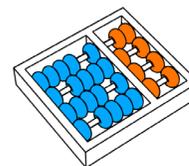


Tiago Pedroso da Cruz de Andrade

**“Integração de Redes de Sensores sem Fio com  
tecnologia Rádio-sobre-Fibra”**

CAMPINAS  
2013





Universidade Estadual de Campinas  
Instituto de Computação

Tiago Pedroso da Cruz de Andrade

“Integração de Redes de Sensores sem Fio com  
tecnologia Rádio-sobre-Fibra”

Orientador(a): Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Instituto de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA POR  
TIAGO PEDROSO DA CRUZ DE ANDRADE,  
SOB ORIENTAÇÃO DE PROF. DR. NELSON  
LUIS SALDANHA DA FONSECA.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Nelson Luis Saldanha da Fonseca", written over a horizontal line.

Assinatura do Orientador(a)

CAMPINAS

2013

iii

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca do Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica  
Ana Regina Machado - CRB 8/5467

An24i Andrade, Tiago Pedroso da Cruz de, 1986-  
Integração de redes de sensores sem fio com tecnologia Rádio-sobre-Fibra /  
Tiago Pedroso da Cruz de Andrade. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Nelson Luis Saldanha da Fonseca.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de  
Computação.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Rádio-sobre-Fibra. 3. Arquitetura híbrida. 4.  
Sistemas de comunicação sem fio. I. Fonseca, Nelson Luis Saldanha da, 1961-. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Integration of wireless sensors networks with Radio-over-Fiber  
technology

**Palavras-chave em inglês:**

Wireless sensors networks

Radio-over-Fiber

Hybrid architecture

Wireless communication systems

**Área de concentração:** Ciência da Computação

**Titulação:** Mestre em Ciência da Computação

**Banca examinadora:**

Nelson Luis Saldanha da Fonseca [Orientador]

Leandro Aparecido Villas

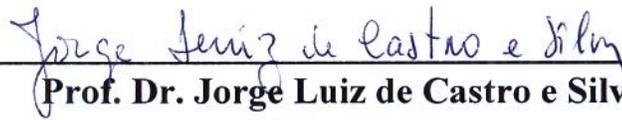
Jorge Luiz de Castro e Silva

**Data de defesa:** 16-08-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Ciência da Computação

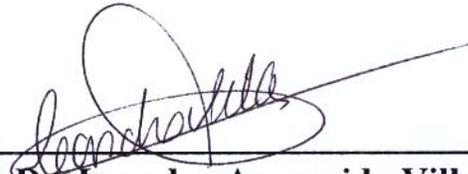
# TERMO DE APROVAÇÃO

Dissertação Defendida e Aprovada em 16 de Agosto de 2013, pela  
Banca examinadora composta pelos Professores Doutores:



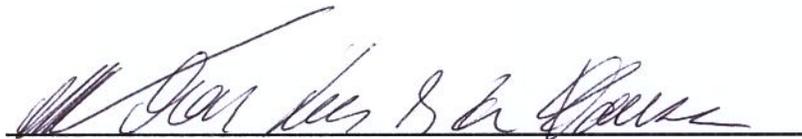
---

**Prof. Dr. Jorge Luiz de Castro e Silva**  
CCT / UECE



---

**Prof. Dr. Leandro Aparecido Villas**  
IC / UNICAMP



---

**Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca**  
IC / UNICAMP



# Integração de Redes de Sensores sem Fio com tecnologia Rádio-sobre-Fibra

Tiago Pedroso da Cruz de Andrade<sup>1</sup>

16 de agosto de 2013

## Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca (*Orientador*)
- Prof. Dr. Leandro Aparecido Villas  
Instituto de Computação - UNICAMP
- Prof. Dr. Jorge Luiz de Castro e Silva  
Departamento de Estatística e Computação - UECE
- Profa. Dra. Juliana Freitag Borin  
Instituto de Computação - UNICAMP (*Suplente*)
- Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho  
Faculdade de Engenharia Elétrica - PUCC (*Suplente*)

---

<sup>1</sup>Suporte financeiro de: Fapesp (processo número 2011/03388-4) 08/2011 - 07/2012.



# Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) characteristics are attractive for various applications, such as monitoring environments and industrial process control. They differ from traditional computer networks in many aspects because they usually have a large number of devices with energy constraints.

The Radio-over-Fiber technology (RoF) associates the radio communication with optical communication, which can reduce the cost of the installation and maintenance of wireless networks, as well as the optimized distribution of radio frequency (RF) signals.

This dissertation presents a novel architecture to connect wireless sensor networks using Radio-over-Fiber technology. It aims to provide greater coverage and lower signal attenuation for wireless sensor networks, given that communication between large distances are made through optical fibers. A single optical link is used to connect different wireless sensors networks, thus forming a single wireless sensors network.

In this novel architecture two different communication medium are shared: the wireless and optical. Current medium access control protocols (MAC) are not adequate to the proposed architecture, because they do not deal with the delays added due to the use of optical fiber as well as the existence of two different shared media communication.

This dissertation proposes and evaluates, through simulations and experimentation, medium access control protocols for novel integrated architecture.



# Resumo

As características das Redes de Sensores sem Fio (*Wireless Sensor Network - WSN*) são atrativas para diversas aplicações, tais como monitoramento de ambientes e controle de processos industriais. Elas diferem das redes de computadores tradicionais em vários aspectos, pois possuem grande número de dispositivos com restrições de energia.

A tecnologia Rádio-sobre-Fibra (*Radio-over-Fiber - RoF*) associa as comunicações rádio com as comunicações ópticas, possibilitando o barateamento da instalação e manutenção de redes sem fio, bem como a distribuição otimizada dos sinais de radiofrequência (*radio frequency - RF*).

Nesta dissertação, apresenta-se uma nova arquitetura de integração de redes de sensores sem fio utilizando a tecnologia Rádio-sobre-Fibra. Objetiva-se fornecer maior cobertura e menor atenuação de sinais para as redes de sensores sem fio, dado que a comunicação entre grandes distâncias são feitas através de fibras ópticas. Um único enlace óptico é utilizado para conectar diferentes redes de sensores sem fio formando, assim, uma única rede de sensores sem fio.

Nessa nova arquitetura dois diferentes meios de comunicação são compartilhados: o sem fio e o óptico. Protocolos de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control - MAC*) existentes não possuem as propriedades necessárias para o correto funcionamento na arquitetura proposta, pois não lidam com a adição de atrasos devido ao uso da fibra óptica nem tão pouco com a existência de dois meios compartilhados de comunicação distintos.

Propõem-se e avaliam-se, através de simulações e experimentação, nesta dissertação, protocolos de controle de acesso ao meio para a nova arquitetura integrada.



# Sumário

<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Resumo</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	3
1.2 Objetivos e Contribuições . . . . .	4
1.3 Produção Científica . . . . .	5
1.4 Organização da Dissertação . . . . .	5
<b>2 Fundamentos Básicos</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução . . . . .	7
2.2 Classificação das Redes sem Fio . . . . .	8
2.3 Redes de Sensores sem Fio . . . . .	10
2.4 Rádio-sobre-Fibra . . . . .	14
<b>3 Controle de Acesso ao Meio</b>	<b>17</b>
3.1 Introdução . . . . .	17
3.2 Acesso ao Meio Livre de Disputas . . . . .	18
3.3 Acesso ao Meio Baseado em Disputas . . . . .	19
3.4 Protocolos MAC para Redes de Sensores sem Fio . . . . .	20
3.4.1 Sensor MAC (S-MAC) . . . . .	21
3.4.2 Timeout MAC (T-MAC) . . . . .	22
3.4.3 Pattern MAC (PMAC) . . . . .	23
3.4.4 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) . . . . .	23
3.4.5 Padrão IEEE 802.15.4 . . . . .	25
3.4.6 Dynamic Sensor Medium Access Control (DSMAC) . . . . .	27
3.4.7 Berkeley Medium Access Control (BMAC) . . . . .	27
3.4.8 Y-MAC . . . . .	28
3.4.9 Self-Organizing Medium Access Control for Sensor Networks (SMACS) . . . . .	29



3.4.10	Data Gathering Medium Access Control (DMAC) . . . . .	30
3.4.11	Traffic-Adaptive Medium Access (TRAMA) . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Comunicação sem Fio</b>	<b>33</b>
4.1	Introdução . . . . .	33
4.2	Propagação . . . . .	34
4.3	Modelos de Propagação . . . . .	34
4.3.1	Modelos de Path-Loss . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Arquitetura Híbrida de Sensores sem fio e Rádio-sobre-Fibra</b>	<b>39</b>
5.1	Introdução . . . . .	39
5.2	Trabalhos Relacionados . . . . .	40
5.3	Arquitetura Proposta - WSN-RoF . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Protocolos de Controle de Acesso ao Meio propostos para WSN-RoF</b>	<b>47</b>
6.1	Introdução . . . . .	47
6.2	Considerações para o projeto . . . . .	48
6.3	Scheduling of Polling Priority Medium Access Control . . . . .	49
6.3.1	Introdução . . . . .	49
6.3.2	Especificação do formato dos quadros MAC . . . . .	51
6.3.3	Constantes e atributos . . . . .	54
6.3.4	Atribuição de prioridades . . . . .	55
6.3.5	Escalonamento e alocação das sinalizações . . . . .	55
6.3.6	Transmissão de Dados . . . . .	58
6.3.7	Confirmação de Recebimento e Retransmissão de Dados . . . . .	60
6.4	Hybrid Medium Access Control for Hybrid Radio-over-Fiber Wireless Sensor Network System . . . . .	61
6.4.1	Introdução . . . . .	61
6.4.2	Especificação do formato dos quadros MAC . . . . .	64
6.4.3	Constantes e atributos . . . . .	68
6.4.4	Estrutura do Superframe . . . . .	69
6.4.5	Escalonamento do Superframe . . . . .	70
6.4.6	Mecanismo CSMA/CA não-persistente . . . . .	72
6.4.7	Transmissão dos dados . . . . .	74
<b>7</b>	<b>Avaliação do desempenho dos protocolos propostos</b>	<b>77</b>
7.1	Introdução . . . . .	77
7.2	Implementação do Simulador . . . . .	78
7.3	Configuração das Simulações . . . . .	79



7.4	Desempenho da rede em função da quantidade de nós sensores e cargas de tráfego . . . . .	81
7.4.1	Parâmetros configuráveis do HMARS . . . . .	82
7.4.2	Comparação dos protocolos . . . . .	86
7.4.3	Consumo de energia . . . . .	94
7.5	Desempenho da rede em função do comprimento do enlace óptico . . . . .	99
7.6	Desempenho da rede em função das diferentes cargas de tráfego . . . . .	104
7.7	Desempenho da rede em função do comprimento do MSDU . . . . .	107
7.8	Desempenho do protocolo SPP-MAC em função da utilização dos quadros de confirmação . . . . .	110
<b>8</b>	<b>Avaliação experimental do desempenho do protocolo SPP-MAC</b>	<b>115</b>
8.1	Introdução . . . . .	115
8.2	Equipamentos utilizados nos experimentos . . . . .	116
8.3	Implementação dos Firmwares . . . . .	118
8.4	Configuração dos Experimentos . . . . .	120
8.5	Desempenho da rede em função da quantidade de nós sensores e diferentes cargas sem utilização da confirmação de recepção . . . . .	121
8.6	Desempenho da rede em função da quantidade de nós sensores e diferentes cargas utilizando confirmação de recepção . . . . .	126
<b>9</b>	<b>Conclusão</b>	<b>131</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>133</b>



