente de forma homogênea (com cobertura espacial uniforme). Em comum às duas

aplicações há a necessidade de se configurar a rede em topologias mais complexas, como a *cluster tree*. Apesar dos benefícios obtidos por esse tipo de formação, existem diversos desafios que precisam ser superados para a adoção dessa topologia, os quais são discutidos a seguir.

3.3 DESAFIOS DE UMA RSSF *CLUSTER TREE*

A implantação prática de uma RSSF organizada sob a topologia *cluster tree* apresenta inúmeros desafios. A comunidade científica carece da consolidação de protocolos que gerenciem desde a sua formação até a transmissão dos dados entre os *clusters*. Apesar do LEACH (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2002) ter se destacado como uma solução para a formação dos agrupamentos, ainda não é possível considerá-lo como o protocolo padrão para a realização dessa tarefa. Abordagens mais recentes como a proposta por Bandara, Jayasumana e Illangasekare (2011) ainda exploram esse assunto.

Um fator que deve ser levado em conta na formação de uma RSSF *cluster tree* é o dimensionamento da árvore de comunicação. A profundidade máxima da árvore, a quantidade de *clusters* e nodos por *cluster*, são parâmetros que devem ser controlados, pois podem impactar no desempenho da rede. Os requisitos de largura de banda e *buffer* crescem proporcionalmente com o aumento da profundidade da árvore (KOUBAA; ALVES; TOVAR, 2006). Além disso, o aumento da quantidade de saltos para que um nodo folha alcance a estação base, por exemplo, pode acarretar no aumento da latência para que uma mensagem chegue até ela. Portanto, manter a rede com a menor profundidade possível é altamente desejável.

A QoS da aplicação depende intrinsecamente dos valores de BI e SD adotados. Assim, uma decisão importante é determinar os valores adequados para os parâmetros BO e SO. Pode-se utilizar valores fixos para todos os *clusters* da rede ou eles podem ser ajustados de forma que os *clusters* mais próximos da raiz da árvore operem com maiores ciclos de trabalho, devido a necessidade de repassar os dados dos nodos inferiores a eles na hierarquia.

Um dos principais desafios de uma rede *cluster tree* é manter a sincronização entre os nodos. Se nenhum mecanismo for utilizado para escalonar os *beacons* periódicos dos diferentes coordenadores, em algum momento eles colidirão uns com os outros ou até mesmo com quadros de dados, caso um coordenador envie o seu *beacon* no período ativo de um *cluster* adjacente. Por conterem a especificação do superquadro é

imprescindível que os *beacons* não sejam corrompidos. Caso contrário, os nodos não conseguirão extrair corretamente essa informação, o que os impede de se comunicarem com os seus coordenadores. Os dois tipos de colisões que podem ocorrer são discutidos a seguir.

3.3.1 Colisão Direta

A colisão direta é um problema que ocorre quando dois ou mais coordenadores adjacentes, que estão no alcance de transmissão uns dos outros, enviam seus *beacons* aproximadamente ao mesmo tempo. Suponha que o nodo N da Figura 11 seja filho do coordenador $CH1$, o qual é vizinho direto do coordenador $CH2$. A transmissão quase que simultânea dos *beacons* dos coordenadores $CH1$ e $CH2$ resulta em uma colisão, fazendo com que o nodo N perca a sincronização com seu pai.

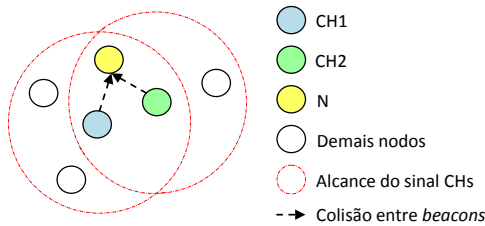


Figura 11 – Exemplo de colisão direta entre *beacons*.

3.3.2 Colisão Indireta

Este é um problema que ocorre quando dois ou mais coordenadores, que não podem escutar o sinal uns dos outros, mas são vizinhos indiretos (possuem parte do alcance dos seus sinais sobrepostos em um nodo intermediário), enviam os seus *beacons* concomitantemente. Conforme mostrado na Figura 12, o nodo N está situado em uma região cujos sinais dos coordenadores $CH1$ e $CH2$ se encontram. A colisão irá ocorrer no exato momento em que o nodo N interceptar os *beacons* desses coordenadores.

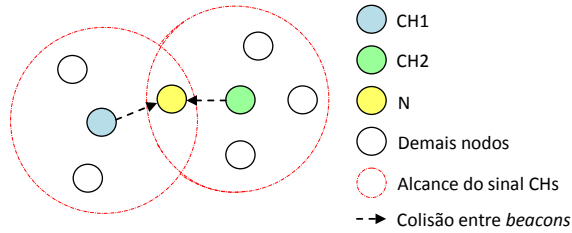


Figura 12 – Exemplo de colisão indireta entre *beacons*.

3.3.3 Abordagens para evitar a colisão de *beacons*

Existem diversas técnicas para evitar a colisão de *beacons* em redes *cluster tree*. As duas abordagens apresentadas a seguir geram escalas de deslocamento no tempo para a transmissão dos *beacons*. Elas são discutidas em (KOUBAA et al., 2006) e anulam completamente a possibilidade de ocorrerem colisões diretas.

3.3.3.1 Abordagem *Beacon-Only Period*

O *Beacon-Only Period* é uma janela de tempo estabelecida antes dos períodos ativos dos *clusters*, na qual ocorre a transmissão de todos os *beacons* sem contenção pelo meio de comunicação (Figura 13). Para cada coordenador é atribuído um compartimento de tempo diferente, de forma a evitar as colisões de *beacons*. A vantagem desse método é permitir que os superquadros de diferentes *clusters* possam iniciar ao mesmo tempo.

Um desafio para implementar essa técnica é dimensionar essa janela de tempo para uma topologia específica, a qual depende da aplicação e pode ser altamente dinâmica. O principal empecilho para a sua utilização é a sua incompatibilidade com o padrão IEEE 802.15.4. Inúmeras mudanças nesse padrão, principalmente na sua subcamada MAC, seriam necessárias para torná-lo adequado para suportar essa abordagem.

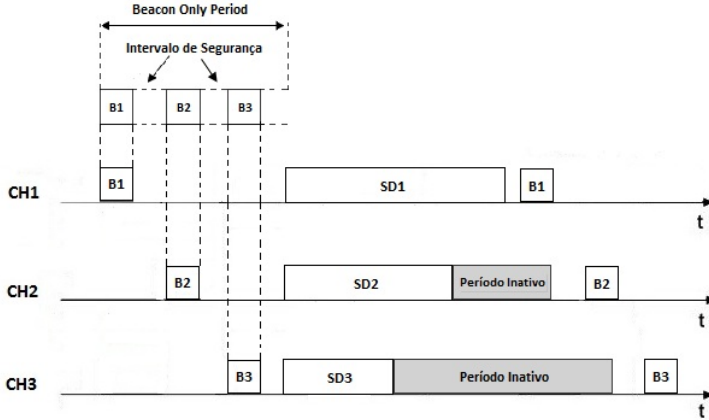


Figura 13 – Exemplo da abordagem *Beacon-Only Period*.

3.3.3.2 Abordagem *Time Division*

Nessa abordagem cada coordenador possui, imediatamente antes do início do seu superquadro, um tempo para a transmissão do seu *beacon*. Ao contrário do *Beacon-Only Period*, essa técnica requer modificações mínimas na especificação do IEEE 802.15.4, sendo muito mais simples de ser colocada em prática.

Conforme mostrado na Figura 14, um escalonamento serial é realizado de forma que o *beacon* de um determinado coordenador seja enviado no período inativo dos seus coordenadores vizinhos. O deslocamento temporal do *beacon* em relação ao início do BI é chamado de *beaconOffset*. Se os superquadros são organizados de forma que não se sobreponham, a transmissão de dados dos nodos de um *cluster* não sofrerá influência dos *clusters* adjacentes, evitando também as colisões dos *beacons* com quadros de dados.

Essa abordagem requer que os coordenadores estejam acordados no seu período ativo (para receber os dados dos nodos a eles subjugados) e também no período ativo de seus pais (para repassar essas informações recebidas). O algoritmo *Superframe Duration Scheduling* (SDS) realiza uma análise de escalonabilidade para o conjunto de SDs dos n coordenadores que compõem a rede de acordo com a Equação 3.1, onde DC é o ciclo de trabalho (*duty cycle*) de cada *cluster*. Se essa condição necessária for satisfeita, o conjunto é escalonável e uma escala é gerada. Caso contrário, um ou mais SDs precisam ser reduzidos ou o

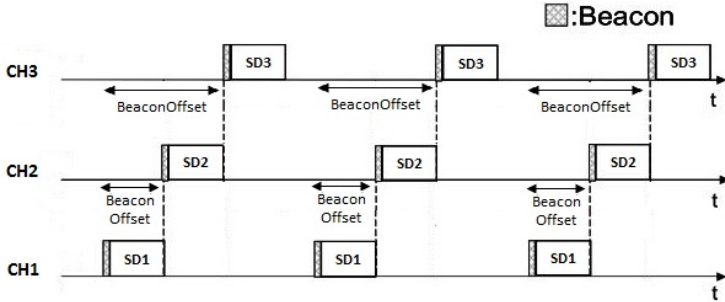


Figura 14 – Exemplo da abordagem *Time Division*.

BI precisa ser aumentado.

$$\sum_{i=1}^n DC_i = \sum_{i=1}^n \frac{SD_i}{BI} \leq 1 \quad (3.1)$$

A principal limitação dessa técnica é que ela resulta em baixos ciclos de trabalho, impondo longos períodos inativos entre os *clusters*. Entretanto, esse algoritmo pode ser otimizado para redes de larga escala. Coordenadores que estão distantes uns dos outros, de forma que seus alcances de transmissão não se sobreponham, podem transmitir seus *beacons* simultaneamente, sendo garantido que não ocorrerão colisões diretas ou indiretas.

Dessa forma, um agrupamento de coordenadores pode ser realizado, no qual CHs pertencentes ao mesmo grupo possuem o mesmo *beaconOffset*, permitindo que a rede tenha ciclos de trabalho superiores a um. Um algoritmo de coloração de grafos pode ser implementado pelo PC para otimizar o processo de formação desses grupos (KOUBAA et al., 2006).

Contudo, uma questão muito importante ainda não foi respondida: como determinar os valores dos parâmetros BI e SD? O BI normalmente é definido com base na periodicidade da aplicação e se mantém fixo para todos os coordenadores. Hurtado-López, Casilari, Ariza-Quintana (2009) propõe algumas estratégias para determinar o SD de cada coordenador, com o objetivo de otimizar a utilização do BI da rede. Todas elas possuem como premissa que a condição mostrada na Equação 3.1 seja satisfeita, a qual pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
BI &= aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \geq \\
\sum_{i=1}^n SD_i &= \sum_{i=1}^n aBaseSuperframeDuration * 2^{SO_i} \quad (3.2)
\end{aligned}$$

A solução mais simples é fazer uma equidistribuição do BI entre os coordenadores. Assim, todos os coordenadores possuem o mesmo tamanho de SD, ou seja, a mesma fatia de tempo para a transmissão dos seus dados. Neste caso, o valor de SO pode ser derivado a partir da Equação 3.2, resultando na seguinte expressão:

$$SO = \left\lfloor \log_2 \left(\frac{2^{BO}}{n} \right) \right\rfloor = \lfloor BO - \log_2 n \rfloor \quad (3.3)$$

Outra política também proposta em (HURTADO-LÓPEZ; CASILARI; ARIZA-QUINTANA, 2009) é priorizar o PC, atribuindo o seu SD como duas vezes o valor do SD dos demais coordenadores, visto que na maioria das vezes ele recebe o tráfego de toda rede.

O método mais flexível apresentado é baseado na topologia da rede, o qual permite projetar o SD de cada coordenador de acordo com a carga de tráfego esperada que ele suporte. Se todos os sensores geram a mesma quantidade de mensagens, por exemplo, os coordenadores com um maior número de sensores à ele associados terão um maior SD.

3.3.4 Injustiça no acesso ao canal de comunicação

O canal de comunicação é um recurso limitado e compartilhado entre os nodos da rede. No padrão IEEE 802.15.4, o algoritmo CSMA/CA é utilizado para dessincronizar as transmissões entre os nodos com o objetivo de reduzir o número de colisões e aumentar a vazão do sistema.

Uma função da subcamada MAC é garantir que essa largura de banda seja compartilhada de maneira justa entre os nodos. Entretanto, diversos fatores dificultam essa tarefa. O problema da estação “escondida”, por exemplo, reduz a imparcialidade da rede (WANG; KAR, 2005).

Considere o cenário descrito na Figura 15. Por estarem a uma distância na qual um nodo não é capaz de escutar o sinal do outro, diz-se que o nodo A está “escondido” do nodo C. Nesse caso, ambos podem transmitir simultaneamente uma mensagem, ocasionando uma colisão no nodo B.

Dessa forma, o nodo B possui uma probabilidade maior de detec-

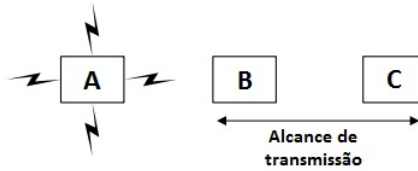


Figura 15 – Problema da estação escondida.

tar o canal ocupado. Casos extremos podem incorrer no problema da inanição. Supondo que os nodos A e C sempre tenham uma mensagem para transmitir e que o nodo A inicia o envio da sua mensagem antes do nodo C terminar a sua transmissão e vice-versa, se essa alternância entre eles permanecer indefinidamente, o nodo B encontrará o meio sempre ocupado, nunca tendo a oportunidade de ser escalonado para acessar o canal.

O algoritmo *Binary Exponential Backoff* (BEB), utilizado pelo CSMA/CA para ajustar o tamanho da janela de contenção *CW*, agrava o problema da injustiça no escalonamento do meio de comunicação. Nodos que possuam uma menor probabilidade de detectar o meio ocupado acabam sendo favorecidos, podendo sensoriar o canal muito mais frequentemente do que os demais.

Analisando novamente o cenário da Figura 15, a maior probabilidade do nodo B de detectar que o meio está ocupado, implica que ele permanecerá mais tempo em *backoff*. Ao esperar um tempo maior para poder avaliar novamente o estado do canal, a taxa efetiva de sucesso desses nodos na obtenção do acesso ao meio é muito menor.

Além disso, aspectos inerentes à topologia *cluster tree* também podem afetar a neutralidade da rede com relação ao número de mensagens enviadas por cada *cluster* que serão corretamente recebidas pelo PC. Pelo fato dos CHs disputarem o acesso ao meio de transmissão com os nodos vizinhos (sensores associados ao coordenador de nível superior com o qual ele se comunica), o número de mensagens de cada *cluster* que são encaminhadas para o nível superior é variável.

Inúmeras aplicações em RSSF demandam a implantação de uma alta densidade de sensores, com elevadas taxas de amostragem, para que seus requisitos possam ser atendidos. O congestionamento da rede em determinados momentos é praticamente inevitável, devido ao elevado número de mensagens que são trocadas entre os nodos.

Essa situação de sobrecarga ocasiona o acúmulo de mensagens nas filas dos CHs. Ao se adotar a política *First In First Out* (FIFO)

para coordenar esse tráfego de pacotes, descartes e atrasos de mensagens ocorrem de uma maneira desbalanceada. Dessa forma, a uniformidade do monitoramento é afetada, pois enquanto alguns *clusters* são beneficiados nas suas transmissões, outros são prejudicados. O uso de uma fila exclusiva para as mensagens de cada *cluster* contornaria esse problema, porém essa é uma solução estática e não escalável.

3.4 QUALIDADE DE SERVIÇO - QoS

Qualidade de Serviço (*Quality of Service* - QoS) é um conceito empregado neste trabalho para definir um conjunto de requisitos especiais que, ao serem atendidos, garantem um determinado nível de desempenho à aplicação. Muitas vezes a QoS também se refere ao processo de alocação de recursos. Uma porção da largura de banda pode ser reservada para um fluxo de dados específico, por exemplo, visando diminuir a latência fim-a-fim (YIGITEL; INCEL; ERSOY, 2011).

Conforme mostrado no modelo de QoS apresentado na Figura 16, o usuário está interessado somente nos serviços que a rede oferece, os quais devem atender seus requisitos, pois impactam diretamente na aplicação. Como a rede irá gerenciar seus recursos de forma a dar esse suporte é irrelevante para o usuário. Por outro lado, a perspectiva da rede é fornecer os serviços ao mesmo tempo em que otimiza a utilização de recursos (CHEN; VARSHNEY, 2004). No caso específico das RSSF, a principal preocupação geralmente é com a economia de energia dos nodos.

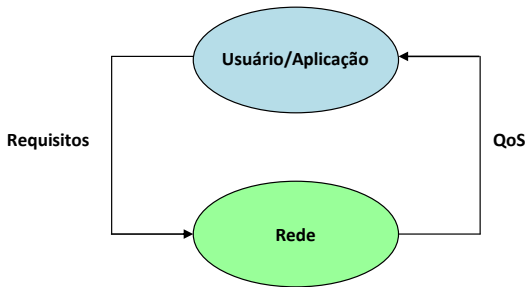


Figura 16 – Modelo de QoS.

As características inerentes as RSSF impõem desafios únicos para o provisionamento da QoS. O aumento dessa complexidade pode ser atribuída aos seguintes fatores:

- O constante empenho na busca por uma melhor eficiência energética, devido às severas restrições de energia dos nodos;
- O aumento da latência oriunda do uso de alguma técnica de fusão de sensores para diminuir a carga de mensagens na rede quando se faz uso da redundância dos dados para melhorar a confiabilidade da informação;
- Tráfego desbalanceado e topologia dinâmica da rede, oriundas de falhas nos nodos e nos canais de comunicação, da entrada e saída de nodos da rede por causa do esgotamento de suas baterias e até mesmo por interferências de outras redes;
- Manutenção da escalabilidade da rede. O suporte a QoS não deve degradar conforme a densidade de nodos na rede é aumentada.

Dessa forma, para fornecer os serviços demandados é crucial que o desempenho da rede vá além da política do melhor esforço. Os protocolos disponibilizados no IEEE 802.15.4 não são suficientes para garantir o cumprimento dos seus requisitos quando objetivos conflitantes são impostos pela aplicação. Mecanismos compensatórios devem ser empregados, como por exemplo, em situações em que é necessário atender aos *deadlines* das mensagens e, simultaneamente, maximizar o tempo de vida da rede. Soluções eficientes para provimento de QoS podem ser projetadas com mudanças mínimas no IEEE 802.15.4, desde que os requisitos da aplicação e os parâmetros de QoS estejam bem definidos.

3.4.1 Cobertura x Monitoramento Uniforme

A cobertura e o monitoramento uniforme podem ser vistos como métricas de QoS. Em geral, um dos principais objetivos das aplicações de RSSF é maximizar a cobertura, no sentido de que não existam regiões sem a presença de sensores para monitorá-la (MEGUERDICHIAN et al., 2001). Dessa forma, a QoS está relacionado com a determinação de uma quantidade mínima de nodos que devem estar ativos para periodicamente sensoriar o ambiente e reportar as suas medições para a estação base. Os demais nodos, por serem redundantes, podem entrar em modo *sleep*, desligando seus rádios de comunicação temporariamente para economizar energia.

Um conceito complementar é o de monitoramento uniforme. Essa métrica tem por finalidade determinar o quão homogêneo é o monitoramento. Nesse caso, a variável a ser controlada pela rede é a quantidade

de mensagens enviadas por cada região de interesse, a qual deve ser o mais próxima possível do valor exigido pela aplicação.

A Figura 17 é utilizada para ilustrar a diferença entre esses conceitos. A área monitorada é dividida em quatro regiões de mesmo tamanho, onde cinco sensores com o mesmo alcance de sensoriamento foram randomicamente distribuídos em cada uma delas. Assume-se que cada região é suficientemente pequena de forma que não há variações significativas entre as medições das leituras dos sensores por ela distribuídos, as quais são transmitidas diretamente para o coletor de dados.

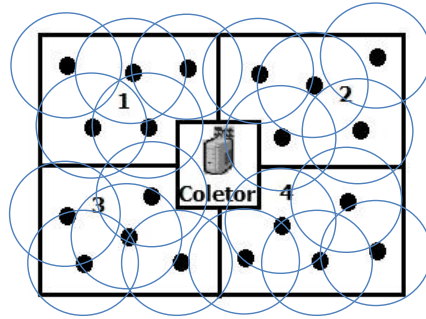


Figura 17 – Cenário usado para ilustrar os conceitos de cobertura e monitoramento uniforme. Os círculos delimitam o alcance do sinal de cada sensor.