# Lista de Tabelas

6.1	Formato do campo <i>Frame Control</i> do protocolo SPP-MAC. . . . .	52
6.2	Valores do subcampo <i>Frame Type</i> do protocolo SPP-MAC. . . . .	52
6.3	Constantes do protocolo SPP-MAC. . . . .	54
6.4	Atributos do protocolo SPP-MAC. . . . .	55
6.5	Principais variáveis e constantes do algoritmo de escalonamento. . . . .	58
6.6	Formato do campo <i>Frame Control</i> do protocolo HMARS. . . . .	65
6.7	Valores do subcampo <i>Frame Type</i> do protocolo HMARS. . . . .	65
6.8	Atributos do protocolo HMARS. . . . .	68
6.9	Constantes do protocolo HMARS. . . . .	68
7.1	Parâmetros do transceptor nas simulações. . . . .	80
7.2	Parâmetros do modelo de path-loss Lognormal Shadowing. . . . .	81
7.3	Parâmetros do protocolo HMARS. . . . .	81
7.4	Prioridade para o tráfego do protocolo SPP-MAC . . . . .	104
7.5	Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, consumo médio de energia e consumo de energia por bit recebido para 8 tamanhos de MSDU para o protocolo HMARS. . . . .	108
7.6	Taxa de entrega para 8 tamanhos de MSDU em função da quantidade de nós sensores para o protocolo HMARS. . . . .	109
7.7	Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, consumo médio de energia e consumo de energia por bit recebido para 8 tamanhos de MSDU para o protocolo SPP-MAC. . . . .	109
8.1	Configuração da camada Física do dispositivos para os experimentos. . . .	120



# Lista de Figuras

2.1	Classificação das redes sem fio. . . . .	8
2.2	Miniaturização dos nós sensores. . . . .	11
2.3	Componentes de uma rede de sensores sem fio. . . . .	12
2.4	Principais componentes de um nó sensor. . . . .	12
2.5	Diagrama da arquitetura Rádio-sobre-Fibra (RoF). . . . .	14
2.6	Layout de um enlace bidirecional de RoF. . . . .	15
4.1	Diagrama de um link rádio. . . . .	33
5.1	Sistema de redes de sensores sem fio tradicional. . . . .	43
5.2	Rede Híbrida de Sensores sem fio e Rádio-sobre-Fibra com vários enlaces ópticos. . . . .	44
5.3	Rede Híbrida de Sensores sem fio e Rádio-sobre-Fibra proposta. . . . .	45
6.1	Formato geral do quadro MAC do protocolo SPP-MAC. . . . .	52
6.2	Formato do quadro de sinalização do protocolo SPP-MAC. . . . .	53
6.3	Formato do quadro de dados do protocolo SPP-MAC. . . . .	54
6.4	Formato do quadro de confirmação do protocolo SPP-MAC. . . . .	54
6.5	Exemplo de execução do algoritmo de escalonamento. . . . .	58
6.6	Comunicação entre os nós sensores da rede e a estação base do protocolo SPP-MAC. . . . .	60
6.7	Comunicação entre a estação base e os nós sensores da rede do protocolo SPP-MAC. . . . .	60
6.8	Fases do protocolo HMARS. . . . .	64
6.9	Formato geral do quadro MAC do protocolo HMARS. . . . .	65
6.10	Formato do quadro de beacon do protocolo HMARS. . . . .	66
6.11	Formato do quadro de dados do protocolo HMARS. . . . .	67
6.12	Estrutura do Superframe do protocolo HMARS. . . . .	70
6.13	Diagrama do mecanismo CSMA/CA não-persistente do protocolo HMARS. . . . .	73
6.14	Comunicação entre a estação base e os nós sensores da rede do protocolo HMARS. . . . .	75



6.15	Comunicação entre os nós sensores da rede e a estação base do protocolo HMARS. . . . .	75
7.1	Taxa de entrega do protocolo HMARS em função do <i>uplink order</i> . . . . .	83
7.2	Vazão efetiva agregada do protocolo HMARS em função do <i>uplink order</i> . . . . .	85
7.3	Vazão efetiva agregada do protocolo HMARS em função do <i>downlink order</i> . . . . .	86
7.4	Taxa de entrega e vazão efetiva agregada dos protocolos pure-ALOHA, CSMA e S-MAC em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para carga de 0.5 quadro por segundo. . . . .	87
7.5	Taxa de entrega do protocolo HMARS em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para diferentes cargas. . . . .	89
7.6	Vazão efetiva agregada do protocolo HMARS em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para diferentes cargas. . . . .	90
7.7	Vazão efetiva agregada do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para diferentes cargas. . . . .	92
7.8	Taxa de sinalização bem sucedida do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para diferentes cargas. . . . .	93
7.9	Consumo médio de energia do protocolo HMARS em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para diferentes cargas. . . . .	95
7.10	Consumo médio de energia do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para diferentes cargas. . . . .	96
7.11	Consumo de energia por bit efetivo recebido base do protocolo HMARS em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para diferentes cargas. . . . .	98
7.12	Consumo de energia por bit efetivo recebido do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para diferentes cargas. . . . .	99
7.13	Vazão efetiva agregada do protocolo S-MAC em função do comprimento do enlace de fibra óptica. . . . .	100
7.14	Vazão efetiva agregada do protocolo SPP-MAC em função do comprimento do enlace de fibra óptica. . . . .	101
7.15	Quantidade de quadros de sinalização enviados no protocolo SPP-MAC em função do comprimento do enlace de fibra óptica. . . . .	102
7.16	Vazão efetiva agregada do protocolo HMARS com <i>uplink order</i> = 4 em função do comprimento do enlace de fibra óptica. . . . .	102
7.17	Vazão efetiva agregada do protocolo HMARS em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para diferentes valores do <i>uplink order</i> . . . . .	105
7.18	Vazão efetiva agregada e taxa de sinalização bem sucedida do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede sem a utilização do mecanismo de priorização. . . . .	106



7.19	Vazão efetiva agregada e taxa de sinalização bem sucedida do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede utilizando o mecanismo de priorização. . . . .	106
7.20	Vazão efetiva agregada do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para diferentes cargas. . . . .	112
7.21	Consumo médio de energia do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de <i>clusters</i> de cobertura na rede para diferentes cargas. . . . .	113
8.1	RFBe. . . . .	116
8.2	BE900. . . . .	117
8.3	Equipamento de Rádio-sobre-Fibra. . . . .	118
8.4	Pilha de camadas. . . . .	119
8.5	Esquemático da topologia dos experimentos. . . . .	121
8.6	Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos <i>clusters</i> de cobertura da rede para carga de 0.5 quadro por segundo sem utilizar confirmação de recebimento. . . . .	123
8.7	Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos <i>clusters</i> de cobertura da rede para carga de 1 quadro por segundo sem utilizar confirmação de recebimento. . . . .	124
8.8	Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos <i>clusters</i> de cobertura da rede para carga de 2 quadros por segundo sem utilizar confirmação de recebimento. . . . .	125
8.9	Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos <i>clusters</i> de cobertura da rede para carga de 4 quadros por segundo sem utilizar confirmação de recebimento. . . . .	126
8.10	Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos <i>clusters</i> de cobertura da rede para carga de 0.5 quadro por segundo utilizando confirmação de recebimento. . . . .	127
8.11	Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos <i>clusters</i> de cobertura da rede para carga de 1 quadro por segundo utilizando confirmação de recebimento. . . . .	128



8.12	Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos <i>clusters</i> de cobertura da rede para carga de 2 quadros por segundo utilizando confirmação de recebimento. . . . .	129
8.13	Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos <i>clusters</i> de cobertura da rede para carga de 4 quadros por segundo utilizando confirmação de recebimento. . . . .	130



# Capítulo 1

## Introdução

As tecnologias sem fio permitem aos usuários maior flexibilidade de comunicação bem como a implantação de redes mais facilmente em comparação com as redes cabeadas, pois não requerem a instalação de cabos para prover conectividade. A comunicação sem fio é uma alternativa para a expansão da cobertura das redes de comunicação cabeadas.

As características das Redes de Sensores sem Fio (*Wireless Sensor Network - WSN*) são atrativas para diversas aplicações e diversos estudos vem sendo conduzido para determinar como estas redes podem influenciar o cotidiano das pessoas. Redes de sensores sem fio diferem das redes de computadores tradicionais em vários aspectos, pois possuem um grande número de dispositivos sensores com restrições de energia distribuídos em grandes áreas geográficas para monitoramento de grandezas e fenômenos físicos [1] [2].

Uma rede de sensores sem fio pode ser definida como uma rede de dispositivos inteligentes chamados de nós sensores (*sensor nodes - SN*) que fornecem recursos de monitoramento e enviam as informações coletadas através de comunicação sem fio. Os dados são enviados, possivelmente através de múltiplos saltos de transmissão, para um nó sorvedouro chamado de estação base que pode estar conectado a outras redes, como a Internet, por meio de um *gateway*. Os nós sensores podem ser estacionários ou móveis, estar cientes de sua localização ou não e podem ser homogêneos ou heterogêneos. Este tipo de rede é apropriado para cenários nos quais não se pode ter uma instalação com fios e se deseja ter acesso contínuo a determinadas informações.

As redes de sensores sem fio tem propriedades interessantes em relação as redes cabeadas, tais como ausência da necessidade de infra-estrutura, escalabilidade, baixo custo, flexibilidade e a pequena demanda de banda passante [2] [3] [4]. No entanto, alguns desafios dificultam a ampla implantação deste sistema no cotidiano das pessoas. Uma questão crítica, por exemplo, é a baixa confiabilidade das redes de sensores sem fio, pois a comunicação se faz no meio sem fio e muitos tipos de interferências ocorrem nos canais de rádio. Esta situação é típica para as redes que transmitem em canais de rádio

compartilhado com outros sistemas de comunicação [5].

Rádio-sobre-Fibra (*Radio-over-Fiber - RoF*) é uma tecnologia emergente que permite a transmissão de sinais rádio frequência em enlaces ópticos. Esta combinação permite tirar proveito das vantagens dos dois sistemas, obtendo-se, assim, um sistema com elevada largura de banda, baixa atenuação e alta mobilidade.

A tecnologia Rádio-sobre-Fibra baseia-se no emprego de enlaces ópticos para a distribuição de sinais rádio frequência (*Radio Frequency - RF*) entre uma Estação Base de Controle (*Base Station Controller - BSC*), que contém uma ou mais estações base, e diversas Unidades de Antena Remota (*Remote Antenna Units - RAUs*). Os sinais rádio frequência, que nas redes sem fio convencionais são modulados e tratados em cada uma das estações base (*Base Stations - BSs*), são convertidos para sinais ópticos nas Unidades de Antenas Remotas e são transportados através de fibras ópticas até a Estação Base de Controle, onde, finalmente, são (de)codificados e (de)modulados. Nestas ocorrem, também, todos os outros tratamentos necessários para o funcionamento da rede [6]. Assim, quase todos os componentes de rádio frequência são centralizados na Estação Base de Controle e as Unidades de Antenas Remotas podem ser extremamente simples e baratas. Os enlaces ópticos funcionam como um meio de transmissão analógico, totalmente transparente para os nós da rede. O processamento centralizado possibilita o barateamento da instalação e manutenção das antenas, dado que o seu hardware é mais simples e todo o processamento e controle da rede (software) é centralizado na Estação Base de Controle, o que torna possível um conhecimento mais preciso sobre a demanda e posicionamento dos nós presentes em toda área de cobertura da rede.

A tecnologia Rádio-sobre-Fibra é considerada uma solução promissora para a expansão das redes sem fio. Ela pode levar à provisão de uma infraestrutura barata e expansível para que as redes sem fio possam aumentar a sua área de cobertura, oferecer maiores taxas de dados para os usuários, diminuir a latência e aumentar a confiabilidade.

Uma opção para a implementação de redes de sensores sem fio com áreas de cobertura maiores é a integração destas através da tecnologia Rádio-sobre-Fibra. Esta integração permite a comunicação com baixa latência, baixa atenuação e maior confiabilidade em comparação com redes de sensores sem fio convencionais [7]. Além disso, o emprego de enlaces Rádio-sobre-Fibra para conectar redes de sensores sem fio reduz, significativamente, o custo do desenvolvimento destas redes em áreas com fibras ópticas não utilizadas, pois não é necessário a instalação de várias estações base. Uma questão importante que surge com a introdução de conexões de fibra óptica entre a Estação Base de Controle e as Unidades de Antenas Remotas é o atraso de propagação introduzido por estas conexões. Este atraso adicional precisa ser incorporado nos protocolos, principalmente nos protocolos MAC que são responsáveis por controlar como os dispositivos acessam o meio.

## 1.1 Motivação

As redes de sensores sem fio tem atraído interesse tanto da comunidade acadêmica quanto da indústria nas últimas décadas, motivando várias perspectivas de aplicações, tais como estudos ambientais, pesquisas oceânicas, automação industrial, monitoramento de grandezas, etc.

No entanto, os maiores problemas dessas redes são a área de cobertura geográfica, a confiabilidade e o consumo de energia nos quais estão relacionados com o hardware dos equipamento. Devido as restrições de energia, a potência de transmissão dos nós sensores destas redes não é muito alta e, conseqüentemente, seu alcance de transmissão é pequeno, o que compromete a área de cobertura geográfica [1].

Para conseguir áreas de coberturas geográficas maiores, as redes de sensores sem fio convencionais usam o mecanismo de múltiplos saltos, desta maneira, quanto maior a área de cobertura da rede, maior será a quantidade de saltos que serão necessários, diminuindo, assim, a confiabilidade e a vida útil da rede. Isto ocorre pois muitos dos nós sensores são utilizados para retransmitirem os dados, da origem até o destino, aumentando a probabilidade de erro durante este processo.

O mecanismo de múltiplos saltos é utilizado para permitir que informações de nós sensores muito distantes da estação base cheguem até ela, pois a comunicação direta não é possível graças as características da propagação do sinal de rádio frequência. Quanto maior o número de nós sensores utilizados para propagar as informações, maiores são as chances destas informações não chegarem até a estação base. Além disso, quando um nó sensor retransmite as informações de outros nós sensores, uma quantidade considerável de energia é gasta, energia que poderia ser utilizada para transmitir informações oriundas deste nó.

Pode-se dizer que a confiabilidade de toda a rede em retransmitir as informações ao longo do caminho é igual a confiabilidade de seu nó sensor menos confiável, ou seja, o nó sensor que primeiro esgotar sua energia ou que apresente uma falha no transceptor.

Com o aumento da quantidade de saltos, uma maior latência e uma menor confiabilidade será experimentada pelos dados. Isto é agravado quando queremos monitorar grandes extensões lineares como oleodutos, gasodutos, linhas de transmissão, etc., pois a extensão pode chegar a milhares de quilômetros, e muito nós sensores (cujo alcance de transmissão é pequeno) serão necessários para propagar os dados da origem até o destino.

Para ampliar a área de cobertura das redes de sensores sem fio sem diminuir ainda mais sua confiabilidade, a integração de várias redes de sensores sem fio (formando vários *clusters* de cobertura) com a tecnologia Rádio-sobre-Fibra torna-se algo inovador e único. Isto permite que as redes de sensores sem fio aproveitem as ótimas características da transmissão óptica, como, por exemplo, a baixa atenuação e o amplo espectro de frequência.

No entanto, algumas limitações são encontradas quando se faz essa integração e uma delas está relacionada com o controle de acesso ao meio, pois protocolos existentes não são muito eficazes neste tipo de sistema.

## 1.2 Objetivos e Contribuições

Para lidar com os desafios das redes de sensores sem fio apresentados, este trabalho propõe um novo paradigma para sistemas de redes de sensores sem fio.

Tal paradigma, chamado de *Sistema Híbrido Rede de Sensores sem Fio sobre Rádio-sobre-Fibra* (WSN-RoF), consiste de um sistema formado por *clusters* de Redes de Sensores sem Fio conectadas por enlaces ópticos utilizando a tecnologia Rádio-sobre-Fibra, no qual um par de fibras ópticas é compartilhado entre todos os *cluster* de cobertura do sistema.

Na arquitetura WSN-RoF, visa-se criar uma rede de monitoramento capaz de percorrer longas distâncias por meio da integração das tecnologias Rádio-sobre-Fibra e Redes de Sensores sem Fio. A utilização da fibra óptica permite o desenvolvimento de redes de sensores sem fio com maior área de cobertura, menor consumo de energia, maior confiabilidade e com tempo de atraso reduzido quando comparado às arquiteturas convencionais.

As principais contribuições desta dissertação são:

- Detalhamento do estado da arte em integração da tecnologia Rádio-sobre-Fibra com outras tecnologias e protocolos de controle de acesso ao meio para redes de sensores sem fio;
- Proposta do novo sistema híbrido que integra redes de sensores sem fio com a tecnologia Rádio-sobre-Fibra;
- Proposta dos protocolos HMARS e SPP-MAC para o controle de acesso ao meio, desenvolvidos exclusivamente para o sistema híbrido proposto;
- Implementação de um módulo com as funcionalidades do sistema Rádio-sobre-Fibra para a realização de simulações com essa tecnologia no simulador de redes *Network Simulator 2 (NS2)*;
- Implementação dos protocolos de controle de acesso ao meio propostos no simulador de redes *Network Simulator 2 (NS2)*;
- Implantação do sistema proposto em pequena escala para realização de experimentos.

### 1.3 Produção Científica

- Artigo publicado na conferência internacional ”*IEEE Latin-America Conference on Communications - 2011 (IEEE LATINCOM - 2011)*”;
- Artigo publicado na revista científica ”*IEEE Latin-America Transactions - 2011*”;
- Artigo publicado na conferência internacional ”*IEEE International Conference on Communications - 2012 (ICC - 2012)*”;
- Artigo publicado no ”*XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - 2012 (SBRC - 2012)*”.

### 1.4 Organização da Dissertação

Os capítulos dessa dissertação estão organizados como segue:

- O Capítulo 2 contém uma revisão sobre os conceitos necessários para a compreensão desta dissertação. São discutidos detalhes sobre a classificação das redes sem fio, as descrições das Redes de Sensores sem Fio e o conceito da tecnologia Rádio-sobre-Fibra.
- O Capítulo 3 apresenta uma ampla revisão bibliográfica dos protocolos de controle de acesso ao meio para redes de sensores sem fio.
- O Capítulo 4 apresenta detalhes sobre a comunicação por rádio frequência, mostrando questões sobre a propagação do sinal rádio em diferentes ambientes. Serão apresentados modelos de perda de percurso utilizados nas simulações.
- O Capítulo 5 detalha a proposta do novo sistema híbrido que integra redes de sensores sem fio e Rádio-sobre-Fibra. São elucidadas as vantagens e desvantagens desta integração.
- O Capítulo 6 detalha a proposta dos novos protocolos de controle de acesso ao meio para o sistema proposto nesta pesquisa. São discutidas as considerações de projeto, bem como as principais propriedades e funcionalidades dos protocolos em questão.
- O Capítulo 7 mostra os resultados obtidos na avaliação de desempenho dos protocolos de controle de acesso ao meio propostos. Todo o processo de avaliação foi realizado através de simulações no *NS2*.

- O Capítulo 8 mostra os resultados obtidos durante a avaliação de desempenho do protocolo de controle de acesso ao meio SPP-MAC realizada através de experimentações.
- O Capítulo 9 conclui esta dissertação, destacando as principais contribuições e potenciais extensões para o trabalho realizado.

# Capítulo 2

## Fundamentos Básicos

### 2.1 Introdução

Avanços recentes na fabricação de circuitos integrados tornaram possível a integração da tecnologia de microssensores, computação de baixa complexidade e comunicação sem fio em um sistema compacto. As redes formadas por estes dispositivos, denominadas Redes de Sensores sem Fio, criaram oportunidades para diversas aplicações. Embora os dispositivos sensores possuam individualmente pouca capacidade, a colaboração entre eles pode gerar a execução de uma tarefa complexa.

Dada a vasta gama de potenciais aplicações, um grande esforço de pesquisa tem sido despendido na direção de tornar as redes de sensores sem fio passíveis de serem utilizadas na prática. Um dos focos tem sido estudar o gerenciamento dessas redes que, principalmente por causa da sua propriedade *ad-hoc* e da escassez de recursos, imprimem uma mudança de paradigma em relação as redes tradicionais.

A tecnologia Rádio-sobre-Fibra surgiu com foco nas redes de telefonia móvel (celular), mas apresenta características interessantes que trazem vantagens também para as redes de dados, por isto a integração de RoF com diversos padrões de redes sem fio tem sido amplamente estudado. A combinação entre RoF e redes de sensores sem fio é bastante promissora pois permitirá o aumento da área de cobertura e uma maior confiabilidade da rede.

Este capítulo aborda alguns conceitos básicos sobre os assuntos envolvidos nesta dissertação. Primeiramente, a Seção 2.2 resume os tipos de redes sem fio existentes e os classifica quanto à cobertura, taxa de transmissão e custo. Na sequência, a Seção 2.3 discute as principais características e peculiaridades das redes de sensores sem fio. O último assunto abordado é a tecnologia Rádio-sobre-Fibra. A Seção 2.4 apresenta uma introdução aos principais conceitos e propriedades deste novo paradigma.

## 2.2 Classificação das Redes sem Fio

As redes sem fio podem ser classificadas, de acordo com a sua cobertura (tamanho das células), padronização e implementação, conforme mostra a Figura 2.1.

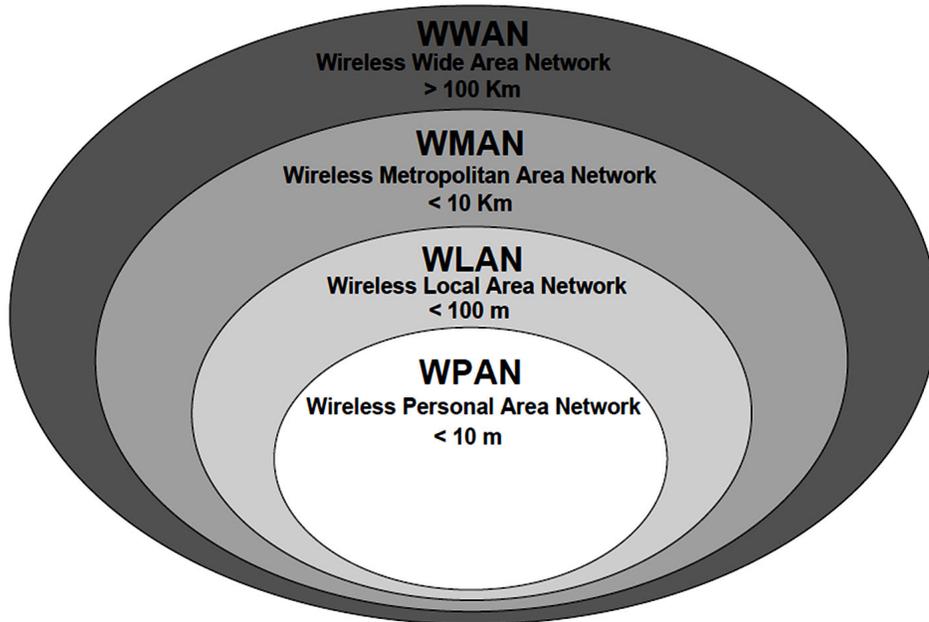


Figura 2.1: Classificação das redes sem fio.

As redes WPAN (*Wireless Personal Area Networks*) são redes sem fio pessoais, com cobertura bastante restrita e aplicações bastante diversificadas. Fazem parte deste grupo o padrão *Bluetooth*, as redes de sensores sem fio e as redes *UWB* (*Ultra Wideband*). A capacidade destas redes se restringe a poucos Mbps com distâncias de até 100 metros. No geral, são redes dinâmicas e autoconfiguráveis, para aplicações específicas como a comunicação entre celular e *headset* ou comunicação máquina-máquina (*Machine-to-Machine - M2M*), como nas redes de sensores sem fio. Os diversos padrões existentes implementam protocolos específicos para as aplicações alvo de cada tipo de rede e, normalmente, estas tecnologias não são utilizadas para fornecer acesso à Internet, dado que esses padrões não suportam a pilha TCP/IP de forma nativa.