Assim, uma RSSF baseada em nodos ideais, compostos por sensores confiáveis com um sinal de amplo alcance, poderia ser implementada com apenas um sensor ativo por cada região de monitoramento para manter a cobertura. Entretanto, RSSF para aplicações reais são normalmente organizadas de forma que vários sensores permaneçam ativos na mesma região visando reduzir a incerteza frente à leitura individual de um sensor (por exemplo, usando técnicas de fusão de sensores complementar).

Portanto, uma cobertura uniforme do monitoramento, a qual garante uma visão global e homogênea de toda área monitorada, é alcançada quando todas as regiões enviam aproximadamente a mesma quantidade de mensagens para o coletor em um determinado período de tempo.

3.4.2 Índice de Imparcialidade

Em geral, abordagens para escalonamento de recursos consideram a justiça (ou imparcialidade) como uma importante métrica de QoS. Jain, Chiu, Hawe (1984) propôs o Índice de Imparcialidade (II) como uma métrica para quantificar a imparcialidade na alocação de recursos para fluxos de pacotes em roteadores da Internet.

O cálculo do II é realizado através da Equação 3.4, onde r é a quantidade de recursos que é alocada para um fluxo de pacotes i e n é a quantidade total de fluxos que competem pelo recurso. O resultado dessa métrica é um valor entre $(0,1]$, onde valores próximos de 0 indicam uma alocação injusta e valores próximos de 1 significam que a alocação é imparcial.

$$II_{sistema} = \frac{\left[\sum_{i=1}^n r_i \right]^2}{n * \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (3.4)$$

Além da alocação de recursos na Internet, o II também pode ser aplicado em outros contextos. Em redes *cluster tree*, por exemplo, costuma haver um desbalanceamento no número de mensagens de cada *cluster* que alcançam a estação base ao término de cada BI. O II pode ser usado nesse cenário para determinar o quanto a rede está sendo justa no compartilhamento do canal de comunicação com relação aos diferentes *clusters* que compõem a rede.

Nesse contexto, os parâmetros da Equação 3.4 ganham novos significados. A variável r representa o número de mensagens enviadas pelo *cluster* i que são recebidas pela estação base (sendo neste trabalho chamada de *CES – Cluster Effectively Sent*) e n é o número de *clusters* que compõem a RSSF. A Tabela 2 mostra alguns resultados do II para uma rede composta por 5 *clusters* {c1,c2,c3,c4,c5} de acordo com a quantidade de mensagens recebidas de cada um deles.

No cenário 1, todos os *clusters* transmitem exatamente a mesma quantidade de mensagens. Dessa forma, o meio é acessado igualmente por todos os *clusters* e a rede é totalmente imparcial (II = 1). Nas demais situações (cenários 2,3,4 e 5) ocorre uma degradação do II que vai aumentando gradualmente quando a alocação do recurso se torna mais injusta. O caso extremo é alcançado quando os valores de II são próximos de 0, ocorrendo um problema muito comum em sistemas distribuídos: a inanição (*starvation*). Em redes *cluster tree* essa situa-

Tabela 2 – Índice de Imparcialidade.

Cenário	CES	II
1	{40,40,40,40,40}	1.00
2	{34,35,41,44,46}	0.98
3	{70,70,20,20,20}	0.72
4	{20,20,20,20,120}	0.50
5	{5,5,5,5,180}	0.24

ção pode ocorrer com os *clusters* que estão muito distantes da estação base, pois suas mensagens precisam de muitos saltos para alcançar seu destino.

3.4.2.1 Índice de Imparcialidade Ponderado

Conforme mostrado em (JAIN; CHIU; HAWE, 1984), a imparcialidade não significa necessariamente que deve haver uma distribuição equitativa dos recursos. Em alguns casos é justificável atribuir uma parcela maior dos recursos para alguns consumidores do que para outros. Nesses casos, a Equação 3.4 do II precisa ser adaptada para considerar a proporção (P), com relação a quantidade total de recurso disponível (r_t), que deveria ser alocado para cada consumidor i . O chamado Índice de Imparcialidade Ponderado (II_P) pode ser calculado através da Equação 3.5.

$$II_P = \frac{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{r_i}{P_i * r_t} \right) \right]^2}{n * \sum_{i=1}^n \left(\frac{r_i}{P_i * r_t} \right)^2} \quad (3.5)$$

No caso da Internet, por exemplo, é aceitável priorizar usuários que participam de uma vídeo conferência, oferecendo-lhes maior largura de banda, com a intenção de dar fluidez e evitar travamentos da chamada.

Da mesma forma ocorre com as RSSF. *Clusters* podem ser priorizados devido a sua maior importância para a aplicação em um determinado momento. No monitoramento de chuva, por exemplo, os *hotspots* (regiões cujo volume de precipitação começa a atingir níveis considerados acima do normal) necessitam de uma observação mais rigorosa.

Assim, os *clusters* responsáveis por monitorá-las devem enviar uma quantidade maior de amostras, a partir das quais o grau da potencial ameaça pode ser determinado com maior exatidão. Como consequência dessa maior redundância, o processo de tomada de decisão se torna mais confiável, permitindo que rápidas ações emergenciais sejam tomadas quando for necessário.

Para que alguns *clusters* possam aumentar a sua frequência de transmissão dos dados, os demais *clusters* pertencentes ao mesmo fluxo de comunicação devem contrabalancear esse aumento, reduzindo suas taxas de envio para evitar o congestionamento da rede. Assim, o monitoramento uniforme da rede é mantido mesmo com a demanda de diferentes requisitos de QoS pela aplicação.

3.5 FUSÃO DA INFORMAÇÃO

Uma maneira de melhorar a acurácia dos valores medidos é através da implantação de redes densas, devido a redundância nos nodos por ela promovida (ELMENREICH, 2002). Contudo, essa redundância leva a uma grande quantidade de dados brutos sendo gerados por múltiplas fontes em um curto período de tempo (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Transmiti-los diretamente para a estação base é altamente custoso e proibitivo, uma vez que a comunicação é um dos fatores que mais consome energia dos nodos (AKYILDIZ et al., 2002; STANKOVIC et al., 2003). O fato de muitas dessas medições estarem correlacionadas, devido tanto a proximidade entre os sensores quanto a sua natureza colaborativa, motivou o desenvolvimento de uma variedade de técnicas que visam diminuir a quantidade de mensagens que trafegam na rede.

Dasarathy propôs a utilização do termo fusão da informação (IF – *Information Fusion*) como o termo global para todos os aspectos da fusão de qualquer tipo de dado (DASARATHY, 2001). A IF engloba todas as técnicas utilizadas para a exploração da sinergia dos dados adquiridos de múltiplas fontes, como sensores, banco de dados, entre outros.

Um subconjunto da IF, conhecido como agregação de dados, tem por objetivo tão somente a redução do volume dos dados gerados. Para isso são empregadas simples funções de sintetização, como a mediana, média, valor máximo, entre outros. Entretanto, isso pode significar uma perda de precisão, condicionando seu uso à aplicação (NAKAMURA; LOUREIRO; FRERY, 2007).

Outro subconjunto da IF é a fusão de sensores, a qual opera so-

mente com dados provenientes de sensores. As técnicas utilizadas nessa classe combinam os dados brutos dos sensores, aproveitando-se da sinergia entre as medições para extrair informações mais precisas e robustas do fenômeno monitorado (NAKAMURA; LOUREIRO; FRERY, 2007). Essa filtragem facilita a interpretação dos resultados, aumentando a confiabilidade das leituras dos sensores e a qualidade das decisões.

Além disso, ao reduzir o tráfego de comunicação, evitando a transmissão de mensagens redundantes, a fusão de sensores proporciona uma economia de energia dos nodos e o conseqüente aumento da vida útil da rede (STANKOVIC et al., 2003; NAKAMURA; LOUREIRO; FRERY, 2007). Portanto, mesmo que haja alguns nodos faltosos, podem-se tomar decisões baseadas na rede como um todo. Esse é um dos paradigmas mais importantes das RSSF: a confiabilidade da rede e dos dados monitorados não é baseada em nodos individuais, mas sim no coletivo.

De acordo com o tipo de configuração dos sensores, a fusão de sensores pode ser dividida em três categorias, conforme mostrado na Figura 18:

- *Sensores competitivos (ou redundantes)*: são aqueles que medem a mesma propriedade, melhorando a confiabilidade da rede. A SF atua no refinamento dos dados, melhorando a precisão da informação obtida. Um exemplo de SF competitiva é a votação, na qual os sensores entram em um consenso para determinar qual dado melhor representa o conjunto.
- *Sensores complementares*: são aqueles que não dependem diretamente um dos outros, mas quando combinados fornecem um diagnóstico mais completo do fenômeno observado. Um exemplo é uma aplicação que utiliza múltiplos sensores para monitorar uma mesma propriedade em partes disjuntas de um ambiente.
- *Sensores cooperativos*: são sensores independentes mas que atuam de forma conjunta, possibilitando a extração de informações que seriam impossíveis de serem realizadas apenas com as suas medições individuais.

Dependendo da topologia de comunicação, a fusão de sensores pode ser efetuada de maneira paralela, serial ou híbrida (PATIL; DAS; NASIPURI, 2004). Quando os nodos se organizam sob a topologia estrela, uma fusão de sensores paralela é realizada pela estação base, após ela receber os dados diretamente de todos os sensores.

Por outro lado, a fusão de sensores serial, por fazer uso de técnicas de roteamento para coletar os dados através da rede, está associada

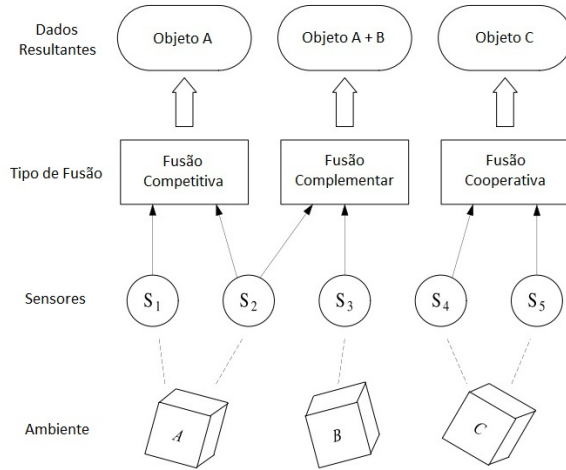


Figura 18 – Fusão de Sensores competitiva, complementar e cooperativa. Fonte: Adaptado de Elmenreich (2002).

com a ligação ponto a ponto dos nodos. O dado é refinado a cada transmissão, sendo combinado com as informações do nodo atual. O último elemento do caminho é responsável por tomar a decisão final.

Por fim, a fusão de sensores híbrida é a abordagem utilizada nos casos em que a rede está estruturada na forma de um *cluster tree*. Nessa técnica, uma fusão de sensores paralela é efetuada em cada CH, resultando em uma informação otimizada dos sensores à ele associados, enquanto que uma fusão de sensores serial é executada sobre esse novo resultado conforme ele é transmitido pelos CHs em direção à estação base.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as características, restrições e desafios das RSSFs. Um dos principais problemas é as severas restrições de energia dos nodos, fazendo com que praticamente todas as abordagens propostas para melhorar algum aspecto da QoS das RSSF (normalmente associadas a uma aplicação ou a um conjunto de aplicações em específico) tenham de considerar paralelamente a necessidade de prolongar o máximo quanto possível o tempo de vida da rede. Além disso, foi mostrado o ciclo de vida das RSSFs, detalhando-se cada uma

de suas etapas.

Muitas das aplicações que se beneficiam com a utilização de RSSFs envolvem o monitoramento colaborativo entre os nodos. Para permitir o monitoramento de vastos territórios e/ou para aumentar a redundância dos dados, trazendo maior confiabilidade para a aplicação, a maioria dessas aplicações demanda uma grande quantidade de nodos a serem implantadas, que por sua vez acarretam em uma grande quantidade de dados brutos sendo gerados. Técnicas de fusão da informação podem ser utilizadas para reduzir a quantidade de dados e, conseqüentemente, de mensagens a serem transmitidas na rede.

O monitoramento de chuva e de grandes plantas industriais se enquadra nessa categoria de aplicações. Foi mostrado como e por quê a topologia *cluster tree* pode ser adequada para a organização dos nodos nas RSSFs por elas utilizadas e também como o protocolo CSMA/CA pode ser injusto no compartilhamento do canal de comunicação.

Em seguida, foram mostrados que as RSSFs *cluster tree* possuem inúmeros desafios práticos para a sua implantação. Aspectos relacionados com a formação da topologia e, principalmente, com a manutenção da sincronia entre os nodos estão entre os principais problemas detectados.

A consolidação do IEEE 802.15.4 como padrão das camadas MAC e PHY das RSSFs, trouxe desafios para o provisionamento da QoS nessas redes. Os protocolos definidos no IEEE 802.15.4 não são suficientes para garantir o cumprimento dos requisitos de QoS quando objetivos conflitantes são impostos pela aplicação. A cobertura e o monitoramento uniforme podem ser vistos como duas métricas de QoS complementares, as quais visam garantir que toda a área esteja devidamente monitorada e esse monitoramento seja realizado de forma igualitária entre os nodos que compõem a rede. O Índice de Imparcialidade pode ser utilizado para mensurar a justiça com relação a utilização do canal de comunicação compartilhado.

No capítulo 4 são apresentados os principais trabalhos relacionados com as características e desafios das RSSFs discutidos neste capítulo.

4 TRABALHOS RELACIONADOS

Conforme discutido na seção 3.3, apesar das diversas vantagens da topologia *cluster tree*, principalmente em aplicações que envolvem um grande número de nodos em áreas de grande abrangência, existem grandes desafios para manter a sincronização desse tipo de rede. Ao mesmo tempo em que o padrão IEEE 802.15.4 possui algumas características que se enquadram perfeitamente com as necessidades das RSSF ele impõem desafios práticos para a implantação dessas redes. A camada MAC, por exemplo, não foi projetada para lidar com o provimento de QoS à aplicação (YIGITEL; INCEL; ERSOY, 2011). Dessa forma, diversos estudos foram feitos com o objetivo de responder perguntas, tais como:

- Qual é a melhor forma de organização dos *clusters* em uma RSSF *cluster tree* e quais são os passos necessários para a formação da rede?
- Como será feita a transmissão dos *beacons* de forma a evitar colisões diretas e indiretas?
- Como melhorar o desempenho da camada MAC em termos de suporte à QoS tanto do ponto de vista da comunicação (ex. atrasos, perdas de mensagens) quanto do sensoriamento (ex. cobertura espacial uniforme)?
- Como pode ser obtido um balanceamento entre o consumo de energia dos nodos e a necessidade de um baixo atraso fim-a-fim devido a existência de mensagens com rígidas restrições temporais?

Neste capítulo são apresentados alguns dos principais trabalhos encontrados na literatura que propõem soluções para esses problemas, os quais estão direta ou indiretamente relacionados com a abordagem proposta.

4.1 LEACH

O *Low-energy Adaptive Clustering Hierarchy*, LEACH, proposto em (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2002), é uma arquitetura que habilita a formação de uma RSSF *cluster tree*

através da auto-organização dos nodos em *clusters*. O papel de CH é periodicamente alternado entre os nodos da rede. A probabilidade de cada nodo de se tornar um CH é função da sua energia residual. Assim, a tendência é que todos os nodos esgotem suas baterias aproximadamente ao mesmo tempo. Além disso, o LEACH emprega técnicas de pré-processamento de dados (funções de agregação e compressão) que também colaboram para o aumento do tempo de vida da rede.

A operação do LEACH é dividida em rodadas. Cada rodada possui uma fase de configuração (na qual os *clusters* são formados) seguida por uma etapa de estabilidade da rede, na qual os dados dos nodos são transmitidos para seus CHs que por sua vez os enviam para a estação base.

O LEACH utiliza um algoritmo distribuído para a formação dos *clusters*, de forma que os nodos tomam suas decisões autonomamente. O fluxograma da Figura 19 resume as suas operações.

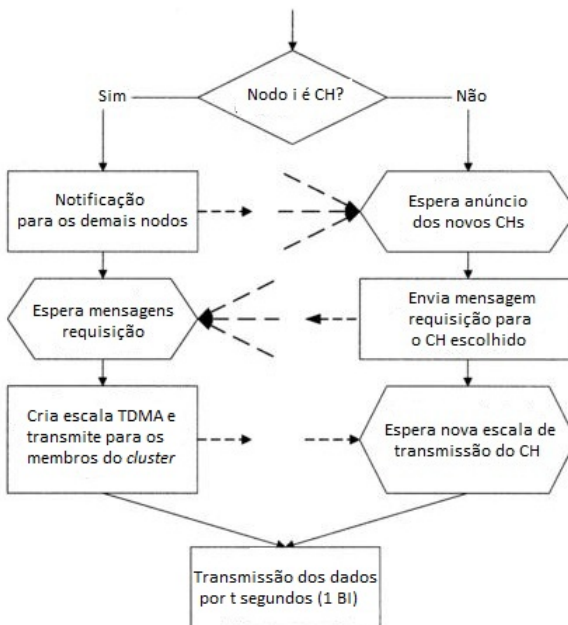


Figura 19 – Fluxograma do algoritmo distribuído do LEACH para formação dos *clusters*. Fonte: Adaptado de HEINZELMAN, CHANDRAKASAN, BALAKRISHNAN (2002).

Cada sensor se auto-elege CH no início de cada rodada com uma

probabilidade P , sendo que P é escolhido de forma a respeitar a condição de que existirão k *clusters*. Depois desse processo de auto-eleição, os nodos que decidiram ser CHs notificam os demais nodos da rede da sua decisão através do envio de uma mensagem em *broadcast*. Cada nodo se tornará membro do *cluster* que representar o menor custo energético para a sua comunicação com o CH.

Em seguida, os nodos requisitam ao CH escolhido para se tornarem membros do seu *cluster*. Por fim, os CHs configuram (e transmitem para os nodos) uma escala TDMA atribuindo uma fatia de tempo para cada nodo que se juntou ao *cluster* poder transmitir seus dados, evitando colisões com mensagens dos outros nodos.

Após o término dessa fase de configuração, inicia-se a etapa de transmissão dos dados. O tempo destinado a comunicação é dividido em quadros. Cada quadro é composto por compartimentos de tempo destinados a transmissão de cada nodo pertencente ao *cluster*. Cada nodo envia pelo menos uma mensagem por quadro. Para economizar energia, cada nodo desliga seu rádio de comunicação até chegar o instante de tempo alocado para a transmissão dos seus dados. Após o CH receber os dados de todos os nodos, ele executa uma agregação para remover a redundância dos sinais correlacionados e transmite a nova informação para a estação base.

Os autores mostram que o LEACH é capaz de economizar mais energia e entregar mais dados para a estação base do que outras abordagens, como por exemplo, uma rede *cluster tree* estática. Por ser um protocolo robusto, que facilita a formação e aumenta consideravelmente o tempo de vida da rede, o LEACH se popularizou como uma das principais propostas para a implantação de RSSF *cluster tree*.

4.2 TIME SHIFT GROUPING ACCESS

Como normalmente o tráfego em redes *cluster tree* converge em direção ao coordenador PAN, um gargalo de comunicação vai se formando nos níveis superiores da rede. Isso resulta frequentemente em congestionamentos, os quais são um obstáculo para a utilização de RSSF IEEE 802.15.4 *cluster tree*. Além disso, como o modo com *beacon* limita o período ativo dos *clusters*, o curto tempo correspondente ao SD disponível para um CH pode não ser suficiente para dar vazão à transmissão das suas próprias mensagens e para o repasse das mensagens de todos os *clusters* a ele conectados.

Para contornar esse problema, Yamao e Takagishi (2008) propu-

seram um método chamado *Time Shift Grouping Access (TSGA)*, que divide o BI do coordenador PAN em dois compartimentos. Todos os nodos, exceto o coordenador PAN, são agrupados pelos CHs do primeiro nível da árvore, formando n grupos. Então, esses n grupos são divididos em dois super grupos, $TG1$ e $TG2$, de forma a balancear a carga de tráfego (Figura 20).

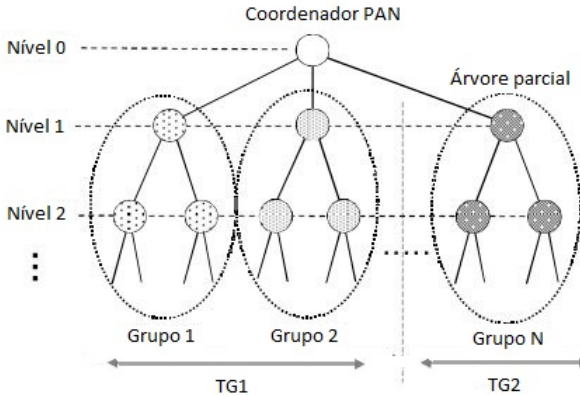


Figura 20 – Agrupamento dos nodos realizados pelos CHs do primeiro nível da árvore. Fonte: Adaptado de Yamao, Takagishi (2008).

A Figura 21 mostra um exemplo de atribuição dos períodos ativos disponíveis para transmissão no qual o BI é sequencialmente dividido pela metade para os *clusters* a partir do primeiro nível da árvore. Os CHs do primeiro nível possuem $BI/2$ unidades de tempo para se comunicarem com os nodos pertencentes ao seu *cluster*. Os CHs do segundo nível possuem $BI/4$ unidades tempo e assim sucessivamente. Essa redução exponencial realizada gradualmente conforme se aumenta o nível da árvore não afeta o desempenho da rede com relação à vazão, visto que a densidade do tráfego tende a diminuir com o aumento da profundidade.

A utilização de períodos inativos para poupar energia dos nodos, colocando-os em modo *sleep*, limita o período de tempo destinado a comunicação, o qual reduz a vazão da rede e pode ocasionar a chamada “*sleep latency*”. Esse termo é utilizado para designar o problema de atraso fim-a-fim que pode acontecer em RSSF de larga escala, visto que a latência aumenta proporcionalmente com a quantidade de saltos que a mensagem deve percorrer até chegar ao seu destino.

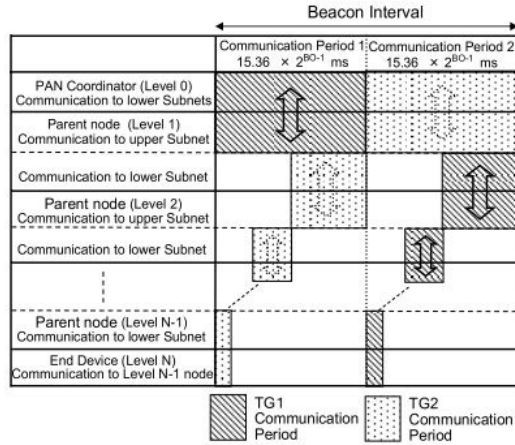


Figura 21 – Exemplo de uma escala de transmissão do TSGA. Fonte: Yamao, Takagishi (2008).

Como a maioria dos dados gerados na rede têm um fluxo que segue a orientação da hierarquia de comunicação formada entre os CHs (começando pelos *clusters* dos níveis inferiores e indo em direção a estação base), o “*sleep latency*” pode ser diminuído se o período ativo dos *clusters* for configurado de forma a seguir essa hierarquia. Assim, uma mensagem recebida pelo *cluster* i do nível $n - 1$ é imediatamente transmitida no SD do *cluster* de nível n , o qual começa no instante em que o SD do *cluster* i termina. Essa abordagem foi denominada *Staggered Wakeup Scheduling* e é empregada pelo TSGA para coordenar a comunicação.

Os resultados mostram que o TSGA reduz a probabilidade de colisão, melhorando a taxa de entrega de pacotes. Ou seja, o TSGA mitiga o gargalo de vazão nos níveis superiores da rede, fazendo um melhor uso do canal de comunicação. Além disso, o TSGA pode reduzir o consumo de energia dos nodos para menos da metade quando comparado com o CSMA/CA sem *beacon*.

4.3 DYNAMIC DUAL-RATE BEACON SCHEDULING

Em aplicações de detecção de eventos, a RSSF tipicamente se encontra em um estado ocioso por longos períodos. Os nodos realizam

apenas tarefas periódicas de comunicação, como reportar seu nível de bateria para a estação base ou enviar informações de atualização do seu estado. Assim, baixos ciclos de trabalho são necessários e a rede pode operar com um intervalo de *beacon* mais longo.

Entretanto, quando um evento de alta prioridade é detectado, aquela região se torna um *hotspot*, e uma rápida velocidade de reação é necessária para transmitir imediatamente as informações relacionadas a esse evento para o centro de monitoramento. Essa necessidade conflita com o baixo ciclo de trabalho da RSSF, ocasionando longos atrasos fim-a-fim e, conseqüentemente, fazendo com que as mensagens percam seus *deadlines*.

Por causa da urgência dessas informações, as quais se não forem transmitidas dentro do tempo esperado comprometem a eficácia do sistema, Almeida, Chen e Wang (2010) propuseram um método dinâmico para o escalonamento de *beacon* em redes IEEE 802.15.4 que adota um BI diferente para cada *cluster* de acordo com o estado do ambiente: enquanto nenhum evento é detectado, a rede opera com um BI longo (a fim de economizar energia dos nodos) e, quando um evento é detectado, com um BI curto (para diminuir o atraso fim-a-fim).

Assim, conforme mostrado na Figura 22, quando um evento é detectado, o *cluster* que o detectou, bem como os CHs que estão no seu caminho de transmissão até a estação base, passam a operar com um BI curto. Os demais *clusters* da rede continuam operando com um BI longo.

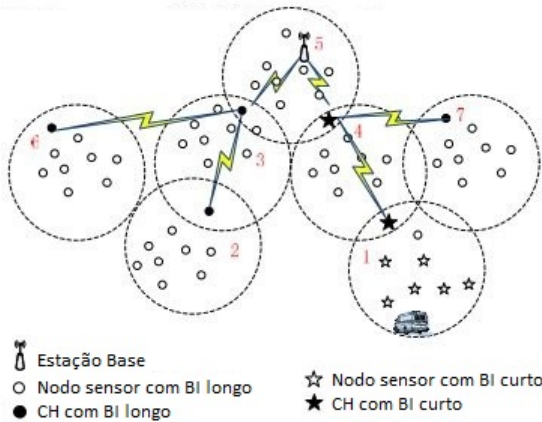


Figura 22 – Exemplo da utilização do *Dynamic Dual Rate Beacon Scheduling*. Fonte: Adaptado de Almeida, Chen, Wang (2010).

No que diz respeito à maneira como os nodos alternam entre BIs curtos e longos, dois esquemas com diferentes tempos de reação foram propostos. No primeiro esquema, depois da detecção de um evento, o nodo deve esperar o SD do próximo período ativo do seu CH para começar a operar com um BI curto. O tempo de resposta nesse caso pode ser tão longo quanto o tamanho de um BI, incorporando seu longo período inativo. Dessa forma, esse tempo relativamente longo de espera desde a detecção até o instante de início do próximo SD do *cluster*, pode comprometer aplicações cujas mensagens possuam restrições temporais muito rigorosas.

A segunda abordagem proposta melhora consideravelmente o tempo de resposta para a troca de frequência de operação dos nodos. Neste esquema cada CH acorda regularmente a cada BI curto (que corresponde a 4ms) para escutar possíveis notificações de eventos detectados pelos nodos do seu *cluster*. Se nenhum evento é detectado, os nodos filhos não irão transmitir nenhuma requisição e o CH volta para o modo *sleep*. Caso contrário, o CH irá receber a notificação e passará a operar em um BI curto no próximo instante destinado ao recebimento das notificações. Portanto, a latência máxima desde a detecção do evento até a mudança de frequência de operação é de dois BIs curtos.

Esse novo método de escalonamento permite que a rede mude o BI dinâmica e assimetricamente através de toda a rede, alternando entre BIs longos e curtos quando os nodos estão engajados em algum rastreamento. A segunda abordagem proposta para troca dos BIs, por ser mais reativa, consome um pouco mais de energia dos nodos. Entretanto, qualquer uma das alternativas mostra um melhor desempenho do escalonamento de *beacon* dinâmico quando comparado ao modo com *beacon* tradicional, melhorando o balanceamento entre o consumo de energia e o atraso fim-a-fim em situações cujos eventos são estáticos ou mesmo quando os alvos estão em movimento.

4.4 COBERTURA

A cobertura da rede é um dos campos de pesquisa mais ativos das RSSF nos últimos anos. A grande variedade de aplicações deu margem para que a cobertura pudesse ser medida e interpretada de várias formas. Sua estrita relação com a otimização de recursos no espaço de sensoriamento serviu como motivação para a realização de inúmeros trabalhos nessa área.

4.4.1 Cobertura estática e dinâmica

Zhu et al. (2012) classifica a cobertura em estática ou dinâmica de acordo com as estratégias empregadas para a implantação de uma RSSF. A cobertura é dita ser estática quando a RSSF é composta somente por nodos estacionários. Dessa forma, o grau de cobertura da rede pode ser determinado *a priori*, em sua inicialização, permanecendo inalterado até que certa quantidade de nodos falhe ou tenha suas baterias exauridas (FAN; JIN, 2010).

Contrariamente, a cobertura dinâmica é mais complexa, pelo fato de ter que considerar o comportamento de sensores móveis (robôs, por exemplo) no terreno monitorado (LIU et al., 2005; LI; LI; ZHU, 2007; NENE; DEODHAR; PATNAIK, 2012). Dessa forma, ela não pode ser determinada somente na configuração inicial da RSSF, devendo ser reavaliada periodicamente. Em ambientes hostis ou inacessíveis, nos quais sensores são dispostos de uma maneira aleatória, nodos móveis podem ser utilizados para melhorar o nível de cobertura da rede (WANG; CAO; PORTA, 2004; GHOSH; DAS, 2008; TAN; JARVIS; KERMARREC, 2009).

A cobertura estática faz uma alusão ao Problema da Galeria de Arte, definido em (O'ROURKE, 1987), cujo objetivo era determinar a quantidade mínima de observadores, e as suas devidas posições, necessária para cobrir uma sala de uma galeria de arte de tal forma que todo ponto fosse monitorado por pelo menos um observador.

No contexto das RSSF essa cobertura é retratada na literatura como *full coverage* ou *blanket coverage*, cuja premissa básica é cobrir a área de interesse de forma que não haja “lacunas”, ou seja, todos os pontos pertencentes à área a ser monitorada estão dentro do alcance do sinal de monitoramento de pelo menos um nodo sensor (MEGUERDICHIAN et al., 2001; FAN; JIN, 2010; MULLIGAN, 2010; BISHT; CHHETRI, 2013).

Como as RSSF são colaborativas (todos os nodos compartilham as mesmas tarefas de sensoriamento), as medições dos sensores próximos uns dos outros são correlacionadas. Em redes densas, o desligamento temporário de alguns dos nodos redundantes diminui a contenção pelo meio de comunicação, sem degradar o desempenho do sistema. Dessa forma, esses sensores podem ser escalonados para trabalhar alternadamente. Essa técnica, conhecida como *sleep scheduling*, possibilita que a rede opere em baixos ciclos de trabalho, economizando uma quantidade significativa de energia dos nodos (GHOSH; DAS, 2008).

O esforço na busca por uma melhor eficiência energética faz com que a cobertura seja muitas vezes utilizada como um indicador de viva-

cidade da rede (tempo no qual a rede se mantém apta a cumprir com a sua finalidade) (DIETRICH; DRESSLER, 2009; BISHT; CHHETRI, 2013). O protocolo PEAS (YE et al., 2003) foi um dos primeiros trabalhos a implementar uma política de *sleep scheduling* para *full coverage* em RSSF. Os resultados deste trabalho mostram que o PEAS pode estender o tempo de vida da rede em uma proporção linear ao número de nodos que a compõe.

Cardei et al. (2005) propõe um *sleep scheduling* entre diferentes conjuntos de nodos, de forma que cada grupo individualmente é capaz de prover cobertura à rede. Essa divisão se resume a um problema de otimização, o qual foi comprovado ser NP-Completo. Duas heurísticas foram propostas para solucioná-lo. A estratégia gulosa teve um melhor desempenho que a técnica de programação linear, sendo energeticamente mais eficiente. Ademais, a baixa complexidade computacional dessa solução viabiliza a utilização dessa abordagem em RSSF de larga escala.

Diversos trabalhos de *sleep scheduling* se concentram em estabelecer os critérios que irão determinar se um nodo deve ser ativado ou não. Esses critérios, denominados regras de elegibilidade, são baseados em cálculos matemáticos de distância entre os sensores e devem garantir que os nodos selecionados para operar serão capazes de fornecer cobertura adequada à RSSF.

Em (TIAN; GEORGANAS, 2002), a decisão de um nodo de desligar seu rádio de comunicação é tomada somente se os nodos vizinhos estão aptos a monitorar toda a sua área de sensoriamento. Essa decisão é realizada local, periódica e autonomamente por cada nodo. Para evitar lacunas na região monitorada, que pode surgir caso dois sensores vizinhos detectem simultaneamente que um pode se responsabilizar por monitorar a área do outro, cada nodo atrasa a sua decisão por um período de tempo aleatório.

Hsin e Liu (2004) adicionam na regra de elegibilidade proposta por Tian, Georganas (2002) informações sobre a energia residual dos nodos, de forma que sensores com maior energia residual são mais propensos a permanecerem ativos. Dessa forma, o esgotamento da bateria dos nodos ocorre de forma balanceada, proporcionando maior robustez à rede.

4.4.2 *Sleep Scheduling*

Bao e Ju (2012) propuseram um *sleep scheduling* para redes organizadas sob a topologia *cluster tree*. A energia residual dos nodos é considerada no processo de eleição dos CHs. Em decorrência disso, nodos inativos em um determinado BI, possuem maior prioridade para se tornarem CHs no próximo BI. Depois dessa etapa, os demais nodos irão se juntar ao *cluster* mais próximo. Por fim, com base nas regras de elegibilidade propostas, cada nodo determina se é redundante ou não para seu *cluster*. Os nodos redundantes entram em modo *sleep* para economizar energia.

A desvantagem dessas técnicas supracitadas é a necessidade de cada nodo ter de anunciar a sua posição para os nodos vizinhos através de troca de mensagens, ocasionando uma sobrecarga na rede e um maior consumo de bateria desses dispositivos.

A quantidade mínima de sensores que devem permanecer ativos tem sido tratada como um parâmetro de QoS da rede. Essa tarefa não é trivial, pelo fato de ser necessário determinar frequentemente a quantidade de sensores “vivos”, ou seja, que não tenham suas baterias exauridas.

A solução encontrada para sair desse impasse foi redefinir a QoS como o número de mensagens k que a estação base espera receber em um tempo t . No algoritmo Gur Game (IYER; KLEINROCK, 2003), a estação base envia para os nodos a cada rodada uma probabilidade, a partir do qual eles se recompensam ou se punem. Uma memória é utilizada para manter a última ação realizada. Cada nodo possui um autômato como o mostrado na Figura 23. Essa máquina de estados se comporta de seguinte forma: um nodo que decide se recompensar e atinge um estado positivo permanece ativo e envia uma mensagem para a estação base. Por outro lado, se ele decide se penalizar, ele muda seu estado para ir em direção a uma ação oposta à anterior. Caso ele atinja um estado negativo, o nodo entra em modo de economia de energia. Assumindo que o tempo t seja suficientemente longo, pode-se inferir que as k mensagens foram enviadas por aproximadamente k diferentes sensores.

Porém, mesmo após atingir essa convergência, não é garantido que a cobertura da rede seja homogênea. Como essa seleção é aleatória, no caso dos nodos ativos escolhidos estiverem distribuídos de forma muito esparsa ou muito densa, persistirão existindo “lacunas” na área monitorada. Essa situação irá perdurar até que eles tenham suas baterias exauridas. O (m-k)-Gur Game (SEMPREBOM et al., 2012), o

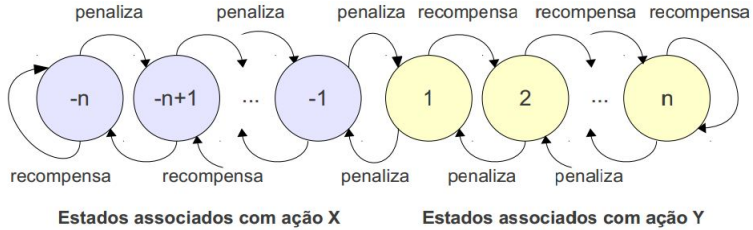


Figura 23 – Autômato de 6 estados que determina o comportamento dos nodos. Fonte: Semprebom et al. (2012).

qual é uma evolução do Gur Game, obtém uma cobertura mais uniforme durante todo o tempo de vida da rede, ao mesmo tempo em que maximiza a QoS, na medida em que disciplina o envio das mensagens dos diferentes sensores. Para isso, foi proposto um rodízio entre os nodos que irão transmitir a cada rodada (BI), através de um padrão de difusão de mensagens seguindo a especificação (m,k)-firm, na qual m mensagens devem ser enviadas por um nodo a cada k intervalos de *beacon* consecutivos.

4.4.3 Cobertura Uniforme

A cobertura uniforme ou *k-coverage*, é um caso especial de cobertura no qual a aplicação requer que todos os pontos apresentem o mesmo grau mínimo de observação, ou seja, que existam pelo menos k sensores monitorando cada ponto da área de interesse a cada instante de tempo (HUANG; TSENG, 2003; XING et al., 2005; HEFEEDA; BAGHERI, 2007; AMMARI; DAS, 2012).

O caso mais geral, quando $k > 1$, é desejado por inúmeras aplicações que necessitam ser mais resilientes a falhas individuais dos nodos. Por fornecer redundância e tolerância a faltas, essa propriedade está normalmente atrelada à utilização de redes de larga escala – composta por uma grande quantidade de nodos. Entretanto, a redundância promovida por essa grande concentração de nodos aumenta excessivamente a quantidade de colisões entre os dados a serem transmitidos, sendo imprescindível a utilização de técnicas de *sleep scheduling* para contorná-los (GHOSH; DAS, 2008; AYERS; LIANG, 2011).

Outra propriedade importante é a de conectividade, a qual define que para todo nodo ativo deve existir um caminho de comunicação

entre ele os demais nodos que compõem a rede. Por afetar a robustez e o *throughput* da rede, é muito importante manter a conectividade de uma RSSF. Intuitivamente, é fácil perceber que existe uma relação entre cobertura e conectividade. Xing et al. (2005) mostra que uma RSSF que provê cobertura também preserva a conectividade se o raio de alcance de comunicação dos nodos for maior que duas vezes o tamanho do raio de sensoriamento.

4.4.4 Estratégias de Implantação

Estratégias ótimas para a implantação de uma RSSF visam maximizar o grau de cobertura da rede ao mesmo tempo em que procuram manter a sua conectividade (HUANG; TSENG; WU, 2007; AMMARI; DAS, 2012). O protocolo CCP (*Coverage Configuration Protocol*) (XING et al., 2005) configura a rede dinamicamente para alcançar diferentes graus de cobertura e conectividade de acordo com o valor de k especificado pela aplicação. Essa flexibilidade torna a rede autoconfigurável em ambientes cujos requisitos de cobertura variam ao longo do tempo.

O OGDC (*Optimal Geographical Density Control*) (ZHANG; HOU, 2005) é um protocolo para controle de densidade em redes de larga escala, o qual também mantém k -coverage e conectividade. Ele é similar em muitos aspectos ao CCP, mas se difere na medida em que tenta minimizar a área de sensoriamento sobreposta de todos os sensores. Alguns resultados de simulações mostram que o OGDC é mais robusto e escalável do que o CCP na medida em que, para o mesmo grau de cobertura requisitado, o número de nodos ativos aumenta modestamente conforme se aumenta a densidade da rede quando comparado com o CCP.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou alguns dos principais problemas relacionados à adoção de redes IEEE 802.15.4 *cluster tree*. Técnicas para formação dessa topologia e para o escalonamento de *beacon* foram discutidas. Além disso, trabalhos relacionados à cobertura da rede foram apresentados. A Tabela 3 sumariza as características mais relevantes dos principais trabalhos relacionados à cobertura em RSSF apresentados neste capítulo, facilitando a comparação entre as diferentes abordagens propostas.

Tabela 3 – Resumo das características dos principais trabalhos apresentados relacionados à cobertura em RSSF.