As redes WLAN (*Wireless Local Area Networks*) são redes sem fio locais de abrangência restrita a células menores do que 100 metros. Apresentam altas taxas de dados, chegando a centenas de Mbps, mas não possuem infraestrutura que garanta QoS para um grande número de usuários. O padrão *IEEE 802.11*, base das redes Wi-Fi, é o grande representante desse tipo de rede. A versão mais difundida do padrão, o *IEEE 802.11g*, oferece taxa de dados de 54 Mbps, enquanto a mais nova versão do padrão, o *IEEE 802.11n*, oferece

capacidade de até 600 Mbps na camada *Física* com a implementação de canais de 40 MHz e antenas MIMO (*Multiple-Input and Multiple-Output*) 4x4. As redes Wi-Fi são a forma mais utilizada como acesso última milha à Internet por estações móveis, principalmente devido ao seu baixo custo. A grande desvantagem do padrão Wi-Fi está na sua cobertura restrita e baixo desempenho em ambientes outdoor e com mobilidade das estações. Algumas empresas têm utilizado o Wi-Fi como meio para distribuição de Internet em redes públicas com relativo sucesso. O grande número de Pontos de Acesso (*Access Points - APs*) exigidos para que a rede ofereça grande cobertura encarece a tecnologia e torna o seu uso restrito a pequenas cidades ou prédios comerciais como shoppings, estádios e centros de eventos. Algumas pesquisas estudam o uso da tecnologia Rádio-sobre-Fibra para redes sem fio locais, principalmente, para barateamento do custo de instalação dos pontos de acesso e expansão da rede para grandes extensões. O principal problema enfrentado por essas pesquisas é a extensão máxima da fibra suportada pelo Wi-Fi, devido às temporizações pré-determinadas na troca de quadros do controle de acesso ao meio CSMA/CA. Em prédios comerciais, o emprego do Wi-Fi com RoF é promissor, mas em ambientes externos, onde as extensões de fibra podem chegar a centenas de quilômetros, o seu uso é inviável.

As redes WMAN (*Wireless Metropolitan Area Networks*) são redes metropolitanas, com cobertura suficiente para prover acesso à uma cidade (alguns quilômetros de raio) e apresentam acesso com qualidade de serviço para um grande número de usuários. O padrão *IEEE 802.16*, que é a base das redes WiMAX, é um dos principais representantes desse tipo de rede. As redes WiMAX apresentam características importantes que a torna robusta para ambientes *outdoor* e com usuários móveis, como o OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*, modulação adaptativa, antenas MIMO, etc. O custo do WiMAX, assim como outros padrões de redes metropolitanas, é mais alto do que o custo das redes locais, devido à grande infraestrutura necessária para a implantação da rede, que envolve diversas Estações Base, torres e infraestrutura de *backhaul* interligando as células. As redes metropolitanas são focadas em ambientes externos e grandes coberturas, portanto podem tirar proveito da tecnologia da Rádio-sobre-Fibra tanto para o barateamento das estações base quanto para o barateamento da infraestrutura de *backhaul* necessária para interligar as diversas células da rede.

As redes WWAN (*Wireless Wide Areas Networks*) são redes globais, com cobertura que se estende por várias cidades e com mobilidade de altas velocidades. As redes de telefonia celular tradicionais (GSM e CDMA) são exemplos de redes globais. Com a convergência entre as redes de voz e de dados novos padrões têm surgido para disponibilizar acesso à Internet com grandes coberturas. Os padrões de redes 3G são exemplos de redes globais de acesso à Internet, como o UMTS, EV-DO e HSPA. O padrão *IEEE 802.16e* tem sido também implementado como rede global para acesso à Internet, caracterizando-se como

uma rede 3G através da especificação IP-OFDMA do IMT-2000. As futuras redes 4G oferecerão acesso à Internet com alta capacidade (até 1 Gbps com estações estacionárias) e os padrões WiMAX2 (*IEEE 802.16m*) e o LTE-Advanced são fortes candidatos para servirem de base para essas futuras redes sem fio globais. A tecnologia Rádio-sobre-Fibra foi inicialmente vislumbrada para o emprego em redes de longo alcance, como as redes de telefonia. Existem, atualmente, pesquisas para o emprego do RoF em redes 3G, assim como nas futuras redes 4G.

## 2.3 Redes de Sensores sem Fio

Uma nova classe de redes de computadores apareceu nos últimos anos, as chamadas Redes de Sensores sem Fio. Estas redes consistem de dispositivos individuais compactos capazes de sensoriamento, processamento computacional e de comunicações, que viabilizam ao administrador funcionalidades como instrumentação, monitoramento e reação a eventos e fenômenos em um ambiente específico. Estes dispositivos tem que colaborar para cumprir suas tarefas, onde, normalmente, um único dispositivo é incapaz de realizá-la. Além da capacidade de sensoriamento, as redes de sensores sem fio podem ser projetadas para prover habilidades de atuação e controle.

Em essência, os dispositivos dessa classe de rede contém, pelo menos, algum poder computacional, comunicação sem fio e funcionalidades de sensoriamento ou controle. Apesar do fato de que estas redes incluem, muitas vezes, atuadores, o termo 'Rede de Sensores sem Fio' tornou-se o comumente aceito. Às vezes, outros termos como 'Redes de Sensores e Atuadores sem Fio' também são encontrados.

As redes de sensores sem fio podem ser descritas resumidamente como redes formadas por pequenos dispositivos inteligentes dotados de sensores e capazes de comunicação sem fio entre si para disponibilização dos dados de monitoramento onde eles são necessários. Elas estão se tornando cada vez mais comuns em vista da compactação e diminuição do valor dos seus componentes. Com isto, o que antes era controlado por processos não automatizados, hoje é viável controlar através deste tipo de rede, quebrando paradigmas e conseguindo aumentar a eficiência destes processos.

A utilização de sensores sem fio atende a uma grande variedade de áreas de aplicações. Existem sensores para controle de processos químicos, de caldeiras, de detecção de contaminação em área de riscos, etc. Estas necessidades vão até o monitoramento do corpo humano, onde, muitas vezes, os sensores estão ligados ao corpo humano para auxiliar no salvamento de vidas, seja no monitoramento de pacientes em hospitais ou em exames rotineiros.

As redes de sensores sem fio podem ser encontradas em diversas áreas como: *automação residencial e industrial, cuidados pessoais, monitoramento de oleodutos, gasodu-*

tos e aquedutos, controle agropecuário, monitoramento de minas, rastreamento, detecção de intrusos, detecção de incêndios e enchentes, etc.

Construir uma rede de sensores sem fio exige, sobretudo, que os dispositivos que a constituem sejam desenvolvidos de maneira a cumprir os requisitos específicos da aplicação para a qual a rede foi projetada. Os dispositivos podem precisar ser pequenos, baratos, energeticamente eficientes, devem estar equipados com os sensores específicos, a memória necessária bem como necessitam de facilidades de comunicação adequadas.

O desenvolvimento de elementos sensores foi possível graças ao processo de miniaturização, que tornou possível carregar computadores ultraportáteis em bolsas e transportá-los para todos os lugares. Com esta evolução, os dispositivos sensores tornaram-se cada vez menores, como mostra a Figura 2.2.

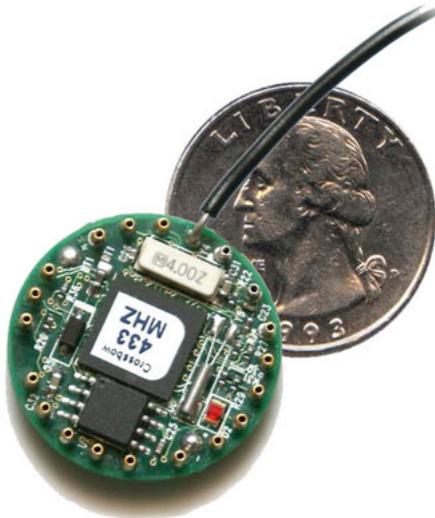


Figura 2.2: Miniaturização dos nós sensores.

Nas redes de sensores sem fio, a utilização de equipamentos pequenos torna-se uma vantagem pela praticidade. Hoje, é possível encontrar pequenos dispositivos sensores que coletam informações e transmitem para centrais de monitoramento em muitos lugares.

Quando se escolhem os componentes de hardware para os nós sensores de uma rede de sensores sem fio, deve-se levar em consideração qual será a aplicação desta rede.

Uma rede de sensores sem fio é composta basicamente por quatro componentes, como mostra a Figura 2.3: um conjunto de *nós sensores* distribuídos, a *interconexão* sem fio, um *elemento coordenador* coordenando os nós sensores e um *equipamento central capaz de coletar os dados* e processá-los.

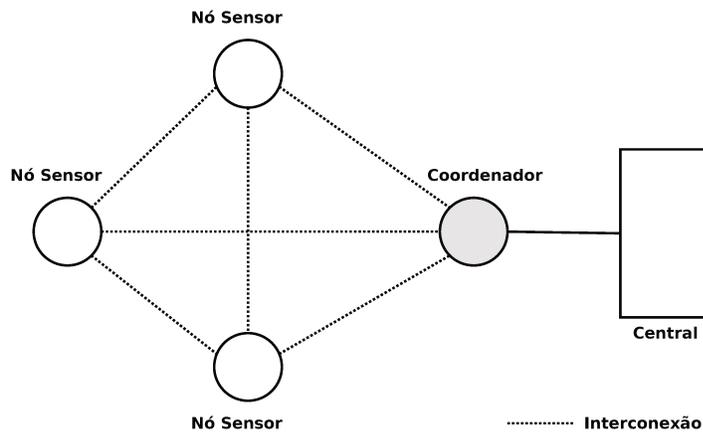


Figura 2.3: Componentes de uma rede de sensores sem fio.

Uma rede de sensores sem fio é composta por um conjunto de elementos sensores, que são formados por alguns componentes cujos principais são mostrados na Figura 2.4 e descritos abaixo:

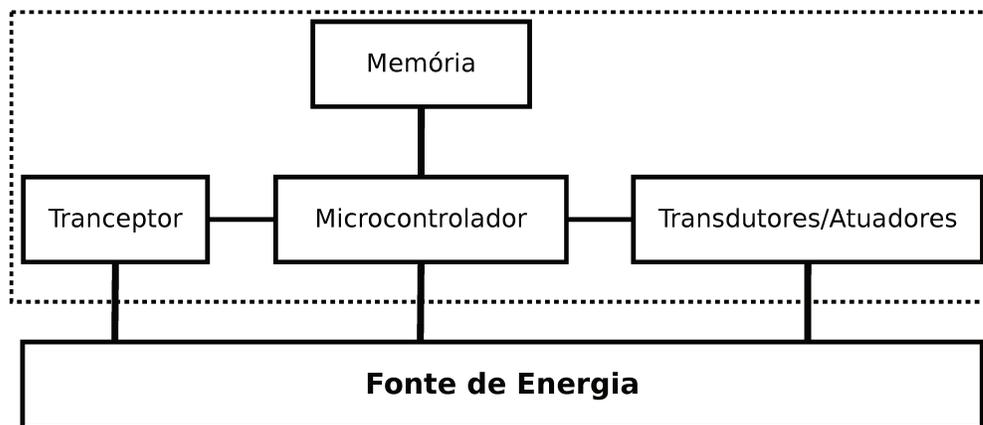


Figura 2.4: Principais componentes de um nó sensor.

- **Microcontrolador:** onde ocorre o processamento do sensor. É responsável pela coleta de dados dos transdutores ou acionamento dos atuadores e pelo envio ou reconhecimento dos dados através do tranceptor.
- **Memória:** é utilizada para armazenar os programas, os protocolos e os dados.
- **Transdutores e Atuadores:** são os dispositivos que permitem a interação do sensor com o ambiente. Os transdutores são os elementos responsáveis por efetuar medidas ou capturar informações do ambiente e transformar em dados que possam ser trabalhados pelo microcontrolador. Os atuadores são dispositivos que podem

interagir com o ambiente ao seu redor, por exemplo, ligando e desligando uma máquina.