Abordagem	Característica	Posição dos nodos conhecida	Consumo energético balanceado	k -coverage
PEAS	Distribuído	Não	Não	Sim
Cardei et al. (2005)	Centralizado	Não	Sim	Não
Tian, Georganas (2002)	Distribuído	Sim	Não	Não
Hsin, Liu (2004)	Distribuído	Sim	Sim	Não
Bao, Ju (2012)	Distribuído	Sim	Não	Não
(m,k)Gur Game	Distribuído	Não	Sim	Não
CCP	Distribuído	Sim	Não	Sim
OGDC	Distribuído	Sim	Sim	Sim

A cobertura é uma métrica muito importante para as RSSFs, pois a confiabilidade da rede depende de uma correta cobertura espacial na área monitorada. Entretanto, como as RSSF apresentam contenção pelo acesso ao meio de comunicação, a imparcialidade dos diferentes fluxos de transmissão não é garantida. Diferentes sensores (ou regiões) podem enviar diferentes quantidades de mensagens. Na sequência deste trabalho é apresentado um *framework* cujo objetivo é uniformizar a quantidade de dados transmitida por esses diferentes fluxos, proporcionando à aplicação uma visão homogênea de todo o processo observado.

5 GLHOVE *FRAMEWORK*

O GLHOVE assume uma arquitetura de rede onde uma RSSF é organizada sob uma topologia *cluster tree*, cuja comunicação é regida pelo padrão IEEE 802.15.4 com *beacon*. Os passos para a formação e organização da rede estão fora do escopo da nossa proposta. Nesse estágio, abordagens para a formação de *clusters* como o LEACH ou a proposta por Bandara, Jayasumana e Illangasekare (2011) podem ser utilizadas.

Para dividir a área de monitoramento em regiões, os nodos são organizados em *clusters*. Cada *cluster* é composto por um coordenador (CH) e por seus nodos filhos (sensores), cuja função é monitorar a sub-região por ele delimitada. Uma árvore de comunicação é formada entre os CHs, os quais são responsáveis por fazer o roteamento das mensagens de/para o PC (estação base). O PC é a raiz da árvore e é geralmente usado para entregar as mensagens para usuários ou sistemas fora da RSSF.

Sem perda de generalidade, a Figura 24 ilustra a arquitetura de rede do GLHOVE formada por uma RSSF configurada sob a topologia *cluster tree*, composta por 1 PC e 5 *clusters*. As linhas representam os enlaces de comunicação entre os CHs, enquanto que os círculos delimitam a área de monitoramento de cada *cluster*.

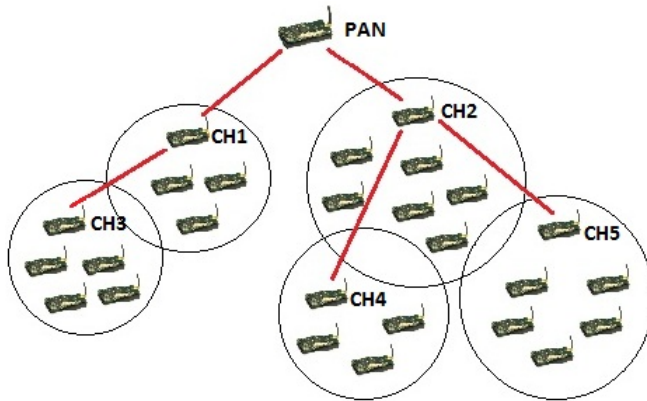


Figura 24 – Exemplo da arquitetura de rede no GLHOVE.

Os coordenadores enviam periodicamente quadros de *beacon*,

com a finalidade de sincronizá-los com os demais dispositivos que compõem a sub-rede e gerenciar a comunicação. Os *beacons* delimitam o intervalo do SD, o qual é composto por um período ativo, no qual os nodos trocam mensagens entre si, e um período inativo, no qual eles entram em um modo de economia de energia, fundamental para o prolongamento do tempo de vida da rede.

Assume-se um BI único para toda a rede e um SD fixo e de mesmo tamanho para todos os *clusters*. Além disso, a porção ativa do superquadro é considerada como sendo composta somente pelo CAP, no qual os dispositivos que desejam se comunicar disputam o acesso ao meio utilizando o protocolo CSMA/CA com compartimentos.

Conforme mencionado na seção 3.3, o envio periódico de *beacons* necessita de um escalonamento adequado, caso contrário colisões poderão ocorrer e os nodos irão perder a sincronia com o PC. Neste trabalho foi escolhida uma simples abordagem *Time Division*, que não requer quaisquer modificações no padrão IEEE 802.15.4.

A ideia é gerar uma escala antes do início de cada superquadro, onde cada CH determina um deslocamento temporal (chamado *beaconOffset*) com relação ao início do BI para a transmissão do seu *beacon*. O agrupamento de *clusters* cujos sinais não se sobrepõem também é realizado. Assim, *clusters* pertencentes ao mesmo grupo possuem o mesmo *beaconOffset*, transmitindo seus *beacons* simultaneamente.

Além dessa estratégia, foi utilizado o escalonamento de *beacon* seguindo a abordagem *Staggered Wakeup Scheduling*, descrita na seção 4.2. O principal objetivo dessa técnica é escalonar os quadros de *beacon* seguindo a árvore de comunicação. Como mostrado na Figura 25, o “fluxo de comunicação” é *uplink*, ou seja, é iniciado nos níveis inferiores da árvore em direção ao PC. Assim, os períodos ativos dos CHs de cada nível na árvore são sequencialmente iniciados de forma a minimizar a latência fim-a-fim.

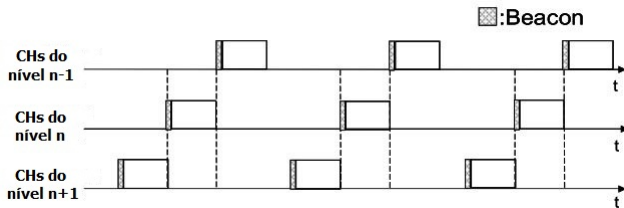


Figura 25 – Escalonamento de *beacon* de acordo com o *Staggered Wakeup Scheduling*. Fonte: Adaptado de Yamao, Takagishi (2008).

5.1 ALGORITMOS

O GLHOVE é governado por três principais algoritmos que são executados pelo coordenador PAN, *Cluster-Heads* e nodos sensores. Esses algoritmos são descritos a seguir.

5.1.1 Coordenador PAN

O algoritmo 1 mostra os passos de execução do coordenador PAN. O valor de QoS almejado (quantidade de mensagens que o PC espera receber de cada *cluster*) é chamado de *QoSMark*. Depois do seu período ativo, com base na quantidade de mensagens efetivamente recebidas de cada *cluster* – *CES*, o PC calcula o II da rede (linha 7).

Baseado no grau de imparcialidade auferido, um novo *QoSMark* é calculado (linha 9), o qual pode ser um único valor para toda a rede ou individual para cada *cluster*. Portanto, se a rede estiver congestionada, o II estará abaixo de um determinado limiar, e a carga da rede deve ser reduzida. Caso contrário, é possível aumentar o número de mensagens enviadas, elevando a confiabilidade das medições.

Por fim, uma mensagem contendo o *QoSMark* e *CES* é transmitida individualmente para cada *cluster* da rede (linha 11). Esse processo de realimentação ocorre a cada BI e é executado no período inativo (linhas 8-12).

Algorithm 1 Coordenador PAN

```

1: for each BI in NetworkActivePeriod do
2:   if BeaconOffsetTimer then SendBeacon()
3:   while IsMySD do
4:     ReceivePktFromCHs()
5:   end while
6:   if EndMySD then
7:     II = CalculateFairnessIndex(CESList)
8:     for each CH in CHList do
9:       QoSMark = CalculateClusterExpectedMsg(II)
10:      CES = GetClusterAmountPacketsSent(CH)
11:      SendNewParameters(CH, QoSMark, CES)
12:    end for
13:   end if
14: end for

```

5.1.2 *Cluster-Heads*

O algoritmo 2 resume o ciclo de operação dos CHs. O *QoSMark* e o *CES* são recebidos do PC (linhas 2-3) e inseridos na carga útil (*payload*) do quadro de *beacon* do CH (linha 5), permitindo o repasse desses parâmetros para os sensores a ele associados (linha 6). Os CHs que não receberem o *beacon* do seu coordenador, devido a uma interferência no canal de comunicação, por exemplo, irão enviar os últimos valores válidos recebidos.

Os CHs também atuam como roteadores das mensagens dos *clusters* dos níveis inferiores em direção ao PC durante o superquadro do seu pai (linhas 13-27). Ao obter um novo dado da sua fila (linha 15), os CHs verificam se ele foi enviado por um de seus sensores.

Todas as mensagens recebidas dos sensores de um *cluster* específico são colocadas em um *buffer*. Ao se atingir um determinado número de mensagens, uma integração de dados é realizada (linha 19). Seu objetivo é aumentar a carga útil do pacote, diminuindo a quantidade de mensagens enviadas.

Antes desse processo, poderia ser executada uma fusão de sensores competitiva. Além de diminuir a carga de mensagens na rede, essa técnica otimiza tomadas de decisões visto que ela extrai uma informação mais precisa e robusta a partir de um conjunto de dados brutos.

Por outro lado, se o dado retirado da fila pertencer a um *cluster* filho ele é transmitido diretamente, pois nenhum processo de fusão de sensores serial (PATIL; DAS; NASIPURI, 2004) é realizado (linhas 22-25).

Um *deadline* correspondente ao término do atual BI é associado a cada mensagem a ser transmitida. Nesse instante, os pacotes remanescentes nas filas dos CHs são descartados (linha 28). Essa ação evita que o comportamento aleatório da política FIFO comprometa a imparcialidade da rede no BI subsequente. Além disso, evita que a tomada de decisão feita no PC utilize dados antigos que estivessem atrasados nas filas dos CHs da rede.

5.1.3 Sensores

Os passos de operação dos sensores seguem o Algoritmo 3. A decisão de quando ou não transmitir uma mensagem é executada localmente pelos sensores. Nesse sentido, cada sensor tem uma probabilidade de envio (*SP*) que é utilizada para tomada de decisão (PINTO et. al, 2009).

Algorithm 2 Cluster-Head

```

1: for each BI in NetworkActivePeriod do
2:   QoSMark = GetClusterQoSMark()
3:   CES = GetClusterEffectiveSent()
4:   if BeaconOffsetTimer then
5:     InsertBeaconPayloadParameters(QoSMark,CES)
6:     SendBeacon()
7:     StartMySD()
8:   end if
9:   while IsMySD do
10:    ReceivePktFromSensors()
11:    ReceivePktFromCHsChildren()
12:   end while
13:   while IsCHParentSD do
14:     while (queue not empty) do
15:       newData = dequeue(queue)
16:       if IsDataFromSensor(newData) then
17:         AmountData.Add(newData)
18:         if (AmountData.Size() == Threshold) then
19:           NewPkt = DataIntegration(AmountData)
20:           SendPktToCHParent(NewPkt)
21:         end if
22:       else if IsDataFromCHsChildren(newData) then
23:         NewPkt = newData
24:         SendPktToCHParent(NewPkt)
25:       end if
26:     end while
27:   end while
28:   queue.Empties();
29: end for

```

Quando os sensores recebem o *beacon* do seu coordenador, eles extraem os parâmetros *QoSMark* e *CES* (linhas 3 e 4), os quais são usados pela função que irá calcular a sua nova probabilidade de envio (linha 5). Um nodo específico irá aumentar ou diminuir a sua SP de acordo com o número de mensagens enviadas na rodada anterior.

Além disso, cada nodo realiza uma agregação de dados local (linha 11) para remover a redundância das medições, reduzindo o tráfego e aumentando a confiabilidade das leituras dos sensores (STANKOVIC et al., 2003; NAKAMURA; LOUREIRO; FRERY, 2007; YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Após esse procedimento, um valor randômico entre 0 e 1 é gerado. Caso ele seja menor ou igual do que a probabilidade de envio atual do sensor (*SP*), esse novo dado é transmitido para seu coordenador. Caso contrário, esse dado é descartado (linhas 12-17).

Essa política de envio/descarte é efetuada com o intuito de ajustar o número de medições enviadas por cada *cluster* a cada BI, de

Algorithm 3 Sensores

```

1: for each BI in NetworkActivePeriod do
2:   if ReceivedBeaconFromCH then
3:     QoSMark = GetClusterQoSMark()
4:     CES = GetClusterEffectiveSent()
5:     SP = ComputeNewProb(QoSMark, CES, SP)
6:   end if
7:   while IsCHParentSD do
8:     while (queue not empty) and (AmountData.Size() < Threshold) do
9:       AmountData.Add(dequeue(queue))
10:    end while
11:    NewPkt = LocalDataAggregation(AmountData)
12:    randSP = GenerateRandomProbability()
13:    if randSP ≤ SP then
14:      SendPktToCH(NewPkt)
15:    else
16:      delete NewPkt
17:    end if
18:  end while
19: end for

```

forma a aproximar a quantidade de mensagens que chegam até a estação base do QoS desejado. Ademais, isso refletirá em um alto II da rede, garantindo o monitoramento homogêneo almejado.

Durante o projeto do GLHOVE, observou-se que a quantidade de colisões durante o SD de um *cluster* é muito alta. Como as transmissões das mensagens geradas pelos sensores não são suficientemente espalhadas pelo mecanismo de *backoff* do CSMA/CA, a rede acaba por apresentar um baixíssimo *goodput* (PINTO et. al, 2009).

Para superar esse problema, antes de enviar as mensagens (linha 14), o GLHOVE assume um atraso de tempo aleatório no intervalo $[0, \textit{maximumOffset}]$ gerado a partir de uma distribuição uniforme. O *maximumOffset* é um valor escolhido de tal forma que o nodo pode enviar sua mensagem antes de terminar o período ativo do seu *cluster*. Esse atraso é utilizado para efetivamente dessincronizar os instantes de transmissão entre os nodos do mesmo *cluster*, melhorando o *goodput* da rede.

A *SP* é calculada pelo Algoritmo 4. Quando o PC recebe menos mensagens que o esperado, a *SP* é aumentada, caso contrário ela é reduzida (linhas 2-6). A diferença *QoSMark* - *CES* é incluída nessa equação com o objetivo de acelerar a convergência do algoritmo. Um fator de ajuste (α) é utilizado para controlar a granularidade da variação da probabilidade. Dessa forma, valores muito pequenos de α farão com que a probabilidade se altere lentamente, aumentando o tempo

de convergência do algoritmo. Por outro lado, valores muito altos de α farão com que o algoritmo convirja rapidamente ao custo de uma perda de precisão. Após a estabilização do algoritmo, os valores de probabilidade tendem a seguir uma função degrau, aumentando e diminuindo a cada iteração em torno do valor ideal, mas nunca atingindo-o. Por fim, um ajuste é necessário para evitar valores de SP maiores que 1 e menores que 0 (linha 7).

Algorithm 4 Cálculo da nova probabilidade de envio

```

1: function COMPUTE_NEW_PROB(QoSMark, CES, CurrentSP)
2:   if QoSMark > CES then
3:     NewSP = CurrentSP + CurrentSP * (QoSMark - CES) *  $\alpha$ ;
   //  $\alpha$  = adjust factor
4:   else if QoSMark < CES then
5:     NewSP = CurrentSP - CurrentSP * (CES - QoSMark) *  $\alpha$ ;
6:   end if
7:   NewSP = max(0, min(1,0, NewSP));
8:   return NewSP;
9: end function

```

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi visto o modelo de rede, as métricas e os principais algoritmos do GLHOVE. Sua arquitetura modular permite que outras abordagens que façam uso de diferentes técnicas computacionais sejam propostas para o cálculo da probabilidade de envio dos sensores sem que sejam necessárias mudanças em outras partes do GLHOVE. Apenas o algoritmo 4, específico para o cálculo das probabilidades, é que necessitaria ser modificado. Além disso, essas novas abordagens poderiam levar em consideração outras variáveis nesse cálculo, como por exemplo, a energia residual dos nodos.

No próximo capítulo são apresentadas as ferramentas de suporte à simulação. Também é descrito o processo de avaliação de desempenho do GLHOVE, o qual é fundamentado em duas métricas: a QoS e o II. Enquanto que a QoS indica a quantidade de mensagens que alcançam o coordenador PAN, o II mede a diversidade espacial dos dados recebidos. Além disso, são discutidos os principais resultados obtidos através das simulações.

6 AVALIAÇÃO DO GLHOVE

Este capítulo apresenta a avaliação do GLHOVE. Os seus algoritmos foram implementados em C++ e a ferramenta OMNeT++ foi utilizada para simular o comportamento da RSSF com centenas de nodos. Também foi realizada uma comparação do GLHOVE com uma abordagem mais simples, denominada neste trabalho de “*Naive Approach*”.

6.1 FERRAMENTA DE SUPORTE À SIMULAÇÃO: OMNET++

6.1.1 Visão Geral

O OMNeT++ é um ambiente de simulação de propósito geral, orientado a eventos, capaz de modelar de maneira eficaz aplicações de larga escala. É uma ferramenta gratuita para uso acadêmico, estável, altamente portátil entre os sistemas operacionais mais utilizados (como o Linux, MAC e o Windows) e que preenche algumas lacunas deixadas por outros simuladores como o NS-2 e o OPNET (VARGA; HORNIG, 2008).

Ao invés de fornecer diretamente os componentes para a simulação de uma determinada aplicação, o OMNeT++ pode ser visto como um *framework* que oferece todo um ferramental para a criação desses componentes. Sua arquitetura genérica o torna bastante flexível, possibilitando a simulação de modelos de diversas áreas do conhecimento, os quais podem ser desenvolvidos de maneira completamente independente (VARGA, 2010).

Para domínios mais abrangentes, os modelos criados são agrupados em um *framework*, o qual precisa apenas ser referenciado pelos outros projetos que desejarem utilizá-lo. O INET *framework*, por exemplo, é um pacote para a simulação de redes de comunicação, contendo inúmeros modelos para os mais diversos protocolos da Internet, como o TCP e o UDP da camada de transporte e os algoritmos de roteamento da camada de rede.

O INETMANET é uma extensão do INET, que contém protocolos e componentes adicionais necessários para modelar a comunicação sem fio. Por conter a implementação do padrão IEEE 802.15.4 quase por completo, incluindo uma representação do consumo energético dos nodos, esse *framework* é comumente utilizado para a simulação de RS-

SFs (CHEN; DRESSLER, 2007).

6.1.2 Arquitetura do OMNeT++

O OMNeT++ utiliza uma arquitetura modular e hierárquica. Módulos simples são programados em C++ e modelam o comportamento de componentes discretos do sistema que se deseja simular. Conforme mostrado na Figura 26, módulos simples podem ser agrupados formando módulos compostos, que por sua vez, também podem ser combinados, formando uma hierarquia cuja quantidade de níveis é ilimitada. O modelo final é chamado de rede.

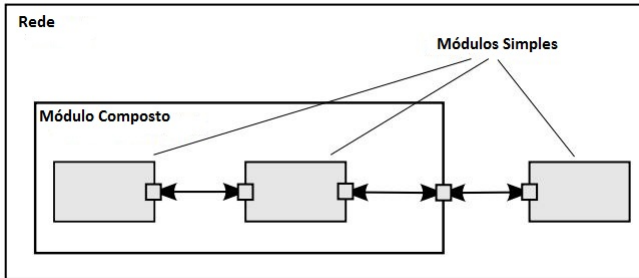


Figura 26 – Modelo do OMNeT++: módulos simples e módulos compostos. Fonte: Adaptado de Varga, Hornig (2008).

Os módulos se comunicam através de troca de mensagens, as quais podem conter dados arbitrários. Módulos simples enviam suas mensagens através de interfaces de entrada e saída, chamadas portas. A ligação entre duas portas forma uma conexão, que pode possuir propriedades como atraso de propagação, taxa de transmissão e taxa de erro, por exemplo. Módulos podem ter parâmetros, que são usados para passar dados de configuração para os módulos simples.

A estrutura do modelo, ou seja, a topologia da rede com os seus módulos e suas interconexões são definidas através de uma linguagem de alto nível chamada NED (*Network Description Language*). A declaração de um módulo simples descreve a interface do módulo: portas e parâmetros. O módulo composto consiste da representação da interface externa do módulo (portas e parâmetros) e a definição dos seus submódulos e suas interconexões. Por fim, uma rede consiste da definição de vários submódulos que qualificam um modelo de simulação.

A Figura 27 ilustra a implementação do modelo do padrão IEEE

802.15.4 no OMNeT++. O módulo principal é composto pelos módulos simples *notificationBoard*, *mobility*, *disp* e *battery*, os quais não apresentam conexões. As camadas de aplicação (*app*) e de rede (*net*) também são módulos simples, porém estão conectadas umas as outras (Figura 27(a)). A camada de rede ainda está conectada à interface de rede (*nic*), que é um módulo composto pela camada MAC e PHY, além de uma fila (*ifq*) para o armazenamento temporário das mensagens. Suas conexões são mostradas na Figura 27(b).

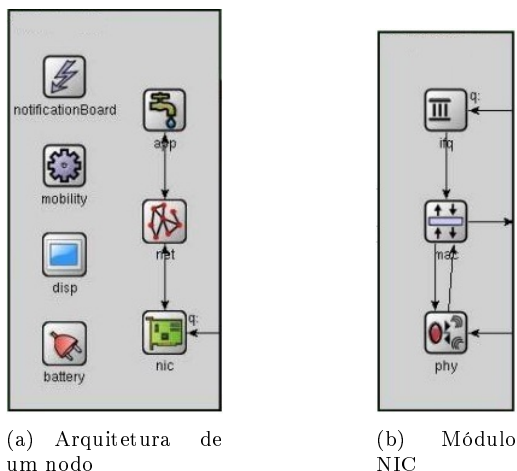


Figura 27 – Modelo do padrão IEEE 802.15.4 no OMNeT++. Fonte: Chen, Dressler (2007).

Geralmente, várias simulações são realizadas com diferentes entradas para avaliar o comportamento do ambiente simulado em diferentes situações. Essas variáveis têm seus valores alterados de execução para execução e, portanto, não estão relacionadas nem com a topologia e nem com o comportamento da rede. Assim, é no arquivo INI que as diferentes combinações de valores para essas variáveis são especificadas. Os resultados de simulação gerados podem ser facilmente analisados e processados pela ferramenta de análise incorporada ao OMNeT++.

O funcionamento interno do OMNeT++ para realizar uma simulação ocorre da seguinte forma: Primeiramente, os arquivos NED são carregados. Na sequência, o programa de simulação carrega o arquivo de configuração (INI) e determina o modelo de simulação a ser executado. A rede é instanciada para simulação, todos os módulos são criados e os parâmetros atribuídos. A partir desse ponto a simulação

está pronta para ser executada.

O fluxo básico para o desenvolvimento e execução de simulações utilizando o OMNeT++ pode ser resumido em 6 etapas:

1. Criação dos módulos simples e compostos, usando a linguagem NED;
2. Codificação dos módulos, usando a linguagem C++, resultando no comportamento do sistema a ser simulado;
3. Criação do cenário de simulação desejado (topologia), a partir dos módulos simples e compostos previamente desenvolvidos, utilizando a linguagem NED;
4. Criação do arquivo de configuração (INI) com os parâmetros de simulação desejados;
5. Execução das simulações;
6. Análise dos resultados.

Os passos 1 e 2 são dispensáveis se um *framework* que contenha todos os módulos necessários para executar a simulação de interesse for utilizado. Caso se tenha que realizar modificações em um *framework* existente, o comportamento dos módulos deve ser reprogramado. Esse foi o caso deste trabalho, no qual a subcamada MAC e a camada de rede do INETMANET foram alteradas.

Por conter somente a implementação da topologia estrela, a camada de rede teve de ser totalmente implementada para suportar a topologia *cluster tree*. Como o tráfego de mensagens ocorre em ambos os sentidos da árvore, o roteamento segue as relações de pai/filho e vice-versa. A formação da árvore foi realizada de forma totalmente estática, sendo os parâmetros necessários para a sua configuração definidos no arquivo de inicialização.

Por outro lado, a camada MAC foi alterada de forma a suportar o envio de *beacons* pelos coordenadores (CHs). A implementação do GLHOVE demandou o desenvolvimento de uma função para o cálculo do II, bem como a configuração do período inativo dos coordenadores para a transmissão dos parâmetros do GLHOVE (*QoSMark* e *CES*).

6.2 CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO

O processo de configuração da RSSF proposta no GLHOVE, levando em conta a sua formação, o agrupamento dos coordenadores

e a determinação do *beaconOffset* de cada grupo, foi realizado através das seguintes etapas:

1. Definição da quantidade de *clusters* e da hierarquia de comunicação entre os CHs de forma a garantir uma área de monitoramento sem “buracos”.
2. Definição do valor do BI de acordo com os requisitos da aplicação, como por exemplo, a periodicidade das medições pelos sensores e o atraso máximo tolerado pela aplicação.
3. Definição dos agrupamentos dos CHs baseando-se na hierarquia de comunicação (níveis da árvore), e levando em consideração a premissa de que *clusters* cujos sinais se sobrepõem não podem pertencer ao mesmo grupo. Assim, colisões entre *clusters* são minimizadas.
4. Definição do valor máximo do SD de forma que todos os *clusters* tenham a mesma fatia de tempo para transmissão dos dados. Além disso, o somatório dos SDs de todos os agrupamentos não pode exceder o BI da rede. O período inativo dos coordenadores é utilizado para que o PC possa disseminar os parâmetros do GLHOVE entre cada BI.
5. Definição dos valores de *beaconOffset* para todos os agrupamentos formados na etapa 3 baseando-se no SD calculado no passo 4, seguindo a ordem proposta pelo *Staggered Wakeup Scheduling* (primeiro os *clusters* cujos CHs pertencem aos níveis inferiores em direção a raiz da árvore).

Uma rede *cluster tree* balanceada com 4 níveis de profundidade foi implementada para monitorar uma área 2D de 300.000 m². Uma rede *cluster tree* balanceada (ou simplesmente árvore balanceada) é uma rede onde o PC é a raiz da árvore e a profundidade de cada ramo da árvore não difere entre si em mais de uma unidade. Os CHs foram configurados *off-line*¹ e dez nodos sensores foram aleatoriamente distribuídos em torno de cada CH. A disposição dos CHs é mostrada na Figura 28.

Assume-se um BO com valor igual a 12, isto é, uma rede com periodicidade de 1 minuto. Essa janela de tempo foi igualmente dividida

¹Em uma disseminação *off-line*, os nodos são dispostos em posições fixas *a priori*, ou seja, no período no qual a rede está sendo projetada (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

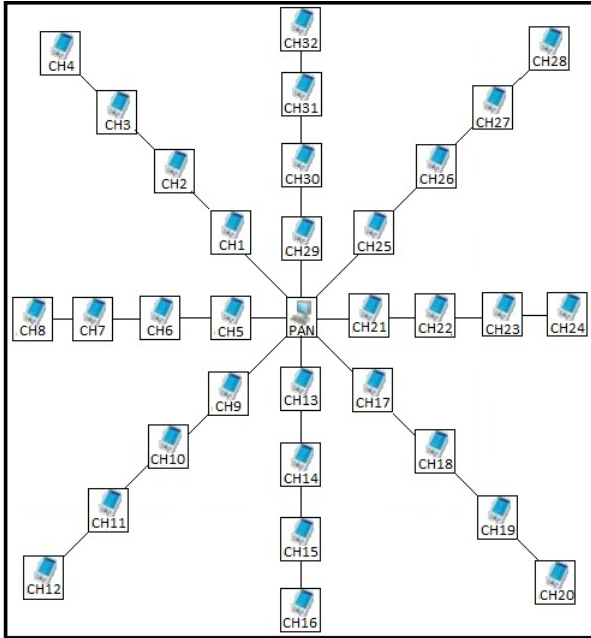


Figura 28 – Rede *cluster tree* balanceada. Disposição aproximada dos 32 CHs e suas associações.

entre todos os *clusters* (Tabela 4), obtendo um SD de aproximadamente 4s dentro de cada *cluster*. Portanto, o período ativo da rede, o qual é o somatório dos SDs de todos os agrupamentos de *clusters*, é de 58,98s. O período restante, 3,93s, é o período inativo da rede. Esse intervalo de tempo é utilizado para disseminar os parâmetros do GLHOVE (*QoSMark* e o *CES*) para os coordenadores dos *clusters*. Conforme descrito nos algoritmos da seção 5.1, a comunicação no período inativo ocorre no sentido inverso à transmissão dos dados coletados: o PC envia os parâmetros para os CHs do primeiro nível da árvore, os CHs do primeiro nível transmitem para os CHs do segundo nível, e assim por diante até a profundidade máxima da árvore ser atingida.

A Tabela 4 mostra os *beaconOffsets* de todos os *clusters*. Os primeiros dois grupos são formados pelos CHs do quarto nível da árvore. Os grupos 3 e 4 compõem os CHs do terceiro nível. Os grupos 5 e 6 são constituídos pelos CHs do segundo nível. Os CHs do primeiro nível são implantados ao redor do coordenador PAN. Pelo fato deles estarem muito próximos uns dos outros, seus alcances de transmissão

Tabela 4 – Agrupamento dos coordenadores e seus respectivos valores de *beaconOffset*.

Grupo	<i>beaconOffset</i> (ms)
G1 = {8, 16, 24, 32}	0
G2 = {4, 12, 20, 28}	3932
G3 = {3, 11, 19, 27}	7864
G4 = {7, 15, 23, 31}	11797
G5 = {2, 10, 18, 26}	15729
G6 = {6, 14, 22, 30}	19661
G7 = {1}	23593
G8 = {5}	27525
G9 = {9}	31457
G10 = {13}	35389
G11 = {17}	39322
G12 = {21}	43254
G13 = {25}	47186
G14 = {29}	51118
G15 = {0}	55050

se sobrepõem e, portanto, eles não podem ser agrupados.

Cada CH irá iniciar seu SD de maneira sincronizada com o seu valor de *beaconOffset*. CHs pertencentes ao mesmo grupo enviam seus *beacons* simultaneamente, pois não estão posicionados no alcance de transmissão dos seus *peers*. Assim, colisões entre *beacons* são evitadas e a rede não irá perder a sua sincronia.

Outros parâmetros de simulação são resumidos na Tabela 5. Foram realizados diversos experimentos com o objetivo de determinar um fator de ajuste (α) próximo do ideal. Para a rede simulada o fator de ajuste igual a 0,075 apresentou os melhores resultados (menor tempo de convergência e maior precisão) e, portanto, foi escolhido para ser utilizado nos experimentos realizados. Além disso, destaca-se o uso de um *path loss* igual a 3, o que significa que a propagação é afetada por alguns obstáculos no ambiente, que prejudicam a comunicação. O primeiro BI é utilizado para a inicialização da rede.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações foram executadas no simulador OMNET++ em conjunto com o *framework* INETMANET. A avaliação de desempenho do GLHOVE foi feita através de uma comparação com uma abordagem

Tabela 5 – Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Quantidade de sensores/ <i>cluster</i>	10
Profundidade da árvore	4
BO	12
BI	62910 ms
SO	8
SD	3932 ms
Fator de ajuste (α)	0,075
Tamanho do pacote (bytes)	8
<i>Path loss</i>	3
Tamanho do <i>buffer</i> (fila) do MAC	120
Intervalo entre as medições	400 ms
Tempo de simulação	31 BIs (1950 s)
Alcance do sinal do sensor	± 62 m
Frequência de operação	2.4 GHz
Consumo de bateria - recebendo	19.7 mA
Consumo de bateria - ocioso	0,0002 mA
Consumo de bateria - inativo	0,0001 mA

baseada em uma rede IEEE 802.15.4 organizada sob a topologia *cluster tree*, sem significantes modificações. Devido a sua simplicidade, essa abordagem é chamada de “*Naive Approach*”. Para manter o ambiente simulado em condição de igualdade com o GLHOVE, as técnicas de agregação e integração de dados, bem como os *deadlines* associados as mensagens também foram implementados na “*Naive Approach*”.

Foram realizados três experimentos com diferentes conjuntos de sementes para a geração dos números aleatórios necessários à simulação. Os resultados discutidos a seguir se referem a uma média dos resultados obtidos nas três simulações.

6.3.1 Árvore balanceada com 32 *cluster heads*

O primeiro cenário tem por objetivo verificar o comportamento do GLHOVE para a rede balanceada mostrada na Figura 28. Neste caso, deseja-se que todas as regiões monitorem o ambiente uniformemente. Dessa forma, o *QoSMark* foi fixado em 5 mensagens por *cluster*.

O gráfico da Figura 29 ilustra a variação do II da rede para o “*Naive Approach*” e o “GLHOVE” a cada BI. Conforme pode ser observado, após o período de inicialização da rede, o II para a “*Naive*

Approach” variou entre 70% e 75%. Por outro lado, após o período de convergência do Algoritmo 4 para o ajuste das probabilidades dos nodos, o GLHOVE manteve esse mesmo índice acima de 90%.

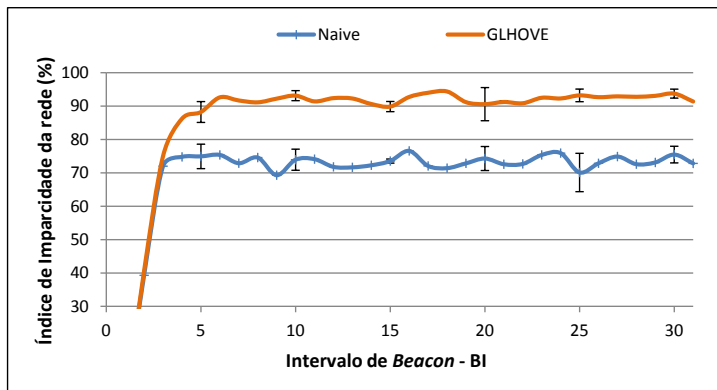


Figura 29 – Árvore balanceada com 32 CHs: II do GLHOVE e da *Naive approach* a cada BI.

O gráfico de dispersão da Figura 30 mostra os valores do II obtidos nos três experimentos realizados. Observa-se que os resultados do II para a *Naive Approach* se concentraram entre 70% e 75% ao longo de todo o período de simulação, praticamente não excedendo a marca de 80%.

Por outro lado, apesar do II obtido ter sido inferior a 85% no período inicial de simulação, o GLHOVE mostra que obteve sucesso na tarefa de manter a neutralidade da rede com relação à quantidade de mensagens enviadas pelos diferentes *clusters*.

Esses valores iniciais próximos aos obtidos pela *Naive Approach* são consequência das maiores variações as quais as probabilidades dos nodos estavam sujeitas até serem ajustadas de forma a atender a QoS determinada pela aplicação. No entanto, após o quinto BI, a justiça para a comunicação dos fluxos oriundos dos diferentes CHs se manteve superior a 85%, variando predominantemente entre 90% e 95% na maior parte do tempo.

Comparando o número de mensagens dos diferentes *clusters* (agrupados por nível) que foram recebidas pelo coordenador PAN constata-se que o GLHOVE, além de ter sido mais imparcial, atingiu a QoS desejada (Figura 31). Foram considerados somente os dados coletados a partir do décimo quinto BI, descartando as amostras que sofreram

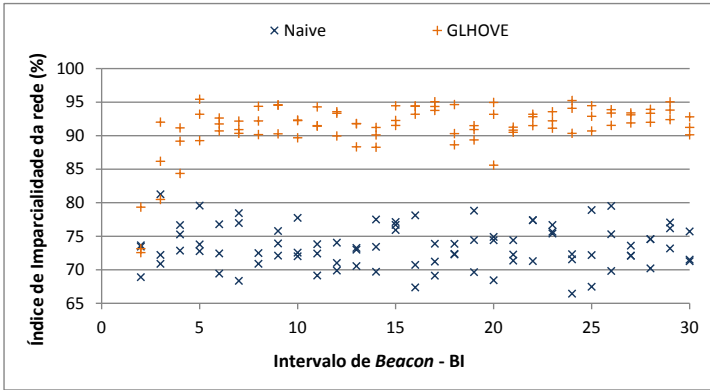


Figura 30 – Árvore balanceada com 32 CHs: valores do Índice de Imparcialidade do GLHOVE e do *Naive approach* a cada BI para os três experimentos realizados.

maiores variações devido as probabilidades de envio dos sensores não estarem estabilizadas.

Nesse gráfico pode ser observado que o GLHOVE mantém uma média aproximada de 80 mensagens enviadas com sucesso por *cluster*, alcançando a QoS almejada de 5 mensagens transmitidas por BI. Em contrapartida, o “*Naive Approach*” apresenta uma variação muito grande quando *clusters* de diferentes profundidades são comparados. Enquanto que os *clusters* do nível 1 (próximos ao PC) enviaram quase o dobro de mensagens do que era esperado, os de profundidade 3 e 4 transmitiram com sucesso um pouco mais da metade das mensagens desejadas.

Essa diferença é uma consequência dos fatores mencionados no Capítulo 5. Além disso, pelo fato dos CHs do primeiro nível estarem diretamente conectados com a estação base, eles não competem com sensores de nível superior (associados com o seu coordenador). Assim, a perda de mensagens devido a colisões é reduzida, aumentando a sua possibilidade de sucesso na transmissão.

O histograma da Figura 32 mostra o atraso de transmissão fim-a-fim de cada medição até ela ser recebida pelo PC. A maior quantidade de medições da *Naive Approach* que chegaram à estação base entre 40s a 60s pode ser explicada pela parcialidade da rede com relação aos *clusters* do primeiro e segundo níveis da árvore, que por estarem próximos da raiz da árvore apresentam um menor atraso fim-a-fim.

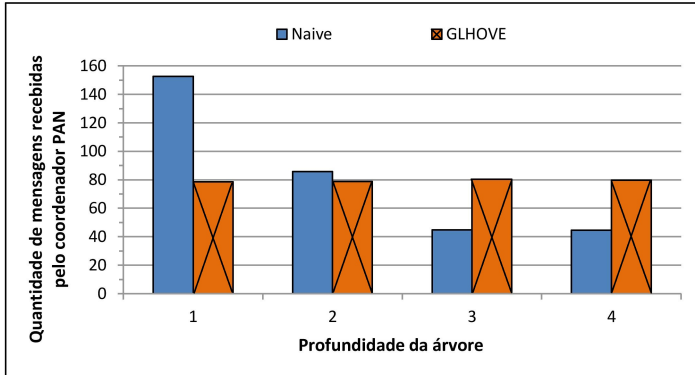


Figura 31 – Árvore balanceada com 32 CHs: quantidade média de mensagens recebidas pela estação base, dos diferentes *clusters*, por nível da rede.

Essa mesma justificativa se aplica com relação as medições entre 100s a 120s, indicando a discriminação dos *clusters* do terceiro e quarto níveis. Entretanto, no GLHOVE, a maior concentração de medições que chegaram a estação base ficou entre 60s e 120s, sugerindo uma maior justiça para o acesso ao canal de comunicação entre os nodos da rede.

Um fator determinante para o aumento do tempo de vida da rede, o qual é uma das principais métricas para as RSSF, é a eficiência energética dos nodos. A Tabela 6 mostra os resultados obtidos com relação a alguns fatores que influenciam no consumo de bateria dos nodos.

Tabela 6 – Desempenho da rede com relação a alguns fatores que influenciam no consumo de energia da rede.

Abordagem	Colisões PHY	Desistências CSMA/CA	Falhas de Transmissão	Deadline expirado
Naive CHs	1383	10	75	–
GLHOVE CHs	974	9,8	66	–
Naive Sensores	200	8,3	7,8	–
GLHOVE Sensores	136,	8	6	–
Naive Total	109077	2973	4887	5709
GLHOVE Total	75240	2854	4043	1315

O número de colisões 9% menor do GLHOVE com relação a *Naive Approach* é um dos principais fatores para seu melhor desem-

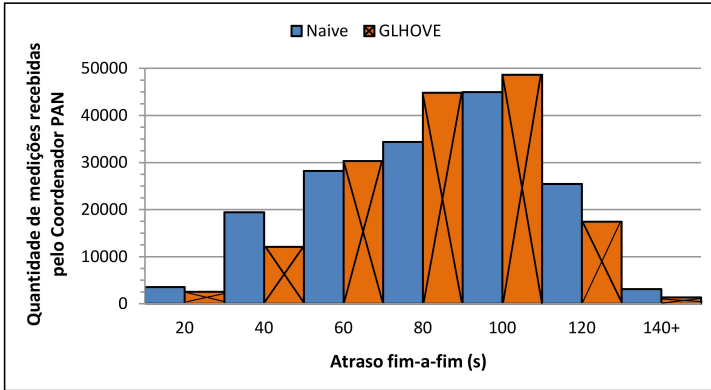


Figura 32 – Árvore balanceada com 32 CHs: comparação do atraso fim-a-fim entre o GLHOVE e a *Naive approach*.

penho energético (Ver gráficos das Figuras 33 e 34). Essa redução no número de colisões, resulta em uma menor quantidade de desistências do algoritmo BEB do protocolo CSMA/CA por atingir o valor máximo de expoente de *backoff* (cerca de 1%) e em uma menor quantidade de falhas de transmissão por não recebimento do quadro de ACK (aproximadamente 5%).

A redução expressiva na quantidade de *deadlines* expirados (aproximadamente 31%) é consequência principalmente da política de envio/descartes adotada pelos sensores, a qual reduz a carga de mensagens na rede, contribuindo também para a redução do consumo energético dos nodos.