- **Transceptor:** é o componente que permite a comunicação através de um meio de comunicação, neste caso, sem fio.
- **Fonte de Energia:** fornece energia ao sistema. No caso de sensores sem fio, muitas vezes estas fontes de energia são baterias.

Cada um destes componentes devem operar balanceando a realização de suas funções com o menor consumo de energia, pois o grande problema dos nós sensores nessas rede é a fonte de energia, que frequentemente consiste de uma bateria com quantidade de energia limitada.

Para que todos os elementos consigam utilizar o meio de comunicação para enviar e receber dados é necessário que se estabeleça o protocolo de comunicação. Isto os tornam mais complexos se comparados a simples sensores compostos somente por transdutores e atuadores, porém, a utilização de um protocolo torna a utilização de sensores muito mais interessante. A complexidade não inviabiliza o seu uso, mas cria a necessidade de padronização. No início da utilização das redes de sensores, cada fabricante idealizou seu próprio protocolo de comunicação, e que isto inviabilizou a utilização de sensores de vários fabricantes e tornou a grência desses elementos sensores muito complexas.

Os elementos que compõem a rede de sensores sem fio possuem algumas características gerais:

- Tempo de vida prolongado, sendo possível através da limitação de consumo de energia, aumentando a duração da fonte de energia;
- Tolerância à falhas, o que estabelece vários caminhos possíveis para que a transmissão seja feita com sucesso;
- Baixa complexidade, devido ao fato dos equipamentos, normalmente, terem baixa capacidade de processamento e baixa quantidade de memória;
- Baixo alcance de transmissão e baixa taxa de transmissão de dados;
- Facilidade de escalonamento, uma vez que os equipamentos que formam esse tipo de rede têm baixa complexidade e a rede pode ser formada por milhares de sensores;
- Alta densidade de elementos;
- Facilidade de manutenção, do que um elemento central pode verificar se a rede está funcionando de acordo com o planejado e reorganizar formas de acesso e funcionalidade dos elementos.

As redes de sensores sem fio apresentam uma grandes quantidades de nós sensores, o que torna o processo de comunicação e gerenciamento mais complexos. Elas são muitas vezes classificadas como uma rede do tipo *ad-hoc*, mas isso nem sempre é verdade. Uma rede *ad-hoc* é definida como sendo uma rede de dados na qual os elementos se comunicam diretamente entre si utilizando seus transceptores, sem a necessidade de uma infraestrutura fixa. Neste tipo de rede, os elementos não possuem hierarquia entre eles. Já em alguns dos padrões de rede de sensores sem fio, como é o caso da rede *IEEE 802.15.4*, é definido o papel de um elemento central responsável por sincronizar a rede. Desta maneira, não podemos generalizar a classificação *ad-hoc* para todos os tipos de redes de sensores sem fio.

## 2.4 Rádio-sobre-Fibra

O uso de Rádio-sobre-Fibra em sistemas de telefonia móvel foi, primeiramente, proposto e demonstrado em 1990 por Cooper [8]. Desde então, a comunidade científica tem investigado e desenvolvido esta técnica de transmissão, com foco, principalmente, nos sistemas de telefonia celular.

Rádio-sobre-Fibra é, essencialmente, um sistema de transmissão analógico que distribui sinais rádio frequência (RF) entre uma Estações Base de Controle (*Base Station Controller - BSC*) e diversas Unidades de Antena Remota (*Remote Antenna Units - RAUs*), utilizando como meio de transmissão fibras ópticas. A Figura 2.5 mostra um diagrama simples da arquitetura RoF. Neste diagrama existe uma BSC com  $n$  BSs e 7 RAUs espalhadas na área de cobertura.

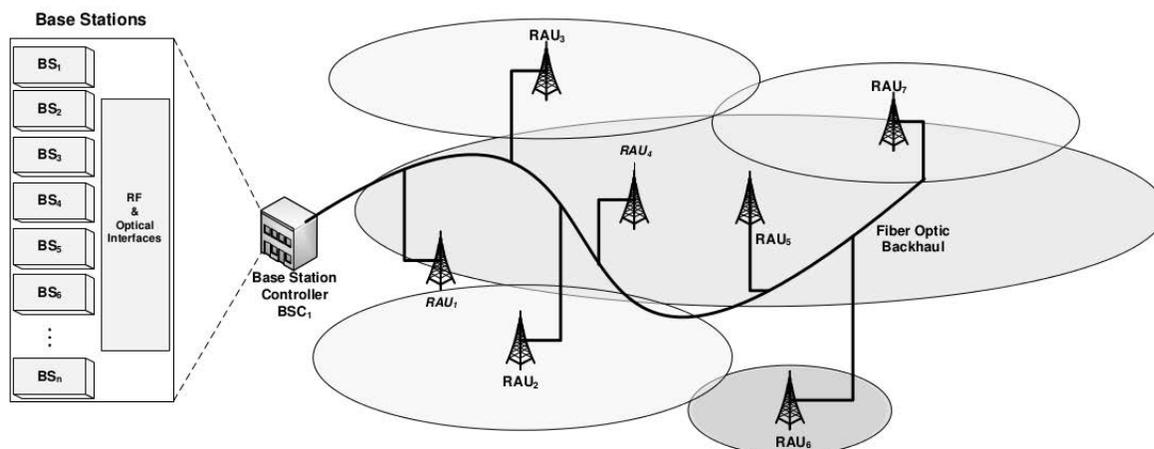


Figura 2.5: Diagrama da arquitetura Rádio-sobre-Fibra (RoF).

As RAUs são pequenas, simples, baratas e tem baixo custo de implantação e manutenção para a expansão das células da rede sem fio. A centralização dos recursos da rede em uma estação central possibilita a alocação dinâmica de seus recursos e o melhor gerenciamento da carga da rede. A grande vantagem do emprego de fibras ópticas na distribuição de sinais rádio frequência é a baixa perda por atenuação que o sinal sofre (aproximadamente 0.25 dB/Km para comprimento de onda de 1.550 nm) independente da frequência do sinal transportado sobre a portadora óptica, além da grande banda disponível no meio óptico (dezenas de THz) [9]. As transmissões ocorrem na mesma portadora do sinal rádio frequência e os sinais podem ter modulações digitais robustas. Um esquema simples de um enlace bidirecional RoF é apresentado na Figura 2.6. Nas duas direções, o sinal rádio frequência na entrada é aplicado diretamente em um diodo laser e é utilizado para modular a intensidade de luz de saída. A luz transporta a informação e a converte novamente para o formato de sinal rádio frequência no fotodiodo (lado receptor).

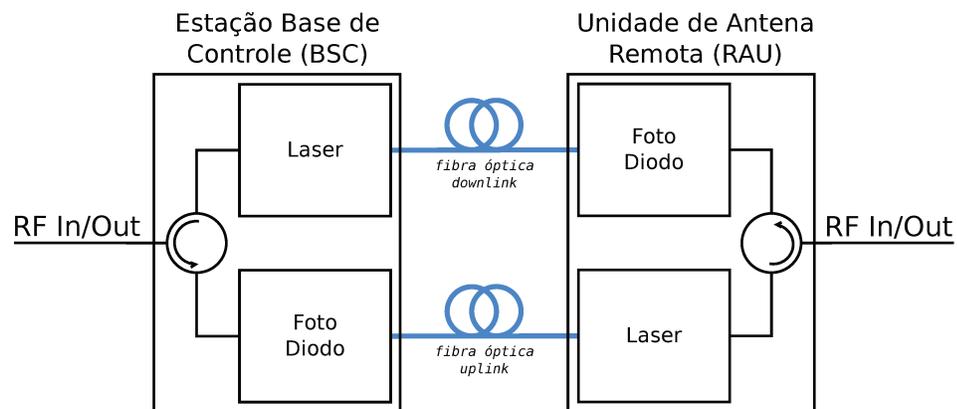


Figura 2.6: Layout de um enlace bidirecional de RoF.

Podem ser empregadas fibras ópticas multimodo e monomodo, mas o último tipo é preferido pelas melhores características de atenuação. Os comprimentos de onda normalmente empregados nesse esquema de transmissão são 1300 e 1550 nm; esse enlace óptico é denominado IM-DD (*Intensity Modulated-Direct Detection*) e é utilizado na maioria dos experimentos e aplicações de RoF existentes, principalmente pelo seu baixo custo [6].

Apesar das fibras ópticas possuírem ótimas características de atenuação e disponibilidade de banda, a natureza analógica dos sinais impõe problemas de limitações físicas devido ao ruído e distorção do sinal. Além destas limitações, existe, também, limitações devido ao ruído introduzido pelo laser e pelo foto diodo.

Outros problemas são o atraso causado pela propagação do sinal na fibra óptica e a atenuação do sinal, pois, embora seja reduzida face a outros sistemas de transmissão,

a atenuação na fibra existe e tem de ser considerada, principalmente para distâncias elevadas. Estes fatores limitam o emprego da fibra e podem limitar, também, a expansão da rede sem fio baseada em Rádio-sobre-Fibra.

O atraso causado pela propagação do sinal exige que as temporizações dos protocolos da rede sejam readequadas e algumas vezes pode degradar o desempenho da comunicação.

# Capítulo 3

## Controle de Acesso ao Meio

### 3.1 Introdução

Em muitas redes de computadores, múltiplos dispositivos compartilham o meio de comunicação para transmitir seus dados. O protocolo de Controle de Acesso ao Meio (*Medium Access Control protocol - MAC*) é o principal responsável por regularizar o acesso a este meio comum. Muitas redes de sensores sem fio e aplicações de monitoramento dependem de transmissões rádio na banda não licenciada ISM (*Industrial, Scientific and Medical Radio Bands*), o que pode resultar em interferências e ruído no sinal. A escolha do protocolo MAC tem uma relação direta com a confiabilidade e eficiência das transmissões e devem considerar estes erros e interferências nas comunicações sem fio entre outros problemas.

O meio sem fio é compartilhado por múltiplos dispositivos, por tanto, um mecanismo é necessário para controlar como se dará este acesso. Esta é a responsabilidade da segunda camada do modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection*), chamada de camada de Enlace de Dados. De acordo com o modelo de referência *IEEE 802*, esta camada é dividida nas subcamadas de *Controle Lógico do Enlace* e *Controle de Acesso ao Meio* (MAC). A subcamada MAC opera diretamente no topo da camada *Física* (PHY), tendo assim o controle completo do acesso ao meio. A principal função da subcamada MAC é decidir quando um dispositivo acessa o meio compartilhado e resolver potenciais conflitos entre nós competidores. Ela, também, é responsável pela correção dos erros de comunicação que ocorrem na camada *Física* (PHY).

Os protocolos de Controle de Acesso ao Meio existentes podem ser classificados pela maneira que controlam o acesso ao meio. A maioria dos protocolos MAC estão nas categorias de protocolos livres de disputas ou baseados em disputas [10]. Na primeira categoria, os protocolos MAC proporcionam uma abordagem de partilha do meio que garante que apenas um dispositivo acesse o meio compartilhado em um dado instante. Esta categoria é subdividida em atribuição fixa e dinâmica, indicando se as reservas de *slots* são fixas ou sob

demanda. Em contraste as técnicas livres de disputas, os protocolos baseados em disputas permitem os dispositivos acessarem o meio compartilhado simultaneamente, mas provêm mecanismos para reduzir o número de colisões. Finalmente, alguns protocolos MAC não se encaixam em nenhuma classificação pois eles compartilham características de ambas as técnicas. Estas abordagens híbridas, muitas vezes pretendem herdar as vantagens destas categorias, minimizando suas fraquezas.