Na Figura 33 é realizada uma comparação entre o consumo energético entre o GLHOVE e a “Naive Approach” por nível da árvore. Os resultados representam uma média de todos os dispositivos pertencentes a um nível em particular. Em todos os níveis o GLHOVE se sobressaiu melhor, como consequência da sua política de envio/descarte. No nível 0, que contém apenas o PC, o GLHOVE economizou cerca de 5% mais energia do que a “Naive Approach”. Nos demais níveis, que incluem os CHs e os seus sensores, eles tiveram um menor gasto energético quando o GLHOVE foi usado. Realizando uma comparação da energia poupada por todos os CHs da rede, o GLHOVE diminuiu o consumo em 2,3%. Para todos os sensores, a redução foi cerca de 0,5%.

O gráfico da Figura 34 traça um comparativo entre o GLHOVE e a *Naive Approach* da quantidade total de energia consumida pela

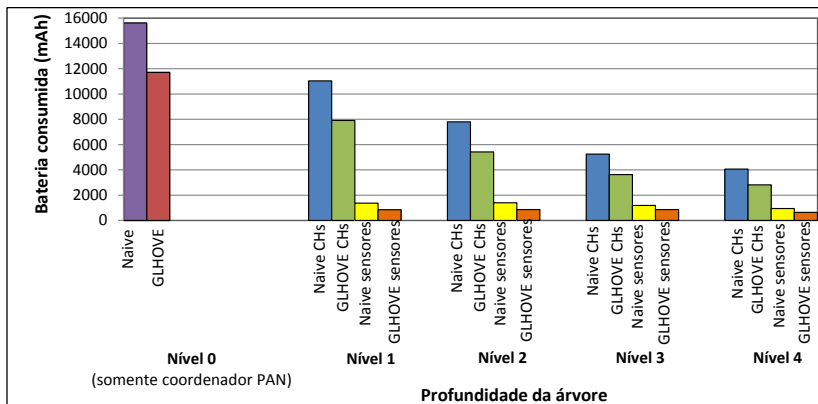


Figura 33 – Árvore balanceada com 32 CHs: comparação do consumo de bateria do PC, dos CHs e dos sensores entre o GLHOVE e a *Naive approach*.

rede, ou seja, o valor médio dissipado por todos os elementos que a compõe (PC, CHs e sensores). Enquanto que o consumo energético na *Naive Approach* foi em torno de 4250 mAh, o GLHOVE gastou aproximadamente 3000 mAh da energia da rede. Essa redução de 1250 mAh representa uma considerável economia de 30%.

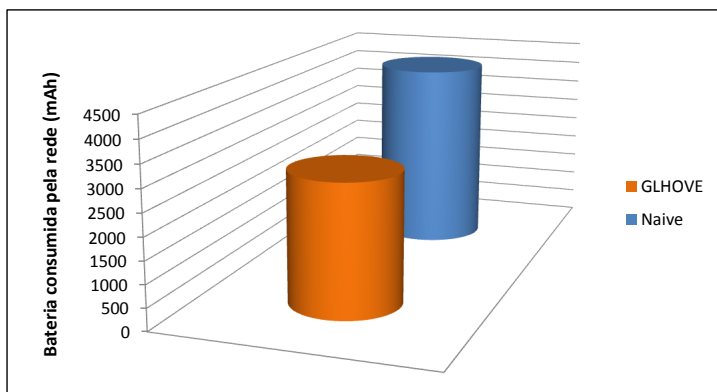


Figura 34 – Árvore balanceada com 32 CHs: comparação do consumo de bateria da rede entre o GLHOVE e a *Naive approach*.

Estes resultados indicam que o GLHOVE é capaz de poupar

uma quantidade significativa de energia dos nodos. Em simulações mais longas e, portanto, em situações reais, a utilização do GLHOVE tende a aumentar consideravelmente o tempo de vida da rede.

6.3.2 Árvore desbalanceada com 20 *cluster heads*

A propensão a falhas de nodos seja por terem sofrido algum dano físico irreparável ou por terem as suas baterias exauridas pode impossibilitá-los de colaborar com a rede. Ademais, muitos nodos podem apresentar falhas intermitentes, deixando de cooperar com a rede por um tempo, mas voltando a ter condição de se comunicar após um determinado período. Assim, eventuais implantações de novos sensores são necessárias para manter a RSSF em operação.

A entrada/saída de novos nodos/*clusters* da rede tornam a topologia das RSSF dinâmica e imprevisível. Além disso, a alta densidade de nodos torna altamente desejável que esses dispositivos possuam a capacidade de se auto-organizar, formando autonomamente a estrutura de comunicação lógica da rede.

Assim, manter balanceada a árvore de comunicação formada pelos CHs é uma tarefa desafiadora. Portanto, o GLHOVE deve ser capaz de operar satisfatoriamente mesmo quando a RSSF está organizada sob a forma de uma árvore desbalanceada, com ramos formados pelos *clusters* com diferentes níveis de profundidade máxima na árvore.

O propósito deste segundo cenário de teste é avaliar o desempenho do GLHOVE sob essa perspectiva. Supondo que a rede do cenário de teste apresentado na seção 6.3.1 (Figura 28) tenha operado por um longo período, é razoável admitir que a topologia da RSSF tenha se alterado para uma nova configuração (Figura 35), devido ao esgotamento de energia de vários nodos. Neste caso em específico, 12 *clusters* deixaram inteiramente de funcionar, gerando uma árvore desbalanceada com 20 CHs.

Nas simulações realizadas, cada *cluster* permanece coordenando dez sensores. O *QoSMark* também permaneceu fixado em 5 mensagens por *cluster*.

O gráfico da Figura 36 ilustra a variação do II da rede para a “*Naive Approach*” e o “GLHOVE” a cada BI. Conforme pode ser observado, após o período de inicialização da rede, o II para a “*Naive Approach*” variou entre 80% e 88%. Esses valores ligeiramente maiores que os obtidos para o cenário apresentado na Seção 6.3.1 são consequência da menor carga na rede, devido a redução da quantidade de sensores; Por

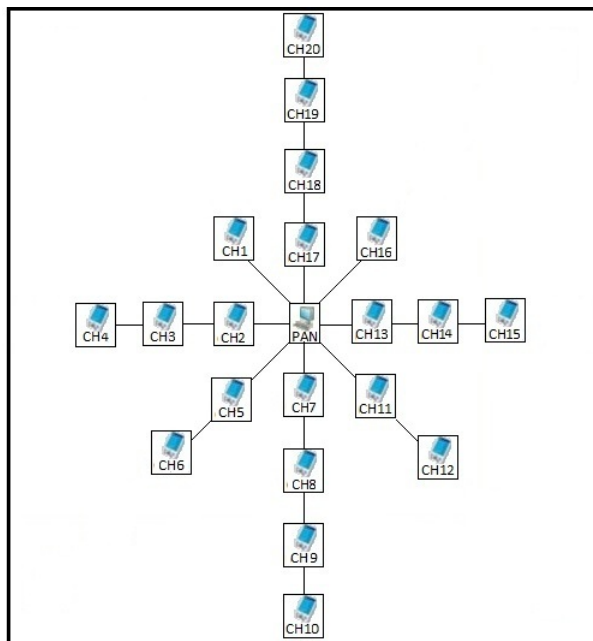


Figura 35 – Rede *cluster tree* desbalanceada após a operação da RSSF por um longo período. Disposição aproximada dos 20 CHs e suas associações.

outro lado, da mesma forma que no experimento anterior, o GLHOVE manteve esse mesmo índice acima de 90%.

Comparando o número de mensagens de cada *cluster* que foram recebidas pelo coordenador PAN constata-se que o GLHOVE, além de ter sido mais imparcial, atingiu a QoS desejado (Figura 37). Da mesma forma que no experimento anterior foram considerados somente os dados coletados a partir do décimo quinto BI.

No gráfico da Figura 37 pode ser observado que o GLHOVE mantém uma média aproximada de 80 mensagens enviadas com sucesso por cada *cluster*, alcançando a QoS esperada de 5 mensagens transmitidas por BI. Em contrapartida, a “*Naive Approach*” apresenta uma variação muito grande quando *clusters* de diferentes profundidades são comparados. Enquanto que os *clusters* do nível 1 (próximo ao PC) enviaram aproximadamente duas vezes mais mensagens do que era esperado, os *clusters* de níveis intermediários enviaram uma quantidade um pouco superior ao esperado (em torno de 10 a 20 mensagens) e os de pro-

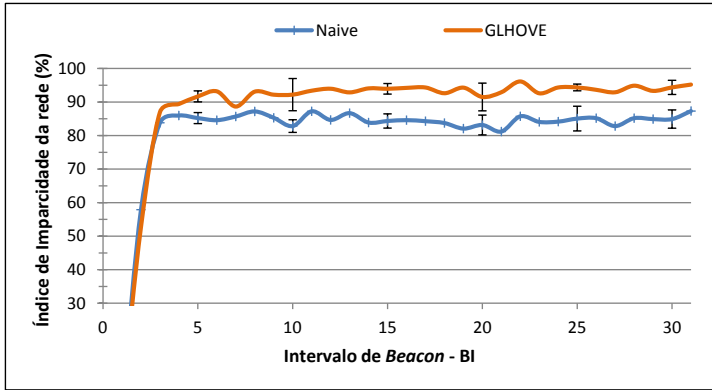


Figura 36 – Árvore desbalanceada com 20 CHs: Índice de Imparcialidade do GLHOVE e da *Naive approach* a cada BI.

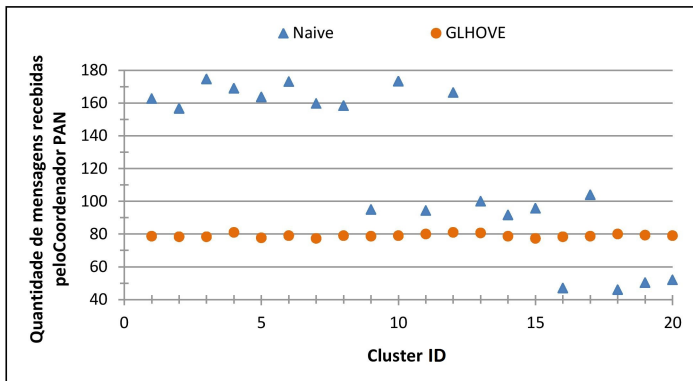


Figura 37 – Árvore desbalanceada com 20 CHs: quantidade média de mensagens recebidas pela estação base, de cada *cluster* da rede.

fundidade 4 transmitiram com sucesso um pouco mais da metade das mensagens desejadas.

Por fim, a comparação realizada do consumo energético dos nós entre o GLHOVE e a “Naive Approach” por nível da árvore (Figura 38) mostra que o GLHOVE possibilita um aumento do tempo de vida da rede. No nível 0, que contém apenas o PC, o GLHOVE economizou cerca de 6,5% mais energia do que a “Naive Approach”. Realizando uma comparação da energia economizada por todos os CHs da rede,

o GLHOVE diminui o consumo em 2,85%. Para todos os sensores, a redução foi cerca de 0,5%. Como era esperado, o PC e os CHs economizaram mais energia do que no experimento anterior (seção 6.3.1), devido à menor quantidade de nodos a eles associados.

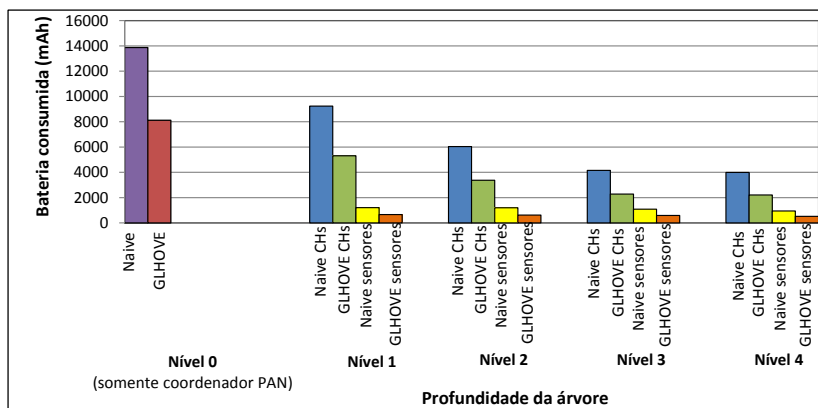


Figura 38 – Árvore desbalanceada com 20 CHs: comparação do consumo de bateria do PC, dos CHs e dos sensores entre o GLHOVE e a *Naive approach*.

6.3.3 Árvore balanceada com 20 *cluster heads*

Uma rede balanceada composta por 20 *clusters* também foi simulada com o objetivo de fazer um comparativo do desempenho do GLHOVE com a árvore desbalanceada do cenário anterior. A disposição dos CHs é mostrada na Figura 39. Foram mantidos os mesmos parâmetros de simulação dos experimentos anteriores.

O gráfico da Figura 40 ilustra a variação do II da rede para o “*Naive Approach*” e o GLHOVE a cada BI. Conforme pode ser observado, após o período de inicialização da rede, o II para a *Naive Approach* variou entre 75% a 80% na maior parte do tempo. Por outro lado, o GLHOVE manteve esse mesmo índice acima de 95% por quase todo o período de simulação. As pequenas oscilações ocorridas são esperadas e decorrentes do fator de ajuste utilizado.

Comparando o número de mensagens dos diferentes *clusters* que foram recebidas pelo coordenador PAN constata-se que o GLHOVE, atingiu a QoS desejada. Na Figura 41 pode ser observado que o GLHOVE

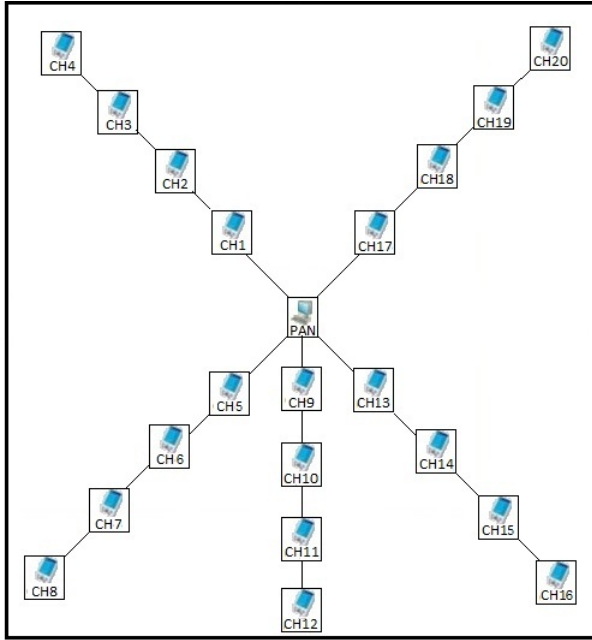


Figura 39 – Rede *cluster tree* balanceada com 20 CHs.

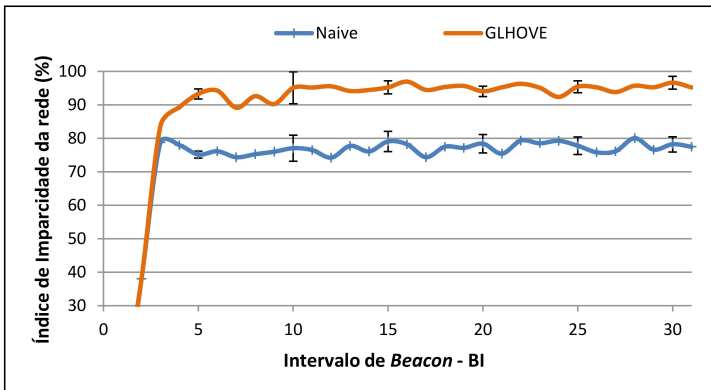


Figura 40 – Árvore balanceada com 20 CHs: Índice de Imparcialidade do GLHOVE e da *Naive approach* a cada BI.

mantém uma média aproximada de 80 mensagens enviadas com sucesso

por *cluster*, alcançando a QoS solicitada de 5 mensagens transmitidas por BI. Em contrapartida, o “*Naive Approach*” apresenta uma variação muito grande quando *clusters* de diferentes profundidades são comparados. Enquanto que os *clusters* do nível 1 (próximos ao PC) enviaram mais que o dobro da quantidade de mensagens esperada, os de profundidade 2 enviaram de 25% a 50% mais mensagens do que o desejado e os *clusters* dos níveis inferiores (3 e 4) transmitiram com sucesso um pouco mais da metade das mensagens desejadas.

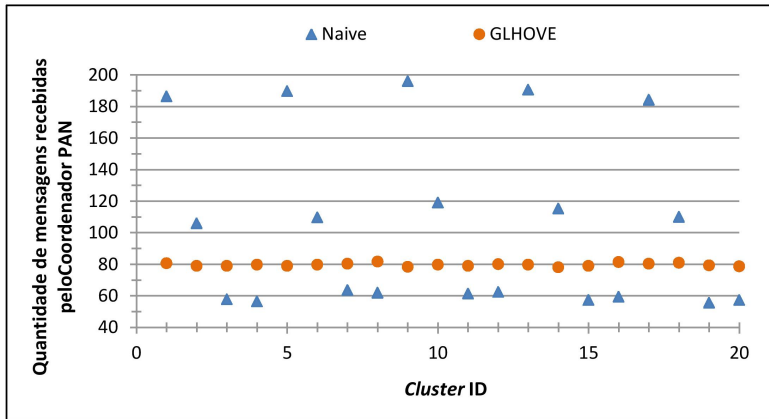


Figura 41 – Árvore balanceada com 20 CHs: quantidade média de mensagens recebidas pela estação base, de cada *cluster* da rede.

Essa acentuada diferença entre as duas abordagens é uma consequência dos fatores mencionados no Capítulo 5. Pelo fato dos CHs do primeiro nível estarem diretamente conectados com a estação base, eles não competem com os sensores de nível superior (associados com o seu coordenador). Assim, a perda de mensagens devido a colisões é reduzida, aumentando a possibilidade de sucesso das transmissões desses coordenadores. Dessa forma, o “*Naive Approach*”, diferentemente do GLHOVE, favorece os nodos pertencentes aos níveis superiores na transmissão de dados pelo fato de não implementar nenhuma política de controle de acesso ao canal além do protocolo CSMA/CA do IEEE 802.15.4.

Na Figura 42 é realizada uma comparação entre o consumo energético entre o GLHOVE e a “*Naive Approach*” por nível da árvore. Os resultados representam uma média de todos os dispositivos pertencentes a um nível em particular. Em todos os níveis o GLHOVE se so-

bressaiu melhor, como consequência da sua política de envidescarte. No nível 0, que contém apenas o PC, o GLHOVE economizou cerca de 3,6% mais energia do que a “*Naive Approach*”. Nos demais níveis, que incluem os CHs e os seus sensores, eles tiveram um menor gasto energético quando o GLHOVE foi usado. Realizando uma comparação da energia economizada por todos os CHs da rede, o GLHOVE diminuiu o consumo em 3%. Para todos os sensores, a redução foi cerca de 0,65%.

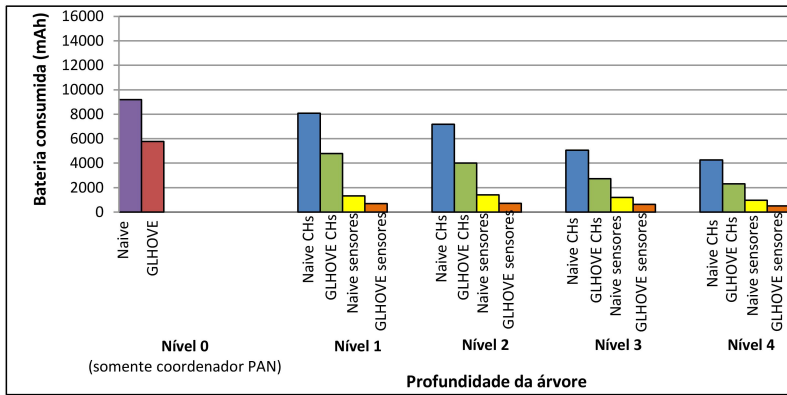


Figura 42 – Árvore balanceada com 20 CHs: comparação do consumo de bateria do PC, dos CHs e dos sensores entre o GLHOVE e a *Naive approach*.

O gráfico da Figura 43 faz uma comparação do desempenho do GLHOVE entre a rede balanceada com a rede desbalanceada do cenário anterior. Observa-se que o II da rede desbalanceada se mantém um pouco inferior ao da rede balanceada ao longo de quase todo o período de simulação. Apesar disso, o GLHOVE se mostrou capaz de manter a homogeneidade da transmissão dos dados em ambos os cenários, mesmo havendo a possibilidade na rede desbalanceada de alguns *clusters* serem beneficiados por estarem em um ramo da árvore cujo canal de comunicação sofre menos congestionamento e seus coordenadores sejam menos sobrecarregados com mensagens vindas de *clusters* dos níveis inferiores.

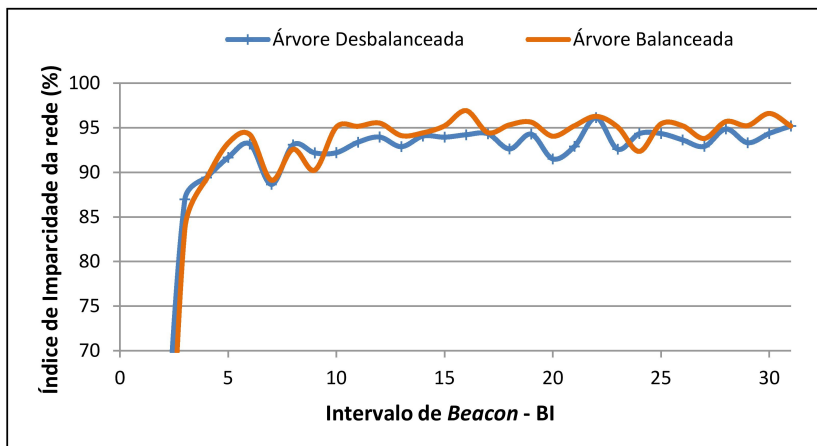


Figura 43 – Comparação do Índice de Imparcialidade do GLHOVE entre as RSSFs balanceada e desbalanceada compostas por 20 *clusters*.

6.3.4 Distribuição ponderada do recurso

A ocorrência de algum evento que necessita de uma observação mais cuidadosa em decorrência dos potenciais riscos que ele oferece, pode levar à aplicação de sensoriamento requerer que os nodos sensores da região afetada enviem uma quantidade maior de amostras, melhorando a precisão da tomada de decisão. Nesse caso, a RSSF, por solicitação da aplicação, deve elevar o valor de QoS do *cluster* correspondente por monitorá-la.

Por conseguinte, em situações de sobrecarga da rede, as demais regiões no caminho de comunicação entre a área afetada e a estação base deverão diminuir seus valores de QoS para um valor mínimo aceitável pela aplicação, de forma a evitar o congestionamento daquele fluxo, possibilitando que o *cluster* de maior prioridade cumpra com o que lhe foi solicitado.

Dessa forma, a necessidade de atribuir diferentes valores de QoS para diferentes *clusters* requer a utilização do Índice de Imparcialidade Ponderado (*IIP*), apresentado na seção 3.4.2.1, para dimensionar corretamente a justiça no acesso ao canal de comunicação, garantindo a imparcialidade da rede mesmo com a priorização de alguns fluxos.

Dois cenários foram simulados utilizando a rede balanceada da Figura 28. No primeiro cenário apenas a região monitorada pelo CH

15 foi priorizada, tendo seu *QoSMark* fixado em 8 mensagens. Para compensar esse aumento, os demais CHs daquele ramo (CH 13, 14 e 16) tiveram seu *QoSMark* reduzido para 4 mensagens. No segundo cenário, quatro diferentes regiões, pertencentes a diferentes fluxos e níveis, monitoradas pelos CHs 2, 9, 15 e 24 foram priorizadas. A Tabela 7 mostra os novos valores de QoS para os *clusters* afetados pelas mudanças de requisito da aplicação nesse segundo cenário.

Tabela 7 – Novos valores de QoS para os *clusters* determinados pela aplicação.

CH	<i>QoSMark</i>	CH	<i>QoSMark</i>
1	4	9	8
2	8	10	4
3	4	11	4
4	4	12	4
13	3	21	3
14	3	22	3
15	11	23	3
16	3	24	11

A Figura 44 mostra os resultados do II_P para ambos os cenários a cada BI. O II_P foi muito similar para ambos os cenários, porém, enquanto que o primeiro cenário apresenta uma instabilidade ligeiramente maior do que o GLHOVE com QoS fixo apresentado na Seção 6.3.1, o cenário 2 apresentou variações um pouco maiores, começando a manter constantemente a imparcialidade da rede acima de 90% somente a partir do vigésimo quinto BI. Entretanto, ambos mantêm seus II_P acima de 85% a partir do quinto BI, apresentando resultados melhores do que a “*Naive Approach*” discutida na Seção 6.3.1.

Comparando o número de mensagens de cada *cluster* individualmente que foram recebidas pelo PC (Figura 45), constata-se que ambos os cenários atingiram a QoS desejada para todos os *clusters*. Novamente foram considerados somente os dados coletados a partir do décimo quinto BI.

No cenário 1, o CH 15 enviou aproximadamente 120 mensagens representativas da região por ele monitorada e, portanto, atendeu a requisição da rede de 8 mensagens enviadas por BI. Os *clusters* 13, 14 e 16, transmitiram em torno de 60 mensagens, cumprindo com a solicitação de 4 mensagens enviadas por BI. Os demais *clusters* da rede, permaneceram com a sua taxa de envio inalteradas ($QoSMark = 5$) e enviaram em média cerca de 80 mensagens.

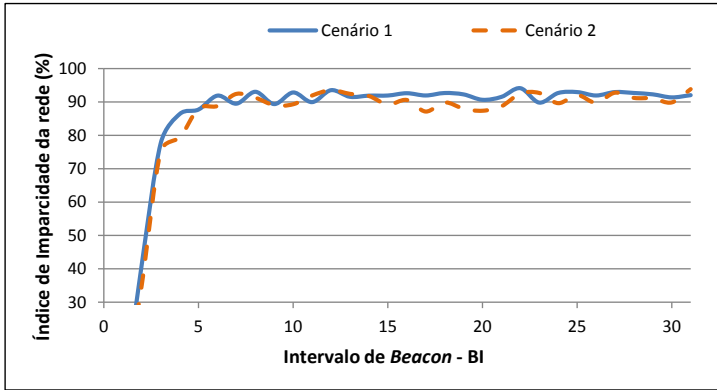


Figura 44 – Índice de Imparcialidade do GLHOVE a cada BI para o cenário 1 (com 1 *cluster* sendo priorizado) e para o cenário 2 (com 4 *clusters* sendo priorizados).

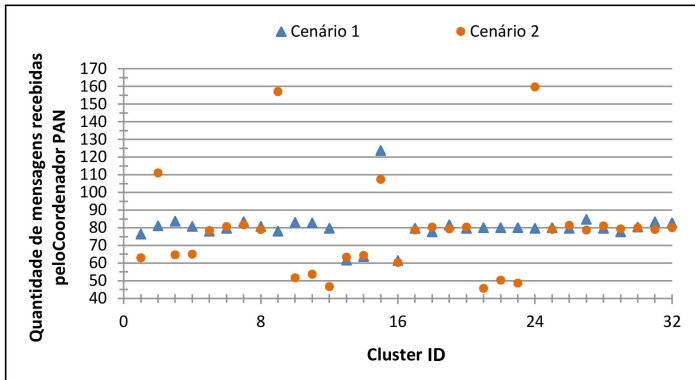


Figura 45 – Quantidade média de mensagens recebidas pela estação base de cada *cluster* da rede.

No cenário 2, mesmo com 4 *clusters* de diferentes níveis e ramos da árvore tendo seus requisitos de QoS alterados, todas as regiões mantiveram o padrão de envio de mensagens próximo do esperado. Os *clusters* 2 e 15 transmitiram aproximadamente 110 mensagens, um pouco menos das 120 que eram esperadas, enquanto que os *clusters* 9 e 24 enviaram cerca de 160 mensagens. Os *clusters* com QoS igual a 3, enviaram cerca de 50 mensagens cada e os *clusters* com QoS igual a 4,

transmitiram em torno de 60 a 70 mensagens. Os demais, enviaram em média 80 mensagens atendendo a QoS solicitada de 5 mensagens por BI.

Com base nesses resultados, pode-se concluir que o GLHOVE com QoS dinâmico pode ser utilizado em conjunto com o escalonamento de *beacon* dinâmico discutido na seção 4.3. Enquanto que o escalonamento dinâmico de *beacons* promove a redução do atraso fim-a-fim, aumentando a frequência de transmissão dos *clusters* que detectaram o evento bem como a dos CHs ao longo do caminho de comunicação entre eles e a estação base, o GLHOVE padroniza a taxa de transmissão de mensagens, priorizando efetivamente as regiões que carecem de maior atenção (aumentando seus valores de QoS para que elas transmitam mais dados do que as demais).

7 CONCLUSÕES

7.1 REVISÃO DAS MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS

As RSSF são formadas por pequenos dispositivos chamados nodos sensores, os quais contêm um ou mais sensores capazes de realizar o monitoramento de uma grandeza física do ambiente no qual estão inseridos. Além dos seus outros componentes (processador, memória e bateria), eles possuem um módulo de comunicação sem fio para a transmissão dos dados obtidos, de forma a torná-los acessíveis ao usuário ou sistema externo para os quais essas informações são de interesse.

A tendência de miniaturização desses dispositivos pode levar no futuro ao desenvolvimento de sensores de escala nanométricas. Em conjunto com a redução dos custos de produção, isso pode elevar a milhares o número de sensores de uma RSSF. Entretanto, individualmente, os nodos de uma RSSF não são confiáveis. Ademais, o meio de comunicação no qual estes atuam está sujeito a ruídos, interferências eletromagnéticas e outros tipos de falhas. A implantação de uma grande quantidade de nodos, os quais atuam de forma cooperativa para monitorar uma determinada área, caracteriza um dos paradigmas mais importantes das RSSF: a confiabilidade dos dados é baseada no conjunto das medições individuais dos nodos.

A presença de uma quantidade de dados elevada nessas redes, em virtude da grande quantidade de nodos e da elevada frequência cujas medições são realizadas, requer a utilização de técnicas de fusão da informação para diminuir a quantidade de dados a serem transmitidos. Além disso, essas técnicas aumentam a confiabilidade dos valores obtidos, colaborando para que as RSSF forneçam uma visão global do fenômeno monitorado.

Por conseguinte, em RSSFs densas, a manutenção e o ajuste dos parâmetros de forma manual se tornam inviáveis, sendo necessário o desenvolvimento de abordagens nas quais os nodos possam se configurar de forma autônoma, mas com um senso coletivo e colaborativo.

Por serem redes hierárquicas as RSSF IEEE 802.15.4 *cluster tree*, são adequadas para o monitoramento em larga escala. Contudo, o protocolo CSMA/CA definido nesse padrão para coordenar e controlar o acesso ao canal não garante justiça no acesso ao meio de comunicação.

Dessa forma, conforme ressaltado no capítulo 1, este trabalho foi guiado no sentido de estudar e propor uma solução para um problema que até então não havia sido percebido:

- Como garantir o monitoramento uniforme, com relação a quantidade de mensagens enviadas pelos diferentes *clusters*, em uma RSSF IEEE 802.15.4 *cluster tree*, de forma a possibilitar uma visão global e precisa do fenômeno monitorado?

Seguindo o problema representado pela questão supracitada, foi proposta, desenvolvida e avaliada nesta dissertação uma abordagem autônoma, intitulada GLHOVE, para autoconfiguração dos parâmetros que definem se um nodo sensor irá ou não transmitir uma mensagem, cujo conteúdo é um conjunto de medições realizadas sobre alguma variável do ambiente. O GLHOVE foi projetado para oferecer garantias de QoS à aplicação e, de forma indireta, oferecer mecanismos para economizar energia dos nodos com o objetivo de prolongar o tempo de vida da rede.

7.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO

Inicialmente foi realizado um estudo do protocolo IEEE 802.15.4 em uma RSSF, composta por uma grande quantidade de nodos organizados sob a topologia *cluster tree*. Observou-se que a aleatoriedade provocada pela utilização do CSMA/CA no controle do acesso ao meio, em conjunto com o acúmulo de mensagens nas filas dos CHs, ocasionava uma variação na quantidade de mensagens dos diferentes *clusters* que chegavam à estação base, não representando homogeneamente as diferentes regiões monitoradas. Os *clusters* do primeiro nível da árvore eram constantemente favorecidos, em virtude da menor contenção pelo acesso ao meio e também por estarem mais próximos do coordenador PAN.

A partir da detecção deste problema, foi proposto o GLHOVE com o objetivo de garantir o monitoramento uniforme, padronizando a quantidade de mensagens enviadas pelos diferentes *clusters*. A partir de um valor de QoS pré-estabelecido, os nodos são capazes de autoajustarem as suas probabilidades de envio de forma a transmitir a quantidade de mensagens estabelecida pelo seu coordenador. Dessa forma, todos os nodos colaboram com a rede no sentido de não congestioná-la, além de contribuírem para aumentar o tempo de vida da rede, uma preocupação recorrente no projeto das RSSFs.

7.3 CONTRIBUIÇÕES E ESCOPO DO TRABALHO

A presente dissertação apresentou diversas contribuições, sendo que a primeira foi um estudo do comportamento do padrão IEEE 802.15.4 em RSSF densas organizadas sob a topologia *cluster tree*.

Mostramos que a utilização do protocolo CSMA/CA no gerenciamento do acesso ao canal de comunicação compartilhado entre os nodos faz com que o padrão IEEE 802.15.4 não garanta uma visão uniforme do ambiente monitorado em RSSFs *cluster tree*. O GLHOVE foi desenvolvido para contornar esse problema. As simulações realizadas mostram que o GLHOVE é capaz de garantir a manutenção da imparcialidade no acesso ao canal de comunicação em RSSFs cuja árvore de comunicação é balanceada e até mesmo em árvores desbalanceadas. Essa característica é importante, pois devido a topologia da rede ser altamente dinâmica e imprevisível, é extremamente difícil, senão impossível, manter a árvore de comunicação balanceada.

O GLHOVE evita que determinadas regiões acabem sendo prejudicadas, pelo fato dos sensores nela inseridos não conseguirem transmitir mensagens na granularidade esperada pela aplicação. Além disso, a homogeneidade dos dados possibilita ao usuário ou sistema externo formar uma visão global e consistente do fenômeno observado.

A manutenção de um alto II bem como um valor de QoS dentro dos limites tolerados, indica um algoritmo de boa qualidade que consegue manter o objetivo e, simultaneamente, fazer com que toda a rede colabore de maneira uniforme com a atividade de monitoramento. Esse fato também proporciona uma redução do consumo energético dos nodos, sendo uma característica muito desejada devido às severas restrições de energia desses dispositivos.

Esta primeira etapa, na qual foram realizados experimentos para as RSSF balanceadas, resultou em uma publicação na 18ª edição da IEEE *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation* (ETFA).

A capacidade do GLHOVE de se adaptar para fornecer diferentes valores de QoS para diferentes *clusters*, torna possível a priorização de regiões que se tornam *hotspots* em virtude da ocorrência de algum evento, possibilitando aumentar a redundância das informações representativas dessas áreas cujo interesse momentâneo é maior. Consequentemente, o processo da tomada de decisões se torna mais confiável, diminuindo a probabilidade de erros.

Por fornecer uma visão global e imparcial de todo o sistema, o monitoramento uniforme fornecido pelo GLHOVE é altamente desejá-

vel por diversas aplicações. No cenário industrial, cada área do chão de fábrica pode ser monitorada com a mesma justiça, o que facilita a identificação de problemas no processo e habilita o supervisor a tomar ações rápidas para contorná-los. O monitoramento ambiental também se beneficia com a utilização do GLHOVE. Desastres naturais em geral, como incêndios e enchentes, podem ser detectados em sua fase inicial, possibilitando que as medidas cabíveis sejam adotadas de forma a prevenir catástrofes de maiores dimensões.

Este trabalho completo, com todas as suas contribuições, foi submetido ao processo de avaliação da revista *Journal of Network and Computer Applications*. Até a conclusão deste trabalho, nenhuma consideração havia sido realizada pelos revisores sobre a possibilidade deste ser aceito para publicação.

7.4 TRABALHOS FUTUROS

O GLHOVE se mostrou robusto e flexível, sendo capaz de funcionar adequadamente em diferentes situações. Sua integridade é mantida mesmo com a rede *cluster tree* possuindo uma árvore de comunicação desbalanceada ou a aplicação demandando diferentes requisitos de QoS para diferentes áreas de monitoramento.

Entretanto, a otimização dos parâmetros do algoritmo de cálculo da probabilidade de envio é um ponto que precisa ser investigado com maior atenção em trabalhos futuros. Fatores de ajuste muito pequenos demandam mais tempo para a convergência do algoritmo, enquanto fatores de ajuste maiores introduzem maiores variações na imparcialidade da rede. A utilização de Teoria dos Jogos para o ajuste das probabilidades ou um algoritmo genético para otimização desse parâmetro podem ser possíveis soluções.

Ademais, pretende-se estudar e avaliar o comportamento do GLHOVE sob os seguintes aspectos:

- Quando a RSSF está sujeita a interferências de outras fontes como outras redes IEEE 802.15.4, diferentes dispositivos sem fio e também equipamentos ruidosos;
- Quando os nodos da RSSF sofrem com variações dinâmicas de força do sinal de comunicação (*Link Quality Indicator* – LQI);
- Em cenários cuja RSSF conta com a presença de nodos móveis, os quais migram de um *cluster* para outro durante intervalos de tempo variáveis e intermitentes.

REFERÊNCIAS

- ABRAMSON, N. The Aloha System - Another Alternative for Computer Communications. *Proceedings of Fall Joint Computer Conference*, p. 281–285, 1970.
- AKYILDIZ, I.F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. Wireless Sensor Networks: a survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002.
- ALMEIDA, L.; CHEN, S.; WANG, Z. A Dynamic Dual-Rate Beacon Scheduling Method of ZigBee/IEEE 802.15.4 for Target Tracking. *Sixth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, p. 103–109, 2010.
- AMMARI, H.M.; DAS, S.K. Centralized and Clustered k-coverage Protocols for Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Computers*, v. 61, n. 1, p. 118–133, 2012.
- AYERS, M.; LIANG, Y. Gureen Game: An energy-efficient QoS Control Scheme for Wireless Sensor Networks. *Green Computing Conference and Workshops*, p. 1–8, 2011.
- BANDARA, H.M.N.D.; JAYASUMANA, A.P.; ILLANGASEKARE, T.H. A Top-Down Clustering and Cluster-Tree-Based Routing Scheme for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 2011, p. 1–17, 2011.
- BAO, X.; JU, Y. A Coverage-guaranteed Nodes Scheduling Algorithm in Clusters for Wireless Sensor Networks. *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, v. 2, p. 2265–2268, 2012.
- BISHT, M.; CHHETRI, S. A Survey on the Coverage of WSNs. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, v. 3, n. 3, p. 295–300, 2013.
- CARDEI, M.; THAI, M.T.; LI, Y.; WU, W. Energy-Efficient Target Coverage in Wireless Sensor Networks. *IEEE International Conference on Computer Communications*, p. 1976–1984, 2005.
- CENA, G.; VALENZANO, A.; VITTURI, S. Wireless Extensions of Wired Industrial Communications Networks. In: *5th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 2007. p. 273–278.

CHEN, D.; VARSHNEY, P.K. QoS Support in Wireless Sensor Networks: a survey. In: *International Conference on Wireless Networks*, 2004. v. 233.

CHEN, F.; DRESSLER, F. A Simulation Model of IEEE 802.15.4 in OMNeT++. 6. *GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze*, 2007.

CUOMO, F.; LUNA, S.D.; CIPOLLONE, E.; TODOROVA, P.; SUIHKO, T. Topology Formation in IEEE 802.15.4: cluster-tree characterization. *Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, p. 276–281, 2008.

DARGIE, W.; POELLABAUER, C. *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*, Wiley, 2010.

DASARATHY, B.V. Information Fusion - What, where, why, when, and how? *Information Fusion*, p. 76–77, 2001.

DIAS, M.A.F.S. As Chuvas de Novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos., Epagri/CIRAM, 2008.

DIETRICH, I.; DRESSLER, F. On the Lifetime of Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, v. 5, n. 1, p. 1–38, 2009.

DWIVEDI, A.K.; VYAS, O.P. Wireless Sensor Network: At a Glance. *Recent Advances in Wireless Communications and Networks*, p. 299–326, *Intechopen*, 2011.

ELMENREICH, W. *Sensor Fusion in Time-Triggered Systems*. Dissertação (Mestrado) — Technische Universität Wien, 2002.

FAN, G.; JIN, S. Coverage Problem in Wireless Sensor Network: a survey. *Journal of Networks*, v. 5, n. 9, p. 1033–1040, 2010.