Este capítulo aborda os conceitos sobre protocolos de controle de acesso ao meio. A Seção 3.2 explica o funcionamento de protocolos de controle de acesso ao meio livres de disputas. A Seção 3.3 explica as principais características dos protocolos de controle de acesso ao meio baseados em disputas. Por último, a Seção 3.4 apresenta os conceitos de desenvolvimento de protocolos de controle de acesso ao meio para redes de sensores sem fio e apresenta alguns destes protocolos.

## 3.2 Acesso ao Meio Livre de Disputas

Colisões podem ser evitadas pela alocação de recursos para os dispositivos de tal forma que cada dispositivo possa usar seus recursos exclusivamente. Por exemplo, o protocolo de Acesso Múltiplo por Divisão da Frequência (*Frequency Division Multiple Access - FDMA*) é um dos métodos mais antigos de compartilhar o meio de comunicação. No FDMA, a largura de banda da frequência é dividida em pequenas bandas de frequência, que podem ser utilizadas para transmissão de dados entre um par de dispositivos, enquanto todos outros nós que poderiam potencialmente interferir com esta transmissão usam uma banda de frequência diferente.

Similarmente, o protocolo de Acesso Múltiplo por Divisão do Tempo (*Time Division Multiple Access - TDMA*) [11] permite múltiplos dispositivos usarem a mesma frequência, mas usando janelas de tempo - chamadas *frames* - periódicas, que são constituídas de um número fixo de *slots* de transmissão para separar os acessos de diferentes dispositivos. Um escalonamento do tempo indica qual dispositivo pode transmitir dados durante cada *slot*, isto é, cada *slot* é atribuído para no máximo um dispositivo. A principal vantagem do TDMA é que os nós não precisam disputar para acessar o meio, evitando, assim, colisões. A desvantagem é que as mudanças na topologia da rede necessitam de mudanças nas alocações dos *slots*. Além disso, protocolos TDMA podem ser ineficiente na utilização da largura de banda disponível quando *slots* são de tamanho fixo e quando *slots* alocados para um nó não são utilizados em todos os *frames*.

Uma terceira classe de protocolos MAC é baseada no conceito de Acesso Múltiplo por Divisão do Código (*Code Division Multiple Access - CDMA*) [12], onde acessos simultâneos para o meio compartilhado são efetuados usando-se diferentes codificações. Se essas codificações são ortogonais, é possível que múltiplas comunicações compartilhem a mesma

frequência.

Estratégias de atribuição fixa pode ser ineficiente a medida em que não é normalmente possível realocar faixas pertencentes a um dispositivo para outros dispositivos. Além disso, escalonamento de geração para toda uma rede (especialmente em redes de sensores sem fio de grande escala) pode ser uma tarefa árdua e estes escalonamentos podem exigir modificações toda vez que a topologia da rede ou as características do tráfego mudam, portanto, estratégias de atribuição dinâmicas evitam tais alocações fixas, permitindo que os dispositivos acessem o meio por demanda. Por exemplo, em protocolos baseados em seleção, um dispositivo controlador (uma estação base no caso de uma rede sem fios infra-estrutura), informa a cada dispositivo, através de pequenos quadros de sinalização, a vez de enviar os dados. Se um dispositivo não tem dados para ser enviado, o controlador sinaliza o próximo dispositivo. Uma variante desta abordagem é o *token-ring*, onde os dispositivos passam a sinalização para o próximo dispositivo usando um quadro especial chamado *token*. O dispositivo tem permissão para transmitir os dados somente quando detém o *token*.

### 3.3 Acesso ao Meio Baseado em Disputas

Em contraste às técnicas livres de disputas, protocolos baseados em disputas permitem os dispositivos competirem pelo acesso ao meio compartilhado simultaneamente, provendo mecanismos que reduzem o número de colisões. O protocolo ALOHA [13] permite que os nós acessem o meio imediatamente, ou seja, não provê mecanismos que ajudem a evitar colisões. Existem dois variantes, o pure-ALOHA que permite que os nós acessem o meio imediatamente tentando evitar as colisões utilizando um mecanismo de *backoff*, e o protocolo slotted-ALOHA que tenta reduzir a probabilidade de colisões permitindo que um dispositivo comece uma transmissão apenas em pontos predefinidos no tempo (início dos *slots* de tempo). Enquanto o slotted-ALOHA aumenta a eficiência do ALOHA, ele também introduz a necessidade da sincronização entre os dispositivos.

Um protocolo MAC baseado em disputas popular é o *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA) [14], incluindo suas variantes *Collision Detection* (CSMA/CD) e *Collision Avoidance* (CSMA/CA). No CSMA, o dispositivo emissor primeiro monitora o meio compartilhado para determinar se ele está livre ou ocupado. Se ele estiver ocupado, o dispositivo emissor abstêm-se de transmitir. Se o meio estiver livre, o dispositivo emissor pode iniciar a transmissão. Em sistemas com fio, o dispositivo emissor continua monitorando o meio para detectar colisões de seus próprios dados com outras transmissões. No entanto, em sistemas sem fio, as colisões ocorrem no destino e, assim, o dispositivo emissor não terá conhecimento da colisão.

## 3.4 Protocolos MAC para Redes de Sensores sem Fio

Muitos protocolos MAC são construídos para promover justiça entre os nós, que se traduz por todos obterem quantidade igual de recurso e nenhum nó receber tratamento especial. Nas redes de sensores sem fio, todos os nós cooperam para alcançar um propósito comum, portanto, justiça não é a principal preocupação. Ao invés disso, as redes de sensores sem fio estão mais preocupadas com o consumo de energia e as aplicações de monitoramento podem valorizar baixa latência ou alta confiabilidade ao invés de justiça. Esta seção discute as principais características e objetivos do projeto de protocolos MAC para redes de sensores sem fio.

- **Eficiência Energética:** Nós sensores devem operar usando uma fonte limitada de energia (baterias), portanto, protocolos MAC devem ser energeticamente eficientes. Dado que protocolos MAC tem completo controle sobre os transceptores, seus projetos podem contribuir significativamente para as necessidades energéticas totais de um nó sensor. Uma técnica comum para preservar energia é descrita como Gerenciamento de Energia Dinâmico (*Dynamic Power Management - DPM*), onde um sensor pode ser movido entre diferentes modos operacionais tais como ativo, ocioso e desligado. Para a rede, o modo ativo pode agrupar diferentes modos de atividades, como por exemplo, transmitir e receber. Sem gerenciamento energético, muitos transceptores trocam entre os modos transmitir, receber e ocioso, embora o modo receber e ocioso sejam tipicamente semelhante no consumo de energia. No entanto, economia de energia pode ser obtida colocando os dispositivos no modo de baixo consumo. Modelos de tráfego periódico são muito comuns em redes de sensores e muitas redes podem se beneficiar de esquemas MAC que não necessitam de nós ativos o tempo todo. Ao invés, eles permitem os nós obterem um acesso periódico ao meio para transmissão de dados e coloca seus rádios no modo de economia entre esses períodos. A fração de tempo que um nó sensor gasta no modo ativo é chamado de ciclo-de-trabalho (*duty cycle*), que é frequentemente muito pequeno devido às transmissões de dados infrequentes e breve, que ocorrem na maioria das redes de sensores.
- **Escalabilidade:** Muitos protocolos MAC para redes sem fio foram projetados para serem utilizados em redes infra-estruturadas, onde pontos de acesso ou nós controladores arbitram o acesso ao canal ou realizam alguma outra coordenação centralizada e funções de gerenciamento. Muitas redes de sensores sem fio, que consistem de centenas ou até milhares de nós, dependem de comunicações de múltiplos saltos ou ponto-a-ponto sem coordenadores centralizados. Como consequência, os protocolos MAC devem ser capazes de permitir o uso eficiente dos recursos sem incorrer em custos inaceitáveis, particularmente em grandes redes. Por exemplo, os protocolos

centralizados implicariam em despesas consideráveis para a distribuição de horários de acesso ao meio e são, portanto, inadequados para muitas WSNs. Protocolos MAC baseados em CDMA devem armazenar uma grande quantidade de códigos, o que pode ser impraticável para dispositivos sensores com recursos restritos. Em geral, nós sensores sem fio são restritos em recursos energéticos, bem como restritos na capacidade de processamento e memória, portanto, os protocolos não devem impor muita carga computacional ou requerer muita memória para armazenar as informações.

- **Adaptabilidade:** Uma das características chave de uma WSN é sua habilidade de auto gerenciamento, isto é, ela pode adaptar-se a mudanças na topologia, tamanho, densidade e tráfego. Um protocolo MAC para uma WSN deve ser capaz de adaptar-se a tais mudanças sem *overheads* significantes. Este requisito geralmente favorece protocolos que são dinâmicos por natureza, ou seja, protocolos que tomam decisões de acessar o meio baseado na demanda atual e estado da rede. Protocolos com atribuições fixas podem levar a grandes *overheads* devido as adaptações nas atribuições que podem afetar muitos ou todos os nós da rede.
- **Baixa Latência e Previsibilidade:** Muitas aplicações de WSNs tem requisito de oportunidade, isto é, os dados dos sensores devem ser coletados, agregados e entregues com uma certa restrição de latência.

A seguir, serão apresentados alguns dos protocolos MAC mais difundidos para redes de sensores sem fio, nos quais utilizam diferentes mecanismos de controle de acesso ao meio.

### 3.4.1 Sensor MAC (S-MAC)

O objetivo do protocolo Sensor MAC (S-MAC) [15] é reduzir o consumo de energia, enquanto provê escalabilidade e redução das colisões. O S-MAC adota uma abordagem de ciclo-de-trabalho (*duty cycle*), isto é, os dispositivos periodicamente transitam entre o estado ativo (transceptor ligado) e o estado inativo (transceptor desligado). Cada dispositivo escolhe seu próprio escalonamento, embora seja preferível quando os dispositivos sincronizam seus escalonamentos de tal maneira que fiquem iguais. Neste caso, os dispositivos usando o mesmo escalonamento são considerados como pertencerem a um mesmo *cluster* virtual, mas nenhum agrupamento real acontece e todos os dispositivos estão livres para se comunicarem com dispositivos fora de seus *clusters* virtuais. Os dispositivos informam, periodicamente, seus escalonamentos para seus vizinhos usando quadros de sincronização, assim, todos os dispositivos sabem quando seus vizinhos estarão ativos. Se o

dispositivo A quiser se comunicar com um dispositivo vizinho B, que usa um escalonamento diferente, A deve esperar até B estar ativo e então iniciar a transmissão dos dados. A disputa pelo meio é resolvida pelo uso do esquema RTS/CTS.

A fim de escolher um escalonamento, um dispositivo inicialmente monitora o meio por um certo período de tempo. Se este dispositivo receber um escalonamento de um vizinho, ele escolhe este escalonamento como seu, tornando-se um seguidor. O dispositivo divulga seu novo escalonamento depois de um atraso aleatório  $t_d$  (para minimizar a possibilidade de colisões de múltiplos novos seguidores). Os dispositivos podem adotar múltiplos escalonamentos, deste modo, se um dispositivo receber um escalonamento diferente depois de ter divulgado o seu próprio, ele adota ambos. Além disso, se um dispositivo não receber um escalonamento de outro dispositivos, ele determina seu próprio escalonamento e o divulga para seus vizinhos em potencial.

O S-MAC divide o intervalo de escuta de um dispositivo em duas partes: uma para receber o quadro de sincronização e outra para receber o quadro RTS. Cada parte é subdividida em pequenos *slots* para facilitar o monitoramento da portadora. Um dispositivo tentando enviar um quadro de sincronização ou um quadro RTS deve selecionar aleatoriamente um *slot* de tempo e monitorar a portadora verificando sua atividade. Se nenhuma atividade for detectada, ele ganha o direito de transmissão.

Ele adota um conceito baseado em disputa, onde a disputa pelo meio é realizada através da troca de quadros RTS/CTS. Quando um dispositivo ouve um RTS ou CTS e conclui que não pode transmitir ou receber ao mesmo tempo, ele pode desativar seu transceptor para economizar energia.

### 3.4.2 Timeout MAC (T-MAC)

A grande desvantagem do protocolo S-MAC é que a duração do período ativo é fixa. Desta maneira, quando a carga de tráfego da rede é pequena, uma grande quantidade de energia será desperdiçada quando o dispositivo estiver ativo. Por outro lado, se a carga do tráfego da rede é grande, a duração do período ativo pode não ser grande o suficiente para transmitir os dados adequadamente.

Em visto disto, surgiu o protocolo Timeout MAC (T-MAC) [16], uma variação do S-MAC que usa um período ativo que se adapta as necessidades da rede. Os dispositivos acordam no início de um *slot* de tempo para monitorar por um breve período de tempo por atividade no canal e retorna a dormir se nenhuma atividade for observada. Quando um dispositivo transmite, recebe ou escuta alguma informação, ele permanece acordado por um breve período de tempo depois que a transferência destas informações estiver completa para verificar se existem mais transmissões sendo realizadas. Este breve intervalo permite que um dispositivo retorne a dormir tão rapidamente quanto possível. O efeito final é

que o tempo que um dispositivo permanece acordado aumentará sobre cargas de tráfego pesadas e diminuirá sobre cargas de tráfego leves.

Para reduzir colisões em potencial, cada dispositivo espera por um período de tempo aleatório durante um intervalo fixo de disputa antes de acessar o meio.

A abordagem adaptativa do T-MAC permite ajustar os intervalos entre os estados ativo e inativo baseado na carga do tráfego. No T-MAC, os dispositivos enviam as mensagens em rajadas de tamanhos variados e dormem entre as rajadas para economizar energia. Ambos os protocolos S-MAC e T-MAC concentram as trocas de quadros em pequenos períodos de tempo, o que resulta em ineficiências sobre cargas de tráfego pesadas. Finalmente, os dispositivos que receberão dados são mantidos acordados usando mensagens que indicam transmissões futuras, o que pode aumentar significativamente o tempo ocioso dos nós, acarretando em desperdício de energia.

### 3.4.3 Pattern MAC (PMAC)

O protocolo Pattern MAC (PMAC) [17] é um exemplo de protocolo TDMA que usa *frames* e *slots*, mas adaptando seu escalonamento baseado em seu próprio padrão de tráfego e nos padrões dos seus vizinhos. Comparado ao S-MAC e T-MAC, o PMAC reduz o consumo de energia do período ocioso permitindo que os dispositivos desliguem seus transceptores por longos períodos de inatividade. Os nós usam *patterns* para descrever seus períodos ativos e inativos. Um *pattern* é uma sequência de *bits*, sendo que cada *bit* representa um *slot* de tempo indicando se o nó planeja dormir (*bit* 0) ou acordar (*bit* 1) no *slot*. Enquanto os *patterns* são somente experimental, os *schedules* representam a sequência real dos períodos ativos e inativos.

Em resumo, o protocolo PMAC provê um mecanismo simples para construir escalonamentos que se adaptam a quantidade de tráfego na vizinhança. Quando a carga de tráfego é leve, um dispositivo é capaz de gastar quantidades de tempo consideráveis dormindo, dessa maneira conservando energia. No entanto, as colisões durante o PETF podem impedir os dispositivos de receber atualizações dos padrões dos vizinhos, enquanto outros dispositivos podem ter recebido estas atualizações. Isto leva a escalonamentos inconsistentes entre os dispositivos em uma vizinhança, o que pode causar colisões, transmissões desperdiçadas e tempo ocioso desnecessário.

### 3.4.4 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

O protocolo Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [18] assume uma rede de dispositivos sensores homogênea, densa, com restrições energéticas no qual os dispositivos devem enviar seus dados apenas para o dispositivo sorvedouro. No LEACH, um

protocolo MAC baseado em TDMA é utilizado com *clustering* e um protocolo simples de roteamento.

O LEACH particiona os dispositivos em *clusters* e em cada *cluster* um dispositivo dedicado, o *clusterhead*, é responsável por criar e manter um escalonamento TDMA e todos os outros dispositivos do *cluster* são dispositivos membros. Para todos os dispositivos membros, *slots* TDMA são atribuídos nos quais podem ser utilizados para trocar dados entre os membros e o *clusterhead* - não existe comunicação de dispositivo para dispositivo. Com a exceção de seus *slots* de tempo, os membros podem gastar seus tempos inativos. O *clusterhead* agrega os dados de seus membros e transmite para o dispositivo sorvedouro ou outros dispositivos. Desde que o sorvedouro esteja frequentemente distante, o *clusterhead* deve consumir muita energia para esta transmissão. Para um membro, é tipicamente mais barato alcançar o *clusterhead* do que transmitir diretamente para o sorvedouro.

Como a função do *clusterhead* requer que ele esteja sempre ligado, um alto consumo energético é encontrado. Se um único e fixo dispositivo tivesse esta função, ele consumiria sua energia rapidamente, deixando, assim, o *cluster* sem o dispositivo principal, portanto, a função de *clusterhead* é passado para outro dispositivo de tempos em tempos. Especificamente, cada dispositivo decide, independentemente dos outros dispositivos, se irá se tornar o *clusterhead* ou não, e, portanto, não existe uma sinalização de tráfego relacionada com a eleição do *clusterhead*. Esta decisão leva em consideração quando o nó realizou a função de *clusterhead* pela última vez, de tal forma que um dispositivo que não realiza a função de *clusterhead* a mais tempo tem maior chance de se eleger como *clusterhead* do que outros dispositivos.

Depois dos *cluster* serem formados, cada *clusterhead* pega um código CDMA aleatório para o seu *cluster*, no qual é transmitido para todos os membros do *cluster* usarem. Isto evita uma situação onde um dispositivo na fronteira entre dois *clusters* distorça as transmissões.

Um parâmetro crítico da rede é a porcentagem de *clusterheads*. Se existem poucos *clusterheads*, a distância entre um dispositivo membro e seu *clusterhead* torna-se grande e, portanto, o membro tem que consumir mais energia para alcançar seu *clusterhead* para manter um dado BER. Por outro lado, se existirem muitos *clusterheads*, haverá mais transmissões de *clusterheads* para o sorvedouro e menos agregação. Desta forma, existe uma porcentagem ótima de *clusterheads*. Para o cenário investigado em [18] [19], a porcentagem é aproximadamente 5%.

O protocolo é organizado em *rounds* e cada *round* é subdividido em uma fase de *setup* e uma fase de *steady-state*. A fase de *setup* começa com as eleições dos nós para *clusterhead*, e é dividida em três partes:

1. a fase *advertisement*, onde os *clusterheads* informam sua vizinhança utilizando quadros de anúncio. Os dispositivos que não são *clusterheads* pegam os quadros

de anúncio que foram recebidos com a maior força do sinal.

2. na fase *cluster-setup*, os dispositivos membros informam seus *clusterhead* utilizando o CSMA.
3. depois, da fase *cluster-setup*, o *clusterhead* sabe a quantidade e os identificadores do dispositivos membros. Ele constrói um escalonamento TDMA, escolhe uma codificação CDMA aleatória e divulga esta informação na fase *broadcast-schedule*.

Por causa das colisões dos quadros de *advertisement* ou *join*, o protocolo não pode garantir que cada dispositivo não *clusterhead* fará parte de um *cluster*. No entanto, ele pode garantir que os nós farão parte de no máximo um *cluster*.

### 3.4.5 Padrão IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 [20] surgiu em dezembro de 2000, sendo chamado de IEEE 802.15.4 LR-WPAN (*Low-Rate Wireless Personal Area Networks*). Este padrão tem como objetivo estabelecer uma rede com características de baixa complexidade, baixo custo e baixo consumo de energia. O escopo do padrão é definir a camada *Física* (PHY) e a subcamada de *Controle de Acesso ao Meio* (MAC), como tradicionalmente faz os grupos de trabalho *IEEE 802* nos padrões de solução de rede.

O padrão teve a sua primeira versão concluída em 2003. Em 2006, o padrão passou por uma revisão e teve sua segunda versão. Vários fabricantes aderiram ao padrão, que tornou referência para as redes de sensores sem fio. Atualmente, é possível adquirir componentes que são capazes de estabelecer uma rede padrão *IEEE 802.15.4*, montando toda a pilha de protocolo necessária em um único chip.

Para facilitar a implementação e garantir uma maior interoperabilidade de fabricantes, foi formada uma aliança de empresas chamada Zigbee, que estabeleceu um padrão com o mesmo nome que definiu o protocolo da camada de Aplicação acima do padrão de rede *IEEE 802.15.4*.

#### Camada Física

São definidas três bandas de frequência não licenciadas para operação das redes IEEE 802.15.4:

- 868 - 868,6 MHz
- 902 - 928 MHz
- 2400 - 2483,5 MHz

Nessas bandas de frequência o padrão definiu quatro tipos de camada Física:

- uma camada utilizando as bandas de 868/915 MHz com *direct sequence spread spectrum* (DSSS) utilizando modulação *BPSK*
- uma camada utilizando as bandas 868/915 MHz com *parallel sequence spread spectrum* (PSSS) utilizando modulação *BPSK* e *ASK*
- uma camada utilizando as bandas 868/915 MHz com *direct sequence spread spectrum* (DSSS) utilizando modulação *O-QPSK*
- uma camada utilizando a banda 2400 MHz com *direct sequence spread spectrum* (DSSS) utilizando modulação *O-QPSK*

A camada Física provê dois serviços: *serviço de dados* e *serviço de gerenciamento*. O serviço de dados possibilita o envio e recebimento de dados contidos no *PHY protocol data units* (PPDU) através do canal de comunicação. O serviço de gerenciamento possibilita o controle do funcionamento do transceptor, do nível de potência utilizado e recebido, seleção do canal a ser utilizado e verificação de disponibilidade do canal, conhecido como *Clear Channel Assessment* (CCA).

## Camada MAC

A camada MAC é responsável por prover dois tipos de serviços a rede: transmissão de dados e gerenciamento de elementos.

No serviço de transmissão de dados, a camada MAC trata do envio e recebimento dos quadros de dados, garantindo que caso não consiga ser enviado ele possa ser reenviado em um momento subsequente.

No serviço de gerenciamento de elementos, a camada MAC controla o acesso ao meio, fornecendo um acesso controlado e temporizado para que as transmissões evitem colidir uma com as outras.

A camada MAC é definida para poder trabalhar de duas maneiras em relação à sincronização dos elementos: modo *slotted* e modo *un-slotted*.

No modo *slotted*, define-se um tempo chamado *superframe* que serve de referência para o sincronismo da rede. No começo de cada tempo de *superframe*, é enviado um quadro de *beacon*. Este quadro de *beacon* é um conjunto de informações de sincronismo enviado com o intuito de manter todos os elementos informados sobre os parâmetros de sincronismo. Durante o período de um *superframe*, tem-se a divisão do *superframe* em pequenos intervalos de tempo, definindo a unidade de tempo para que cada elemento possa se comunicar.

No modo *un-slotted*, os elementos não recebem a informação de sincronismo e não existe uma divisão por tempo para cada elemento. Todos os elementos podem acessar o meio de forma assíncrona.

### 3.4.6 Dynamic Sensor Medium Access Control (DSMAC)

O protocolo Dynamic Sensor Medium Access Control (DSMAC) [21] é um protocolo MAC que muda dinamicamente cada ciclo-de-trabalho dos dispositivos para melhor atender as demandas das aplicações. Um dispositivo aumenta seu ciclo-de-trabalho adicionando períodos ativos extras quando ele requer menor latência ou quando ele observa um aumento na carga de tráfego.

O DSMAC assume que todos os dispositivos começam com o mesmo ciclo-de-trabalho. Então, quando um dispositivo precisar aumentar seu ciclo-de-trabalho, ele deve enviar um quadro de sincronização para seus vizinhos para informá-los sobre seu escalonamento ativo adicional. Depois de receber o quadro de sincronização, cada nó vizinho decide localmente se aumenta seu ciclo-de-trabalho ou não. A ideia chave que faz o DSMAC funcionar mesmo com dispositivos que não aumentam seus ciclo-de-trabalho é que, inicialmente, períodos ativos nunca mudam. Os dispositivos somente inserem seus novos escalonamento ativos no meio do período inativo. Note que dispositivos podem, também, diminuir seus ciclos-de-trabalho removendo os períodos ativos adicionados.