GHOSH, A.; DAS, S.K. Coverage and Connectivity Issues in Wireless Sensor Networks: a survey. *Pervasive and Mobile Computing*, v. 4, n. 3, p. 303–334, 2008.

GUNGOR, V.C.; HANCKE, G.P. Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 56, n. 10, p. 4258–4265, 2009.

HAENGGI, M. Opportunities and Challenges in Wireless Sensor Networks. In: *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*, 2005.

HEFEEDA, M.; BAGHERI, M. Randomized k-Coverage Algorithms For Dense Sensor Networks. *26th IEEE International Conference on Computer Communications*, p. 2376–2380, 2007.

HEINZELMAN, W.B.; CHANDRAKASAN, A.P.; BALAKRISHNAN, H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Micro-sensor Networks. *IEEE Transaction on Wireless Communications*, v. 1, n. 4, p. 660–670, 2002.

HSIN, C.; LIU, M. Network Coverage using Low Duty-cycled Sensors: Random & Coordinated Sleep Algorithms. *Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2004.

HUANG, C.; TSENG, Y.; WU, H. Distributed Protocols for Ensuring both Coverage and Connectivity of a Wireless Sensor Network. *ACM Transactions on Sensor Network*, v. 3, n. 1, p. 1–22, 2007.

HUANG, C.; TSENG, Y. The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network. *Proceedings of the 2nd ACM international conference on Wireless sensor networks and applications*, p. 115–121, 2003.

HURTADO-LÓPEZ, J.; CASILARI, E.; ARIZA-QUINTANA, A. Enabling IEEE 802.15.4 Cluster-Tree Topologies in OMNeT++. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques.*, 2009.

IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. *Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, IEEE Computer Society, 2011.

IYER, R.; KLEINROCK, L. QoS Control for Sensor Networks. *IEEE International Conference on Communications*, v. 1, p. 517–521, 2003.

JAIN, R.K.; CHIU, D.W.; HAWKES, W.R. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System. *ACM Transaction on Computer Systems*, 1984.

JONG, S. *Low Cost Disdrometer Improved Design and Testing in an Urban Environment*. Dissertação (Mestrado) — Delft University of Technology, 2010.

KOUBAA, A.; ALVES, M.; ATTIA, M.; NIEUWENHUYSE, A.V. *Collision-Free Beacon Scheduling Mechanisms for IEEE 802.15.4/Zigbee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks*, 2006.

KOUBAA, A.; ALVES, M.; TOVAR, E. Modeling and Worst-case dimensioning of Cluster-Tree Wireless Sensor Networks. *IEEE Real-Time Systems Symposium*, 2006.

LAHDIR, M.; TAHANOUT, M.; LAGHROUCHE, M.; AMEUR, S. Optimization of Energy Consumption of Rain Gauge Network Using MSG Infrared Image. *Sensors & Transducers*, v. 130, n. 7, p. 38–47, 2011.

LI, J.; BLAKE, C.; DE COUTO, D.S.J.; LEE, H.I.; MORRIS, R. Capacity of ad hoc Wireless Networks. *In the Proceedings of the 7th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2001.

LI, J.; LI, K.; ZHU, W. Improving Sensing Coverage of Wireless Sensor Networks by employing Mobile Robots. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, p. 899–903, 2007.

LIU, B.; BRASS, P.; DOUSSE, O.; NAIN, P.; TOWSLEY, D. Mobility Improves Coverage of Sensor Networks. *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, p. 300–308, 2005.

LOUREIRO, A.A.F.; NOGUEIRA, J.M.S; RUIZ, L.B.; MINI, R.A.F.; NAKAMURA, E.F.; FIGUEIREDO, C.M.S. Redes de Sensores Sem Fio. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, 2003.

MEGUERDICHIAN, S.; KOUSHANFAR, F.; POTKONJAK, M.; SRIVASTAVA, M.B. Coverage Problems in Wireless ad-hoc Sensor Networks. *Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, v. 3, p. 1380–1387, 2001.

MESSER, H.; ZINEVICH, A.; ALPERT, P. Environmental Sensor Networks Using Existing Wireless Communication Systems for Rainfall and Wind Velocity Measurements. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, n. April, p. 32–38, 2012.

MOURA, C. *Catástrofe Climática Ocorrida na Região Serrana do Rio de Janeiro em 12/01/2011*. CPTEC/INPE, 2011.

MULLIGAN, R. Coverage in Wireless Sensor Networks: a survey. *Network Protocols and Algorithms*, v. 2, n. 2, p. 27–53, 2010.

NAKAMURA, E.F.; LOUREIRO, A.A.F.; FRERY, A.C. Information Fusion for Wireless Sensor Networks. *ACM Computing Surveys*, v. 39, n. 3, 2007.

NENE, M.J.; DEODHAR, R.S.; PATNAIK, L.M. D-UREA: Distributed Uncovered Region Exploration Algorithm for Reorganization of Sensor Sodes to Maximize Coverage. *4th International Workshop on Sensor Networks and Ambient Intelligence*, p. 883–888, 2012.

O'ROURKE, J. *Art Gallery Theorems and Algorithms*. Oxford University Press, 1987.

PATIL, S.; DAS, S.R.; NASIPURI, A. Serial Data Fusion Using Space-filling Curves in Wireless Sensor Networks. *IEEE SECON*, p. 182–190, 2004.

PESOVIC, U.M.; MOHORKO, J.J.; BENKIC, K.; CUCEJ, Z.F. Single-hop vs. Multi-hop – Energy Efficiency Analysis in Wireless Sensor Networks. *TELFOR - 18th Telecommunications Forum*, 2010.

PINTO, A.S.R. *Abordagens Autônomicas para Qualidade de Serviço da Comunicação em Redes de Sensores sem Fio Densas com Requisitos Temporais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. Programa de Pós-Graduação em Eng. de Automação e Sistemas.

PINTO, A.S.R.; CAMADA, M.; DANTAS, M.A.R.; MONTEZ, C.; PORTUGAL, P.; VASQUES, F. Genetic Machine Learning Algorithms in the Optimization of Communication Efficiency in Wireless Sensor Networks. *35th Annual Conference of IEEE*, p. 2448–2453, 2009.

RAMESH, M.V. Wireless Sensor Network for Disaster Monitoring. In: *Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design*. Yen Kheng Tan, p. 1–20, 2010.

RUIZ, L.B.; NOGUEIRA, J.M.; LOUREIRO, A.A.F. Sensor Network Management. In: *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*, 2005.

SALMI, A.; ELOMAA, L.; KOPSALA, P.; LAUKKANEN, E. Piezoelectric Vaisala Raincap Rain Sensor Applied to Drop Size

Distribution Monitoring. *World Meteorological Organization Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation*, 2008.

SEMPREBOM, T. *Explorando Descartes de Ativações de Tarefas Periódicas em Redes IEEE 802.15.4*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. Programa de Pós-Graduação em Eng. de Automação e Sistemas.

SEMPREBOM, T.; ZOMER, G.; MILACK, A.; MONTEZ, C.; PINTO, A.L.R. (m,k)-Gur Game : Explorando Descartes de Envio para Aumentar Diversidade Espacial Redes de Sensores sem Fio Autônomicas. In: *Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais*, 2012.

STANKOVIC, J.A.; ABDELZAHER, T.F.; LU, C.; SHA, L.; HOU, J.C. Real-Time Communication and Coordination in Embedded Sensor Networks. *Proceedings of IEEE*, v. 91, n. 7, 2003.

TAN, G.; JARVIS, S.A.; KERMARREC, A. Connectivity-Guaranteed and Obstacle-Adaptive Deployment Schemes for Mobile Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 8, n. 6, p. 836–848, 2009.

TIAN, D.; GEORGANAS, N.D. A Coverage-preserving Node Scheduling Scheme for Large Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, p. 32–41, 2002.

VARGA, A. *OMNeT++ User Manual*, 2010. Disponível em: <www.omnetpp.org>.

VARGA, A.; HORNIG, R. An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment. *Proceedings of the First International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications Networks and Systems*, 2008.

WANG, G.; CAO, G.; PORTA, T.L. Movement-assisted Sensor Deployment. *IEEE International Conference on Computer Communications*, 2004.

WANG, Q.; HASSANEIN, H.; XU, K. A Practical Perspective on Wireless Sensor Networks. In: *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*, 2005.

- WANG, X.; KAR, K. Throughput Modelling and Fairness Issues in CSMA/CA based ad-hoc Networks. *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, v. 1, p. 23–34, 2005.
- XING, G.; WANG, X.; ZHANG, Y.; LU, C.; PLESS, R.; GILL, C. Integrated Coverage and Connectivity Configuration for Energy Conservation in Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, v. 1, n. 1, p. 36–72, 2005.
- YAMAOKA, Y.; TAKAGISHI, S. Time Shift Grouping Access in IEEE 802.15.4 MAC Beacon Mode for Layered-tree Networks. *5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, p. 338–342, 2008.
- YE, F.; ZHONG, G.; CHENG, J.; LU, S.; ZHANG, L. PEAS: A Robust Energy Conserving Protocol for Long-lived Sensor Networks. *23rd International Conference on Distributed Computing Systems*, 2003.
- YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless Sensor Network Survey. *Computer Networks*, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, 2008.
- YIGITEL, M.A.; INCEL, O.D.; ERSOY, C. QoS-aware MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a survey. *Computer Networks*, Elsevier, v. 55, n. 8, p. 1982–2004, 2011.
- ZHANG, H.; HOU, J.C. Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, v. 1, p. 89–124, 2005.
- ZHU, C.; ZHENG, C.; SHU, L.; HAN, G. A Survey on Coverage and Connectivity Issues in Wireless Sensor Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, v. 35, n. 2, p. 619–632, 2012.
- ZIGBEE. *ZigBee Specification*. 2008. Disponível em: <www.zigbee.org>.

APÊNDICE A - Aplicações

A.1 MONITORAMENTO DE PLANTAS INDUSTRIAIS

A proposição de soluções que melhorem a produtividade e eficiência dos sistemas industriais tem se tornado um importante desafio, considerando a complexidade das plantas atuais, com características distribuídas e dinâmicas. No chão de fábrica, a incorporação crescente de RSSF – atuando em conjunto e gradualmente substituindo os sistemas cabeados legados – é uma forte tendência por apresentar diversas vantagens, tais como a fácil reconfiguração do sistema, monitoramento e atuação remota, além da redução dos custos relacionados com a implantação e manutenção dessa infraestrutura.

Um dos principais desafios para a utilização dessas redes no chão de fábrica é a hostilidade desses ambientes. A exposição a extremos de temperatura e pressão, vibração, bem como altos níveis de umidade, sujeira e poeira, tornam os sensores muito suscetíveis a falhas mecânicas, reduzindo a confiabilidade das suas medições (GUNGOR; HANCKE, 2009). Ademais, os canais de comunicação utilizados para comunicação estão sujeitos a ruídos causados por equipamentos (máquinas de solda, por exemplo), interposição temporária de obstáculos entre dispositivos comunicantes, como os veículos guiados automaticamente - AGVs, e interferências de outras redes de comunicação (outras redes compartilhando a banda 2.4 GHz ISM).

Uma solução para esse problema é a implantação de redes com uma grande densidade de nodos fazendo uso de técnicas de fusão de sensores competitiva para reduzir a quantidade de dados (ELMENREICH, 2002). Nessas técnicas, nodos são implantados de forma redundante, de forma que nem todos precisem operar simultaneamente. Assim, é possível selecionar alguns nodos e colocá-los para dormir através de um escalonamento de sono. Com o desligamento dos seus rádios os nodos economizam energia, o que ocasiona um efeito global na rede, prolongando o seu tempo de vida e reduzindo a ocupação desnecessária do meio (um recurso cada vez mais disputado em ambientes industriais).

Topologias *cluster tree* podem ser adequadas no monitoramento da indústria. Do ponto de vista da RSSF, os *clusters* modelam as células de manufatura que compõem uma planta industrial. A comunicação multissalto entre os *clusters* possibilita a expansão da área de alcance da rede, moldando a sua topologia as variedades de plantas industriais existentes, desde as mais simples até as de maior escala. Cada *cluster* pode demandar um alto *throughput*, com várias pequenas mensagens sendo transmitidas periodicamente em curtos períodos de tempo, implicando em uma alta taxa de ocupação do meio. Pelo fato do acesso

ao meio de comunicação ser compartilhado entre todos os nodos que compõem cada *cluster*, essa característica pode acarretar em colisões e falhas de comunicação, comprometendo o desempenho da rede. Nesse caso, a aleatoriedade e imprevisibilidade do CSMA/CA podem favorecer alguns nodos em detrimento de outros no processo de comunicação de dados. Para aplicações em que é necessário manter uma visão global e homogênea do que está acontecendo no chão de fábrica não se tem como prover garantias de que as informações recolhidas pelos diferentes *clusters* representem de maneira uniforme as diferentes regiões da rede. As abordagens de disseminação de dados em RSSF precisam lidar com esse problema.

A.2 MONITORAMENTO DE CHUVA

A chuva é um fenômeno natural que há muito tempo tem atraído o interesse da comunidade científica devido aos seus efeitos para a sociedade. As catástrofes naturais decorrentes de chuvas intensas, que registram um grande volume de água precipitado em um curto espaço de tempo, como as enchentes e os deslizamentos de terra, têm aumentado a uma taxa alarmante e são grandes ameaças à vida humana (RAMESH, 2010).

Um exemplo são as enchentes ocorridas no estado de Santa Catarina em 2008 devido a um período de 5 dias com elevadas taxas de precipitação, as quais afetaram em torno de 60 cidades e mais de 1,5 milhão de pessoas. Mais recentemente, em 2011, a região serrana do Rio de Janeiro também foi afetada por um fenômeno de mesma natureza, deixando milhares de pessoas desabrigadas. Situações como essas evidenciam a vulnerabilidade dos centros urbanos aos extremos de precipitação e confirmam a urgente necessidade do desenvolvimento de sistemas capazes de prevêê-los (DIAS, 2008; MOURA, 2011).

Sistemas de observação atmosférica atualmente incluem estações na superfície com pluviômetros¹), radares e sistemas de satélite. Entretanto, o alto custo dos pluviômetros atualmente disponíveis no mercado inviabiliza a sua implantação em larga escala, causando o surgimento de lacunas na região monitorada. Pelo fato da chuva ser um fenômeno altamente variável no tempo e no espaço, suas medições combinadas acabam por não ser suficientes na granularidade temporal e espacial adequada para avaliar seus efeitos nas áreas urbanas, dificultando a

¹O pluviômetro é um aparelho de meteorologia usado para recolher e medir a quantidade de chuva precipitada em um local durante um determinado tempo.

obtenção de uma imagem global e confiável da distribuição de precipitação (LAHDIR et al., 2011; MESSER; ZINEVICH; ALPERT, 2012).

A.2.1 Disdrômetro acústico

O disdrômetro acústico (também chamado somente de disdrômetro) é um instrumento de medição de chuva ao nível do solo. Devido à simplicidade de seus componentes, pode ser produzido por uma pequena fração do preço dos pluviômetros profissionais atualmente disponíveis no mercado, sendo uma alternativa a esses medidores tradicionais (JONG, 2010). O disdrômetro pode ser construído artesanalmente a partir de uma bandeja plástica de CD/DVD, um transdutor piezoelétrico e um circuito feito a partir de componentes eletrônicos triviais².

Outra vantagem do uso de disdrômetros é que eles necessitam de pouca ou nenhuma manutenção. Essa característica é importante, pois esses sensores são muitas vezes implantados em locais de difícil acesso, cuja intervenção humana se torna uma tarefa árdua ou até mesmo impossível de ser realizada.

O principal componente do disdrômetro é o transdutor piezoelétrico (Figura 46). Uma vantagem do uso desse dispositivo é que ele não é afetado por campos magnéticos ou radiação (DARGIE; POELLA-BAUER, 2010). Seu funcionamento é baseado na detecção acústica do impacto individual das gotas de chuva. A vibração causada pela colisão do pingo de chuva no sensor deforma o elemento piezoelétrico, gerando um pulso elétrico (voltagem) entre os seus eletrodos (SALMI et al., 2008; JONG, 2010). O grau de deformação depende da intensidade da colisão, ou seja, quanto maior a gota maior será a tensão elétrica gerada.

O cálculo dessa voltagem pode ser realizado através da Equação A.1, onde $U(t)$ é a voltagem gerada, c é uma constante dependente do material piezoelétrico, $dp_v(t)/d(t)$ é a componente vertical da força variante no tempo, m é a massa da gota e v_t é a sua velocidade terminal (SALMI et al., 2008).

$$U(t) = c \frac{dp_v(t)}{d(t)} = cm \frac{dv_t(t)}{d(t)}, \quad (\text{A.1})$$

O resultado das medições realizadas por um disdrômetro é uma sequência de valores de energia dos pingos de chuva. Por calibração, é possível derivar seus respectivos diâmetros e obter uma distribuição

²Fonte: <http://vortexelectricaz.blogspot.com.br/2010/06/solid-stat-e-weather-systems-electronics.html>

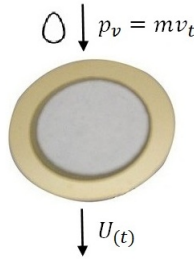


Figura 46 – A gota da chuva possui um *momentum* vertical (p_v). Ao colidir com o transdutor piezoelétrico, seu sinal acústico é convertido em uma voltagem $U_{(t)}$, a partir da qual se pode inferir o diâmetro da gota.

do tamanho das gotas de chuva (*Raindrop Size Distribution* - RSD), a partir da qual é possível calcular a quantidade total de precipitação e a sua intensidade.

A.2.2 RSSF de disdrômetros

Além de apresentar sensores que possibilitem o desenvolvimento de aplicações de larga escala, um sistema capaz de auxiliar na prevenção de calamidades como as ocasionadas pela chuva deve oferecer suporte à coleta contínua de dados. Frequentemente, essas informações são armazenadas em *data loggers*, os quais são dispositivos responsáveis por manter localmente as medições realizadas pelos sensores (JONG, 2010). No entanto, por gerar um *dead time*³ entre duas medições consecutivas, limitando a taxa de amostragem do sensor, a sua utilização para monitoramento em tempo real se mostra inadequada.

Por conseguinte, o uso de uma tecnologia que possua um atraso mínimo para processamento e transmissão dos dados se torna imprescindível, uma vez que os desastres naturais ocorrem em intervalos de tempo muito curtos. Nesse contexto, as RSSF aparecem como uma solução natural. Sua interação intrínseca com o meio físico e a sua capacidade de capturar, processar e transmitir dados críticos com uma

³ *Dead time* é o período de tempo após a ocorrência de um evento no qual o sistema entre em um estado de recuperação, não sendo capaz de registrar outro evento nesse intervalo. No contexto apresentado, está relacionado com o tempo necessário para que o *data logger* realize o processamento e o posterior armazenamento do sinal de uma gota.

frequência elevada, as tornam uma solução efetiva, confiável e de baixo custo de manutenção (RAMESH, 2010).

Todavia, um obstáculo para a sua implantação é a não confiabilidade das medições dos disdrômetros individuais, seja pela fragilidade ou imprecisão do transdutor piezoelétrico. A água retida em folhas de árvores, por exemplo, pode gotejar no sensor após a chuva, resultando em leituras imprecisas. Uma maneira de amenizar esses erros é a difusão de uma grande densidade de nodos sensores de baixo custo, a qual aumenta o grau de redundância da rede, tornando-a menos suscetível a essas falhas (HAENGGI, 2005).

Portanto, a utilização de RSSFs compostas por disdrômetros de baixo custo para o monitoramento de precipitação em tempo real parece uma solução bastante promissora para auxiliar os sistemas convencionais na prevenção de desastres naturais provocados pela chuva. Porém, como toda RSSF projetada para monitoramento ambiental, soluções devem ser delineadas para reduzir a quantidade de dados a ser transmitida, minimizando os custos de comunicação e o consumo energético dos nodos (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

A frequência elevada de medições que é demandada por essa aplicação gera uma enorme quantidade de dados a serem transmitidos. Da mesma forma que nas redes industriais, o uso do CSMA/CA para controle de acesso ao meio dificulta a obtenção de uma visão global e homogênea do fenômeno monitorado. A diversidade espacial da chuva requer que o sistema possa detectar extremos de precipitação em qualquer região. O envio da mesma quantidade de mensagens dos diferentes *clusters* aumenta a confiabilidade do sistema para avaliar a quantidade de chuva precipitada nas diferentes áreas. A noção de "cobertura espacial uniforme" é importante de ser mantida nesse tipo de aplicação.