### 3.4.7 Berkeley Medium Access Control (BMAC)

Clear Channel Assessment (CCA) é uma operação que determina a condição do canal. No CSMA, um nó realiza um CCA antes de transmitir seus dados para evitar causar uma colisão no caso dele transmitir enquanto o canal estiver ocupado. Um método comum utilizado para realizar o CCA é o *thresholding*, que consiste em calcular a potência do sinal recebido e compará-lo com o nível de ruído, e, o canal é considerado livre somente se a potência do sinal estiver abaixo do nível de ruído. Porém, o *thresholding* gera um grande número de falsos positivos por causa da variância significativa na energia do canal, o que reduz a vazão da rede.

Ao invés do *thresholding*, o protocolo Berkeley Medium Access Control (BMAC) [22] propõe uma técnica baseada na detecção de *outlier* para melhorar a qualidade do CCA. Nesta técnica, um dispositivo procura por *outliers* no sinal recebido tal que a energia do canal esteja significativamente abaixo do ruído de fundo. Se o dispositivo detectar um *outlier* durante a amostragem do canal, então ele declara que o canal está livre. Se o nó não encontrar nenhum *outlier* dentro de cinco amostras, então ele declara que o canal está ocupado.

A técnica de detecção de *outlier* depende da precisão da estimativa do ruído de fundo. O BMAC usa um controle de ganho automático para estimar o ruído de fundo para se adaptar as mudanças do ruído no ambiente. Cada dispositivo pega amostras da força do sinal quando o canal está supostamente livre como, também, imediatamente depois de transmitir um quadro. A partir destes valores, cada dispositivo calcula um valor médio e usa-o como um simples filtro para a estimativa do ruído de fundo.

Além de prevenir colisões e obter boa utilização do canal, um CCA mais preciso tem benefícios adicionais. Ele torna possível para um dispositivo, ouvindo o preâmbulo enquanto espera receber o quadro de dados, determinar se o canal ainda está ocupado. No caso do dispositivo detectar que o canal voltou a estar ocioso antes de receber os dados, ele para de ouvir e volta a dormir. Prevenindo esta recepção, um CCA mais preciso melhora o desempenho da amostragem por preâmbulo.

### 3.4.8 Y-MAC

Similar ao TDMA, o protocolo Y-MAC [23] divide o tempo em *frames* e *slots*, onde cada *frame* contém um período *broadcast* e um período *unicast*. Todos os dispositivos devem acordar no começo de um período *broadcast* e competirem para acessar o meio durante este período. Se não existem mensagens de *broadcast* entrando, cada dispositivo desliga o seu transceptor esperando pelo primeiro *slot* atribuído no período *unicast*. Cada *slot* no período *unicast* é atribuído para somente um dispositivo para receber os dados.

O acesso ao meio no Y-MAC é baseado no *Synchronous Low Power Listening*. A disputa entre múltiplos remetentes é resolvido na janela de contenção, no começo de cada *slot*. Um dispositivo que deseja transmitir dados, escolhe um tempo de espera aleatório (*backoff*) na janela de contenção. Depois deste tempo de espera, o dispositivo acorda e monitora o meio por uma quantidade de tempo específica. Se o meio estiver livre, o dispositivo transmite um preâmbulo até o fim da janela de contenção para suprimir transmissões simultâneas. O receptor acorda no final da janela de contenção para esperar pelos quadros em seus *slots*. Se nenhum sinal dos seus dispositivos vizinhos for recebido ele desliga o transceptor.

Durante o período *unicast*, mensagens são inicialmente trocadas no canal base. No início de seu *slot* de recebimento, um receptor muda sua frequência para o canal base. O dispositivo que obter o meio usa, também, o canal base para transmitir seus dados. O receptor confirma o recebimento destes dados se a *flag* de pedido de confirmação estiver ativa no quadro.

Em condições de tráfego pesado, muitas mensagens *unicast* podem ter que esperar em uma fila de mensagens ou serem descartadas devido ao comprimento de banda limitado reservado para o dispositivo receptor. Como consequência, o Y-MAC usa um mecanismo

de troca de canal para reduzir a latência da entrega do pacote. Depois de receber um pacote durante seu *slot* de tempo no canal base, o dispositivo receptor troca para o próximo canal e transmite uma notificação que ele pode continuar recebendo pacotes no segundo canal. Disputas pelo meio no segundo canal são resolvidas como antes. No final deste *slot*, o dispositivo receptor pode decidir trocar para outro canal até chegar no último canal ou até mais nenhum dado estiver sendo recebido. A sequência de troca entre os canais disponíveis é determinado pelo algoritmo de geração da sequência.

### 3.4.9 Self-Organizing Medium Access Control for Sensor Networks (SMACS)

O protocolo Self-Organizing Medium Access Control for Sensor Networks (SMACS) [24] essencialmente combina descoberta de vizinhança e atribuição de escalonamentos TDMA para os dispositivos.

O SMACS é baseado nas seguintes suposições:

- O espectro disponível é subdividido em muitos canais e cada dispositivo ajusta seu transceptor para um canal arbitrário, alternativamente, assume-se que muitos códigos CDMA estão disponíveis.
- A maioria dos dispositivos na rede de sensores são fixos e as atribuições são válidas por muito tempo.
- Cada dispositivo divide seu tempo localmente em *superframes* de tamanho fixo, no qual não tem necessariamente a mesma fase dos *superframes* dos dispositivos vizinhos. No entanto, todos os dispositivos tem o mesmo tamanho de *superframe* e isto requer sincronização do tempo. *Superframes* também são subdivididos em *slots* de tempo.

O objetivo do SMACS é detectar os dispositivos vizinhos e atribuir enlaces ou canais exclusivos para eles. Um enlace é direcional, isto é, em um dado enlace todos os pacotes são transmitidos em uma direção. Quando dois nós querem operações bidirecionais, dois destes enlaces são necessários. A atribuição dos enlaces deve ser feita de tal forma que nenhuma colisão ocorra nos receptores. Para alcançar isto, o SMACS cuida para que os intervalos de tempo de diferentes enlaces não se sobreponham em um único dispositivo, e, além disso, para cada enlace é alocada um frequência e um código CDMA aleatoriamente.

Esse protocolo permite atribuir conexões estáticas entre dispositivos estacionários, além de permitir que o processo de descoberta de vizinhança seja repetido de tempo em tempo para o protocolo poder se adaptar à mudanças na topologia.

A questão crítica desse protocolo é a escolha do tamanho do *superframe*. Ele deve ser grande o suficiente para acomodar o maior grau de dispositivos na rede. Se o *superframe* for muito pequeno, alguns dos dispositivos vizinhos podem simplesmente não estar visíveis para ele. Um segundo problema ocorre em uma rede de sensores densamente populada com baixo tráfego, onde os escalonamentos são altamente populados e os dispositivos acordam apenas para verificar que não existem quadros destinados para eles. O número de *slots* depende da densidade de dispositivos para este protocolo.

### 3.4.10 Data Gathering Medium Access Control (DMAC)

O protocolo Data-Gathering MAC (DMAC) [25] explora o fato de que muitas redes de sensores sem fio contam com o *convergecast* como padrão de comunicação, isto é, os dados de um dispositivo sensor são coletados em um dispositivo central chamado sorvedouro, em uma árvore chamada *Data Gathering*. O objetivo do DMAC é entregar os dados ao longo da árvore *Data Gathering* com uma baixa latência e alta eficiência energética.

No DMAC, os dispositivos alteram entre os estados enviando, recebendo e dormindo. Durante o estado enviando, um dispositivo transmite um quadro para o próximo dispositivo da rota até o sorvedouro e aguarda pela confirmação.

Os intervalos de transmissão e recebimento são grandes o suficientes para exatamente um quadro. Desde que não exista atrasos de fila, um dispositivo na profundidade  $d$  na árvore pode entregar um pacote para o sorvedouro dentro de  $d$  intervalos. Enquanto limitar a atividade dos dispositivos para intervalos curtos de transmissão e recepção reduz a disputa, colisões ainda podem ocorrer. Particularmente, dispositivos com a mesma profundidade na árvore terão escalonamentos sincronizados.

No DMAC, se um dispositivo emissor não receber uma confirmação do dispositivo de destino, ele coloca o pacote na fila até o próximo intervalo de transmissão. Depois de três falhas de retransmissão, o pacote é descartado. Para reduzir as colisões, os dispositivos não transmitem imediatamente no começo do intervalo de transmissão, mas utilizam um período de *backoff* mais um tempo aleatório como janela de contenção.

Quando um dispositivo tem múltiplos quadros para enviar durante um *slot* de transmissão, ele pode aumentar seu próprio ciclo de trabalho e requisitar aos outros dispositivos ao longo da rota até o sorvedouro para fazer o mesmo.

Em resumo, o DMAC alcança uma baixa latência e os dispositivos permanecem ativos apenas por um pequeno intervalo para transmitir ou receber dados. Desde que muitos dispositivos na árvore *Data Gathering* compartilham o mesmo escalonamento, colisões ocorrerão e o DMAC emprega métodos limitados para evitá-las. Ele trabalha melhor em redes na qual os caminhos e as taxas da transmissão são bem conhecidas e não mudam com o tempo.

### 3.4.11 Traffic-Adaptive Medium Access (TRAMA)

O protocolo Traffic-Adaptive Medium Access (TRAMA) [26] é um protocolo de controle de acesso ao meio livre de disputa que visa aumentar a vazão da rede e a eficiência energética, comparado ao TDMA tradicional e soluções baseadas em disputa. Ele usa um esquema distribuído de eleição baseado nas informações sobre o tráfego em cada dispositivo para determinar quando os dispositivos poderão transmitir. Isto ajuda a evitar atribuir *slots* para dispositivos sem dados para transmitir e permite os dispositivos determinar quando eles não precisam monitorar o canal.

O protocolo TRAMA assume um canal dividido em slots de tempo, onde o tempo é dividido em intervalos periódicos de acesso aleatório (*slots* de sinalização) e intervalos de acesso escalonados (*slots* de transmissão). Durante os intervalos de acesso aleatório, o protocolo *Neighbor* é utilizado para propagar as informações entre os dispositivos vizinhos. Durante o intervalo de acesso aleatório, dispositivos juntam-se a rede transmitindo durante um *slot* de tempo selecionado aleatoriamente. Os quadros transmitidos durante estes *slots* são utilizados para coletar informações sobre a vizinhança carregando um conjunto de vizinhos adicionados e excluídos. No caso de nenhuma mudança ter ocorrido, estes quadros servem como avisos que os dispositivos continuam ativos.

Um segundo protocolo, chamado de *Schedule Exchange* é utilizado para estabelecer e propagar os escalonamentos reais, que são alocações de *slots* para um dispositivo. Cada dispositivo computa uma duração que representa o número de *slots* para o qual o dispositivo pode anunciar seu escalonamento para seus vizinhos. Esta duração depende da taxa no qual as aplicações dos dispositivos podem produzir pacotes.

A lista de receptores pretendidos no pacote de escalonamento é implementado com um mapa de *bits*, cujo tamanho é igual ao número de vizinhos. Cada *bit* no mapa de *bits* corresponde a um receptor em particular ordenado pela sua identidade.

Se o dispositivo não requerer todos seus *slots*, ele pode indicar quais deles ele quer, permitindo que outros dispositivos reivindiquem os *slots* não utilizados.

Em resumo, o protocolo TRAMA reduz a probabilidade de colisões e aumenta o tempo inativo (desta maneira conservando energia) comparado com protocolos baseados em CSMA.



# Capítulo 4

## Comunicação sem Fio

### 4.1 Introdução

Considerando que os nós sensores se comunicam através de enlaces sem fio, é importante observar as características da comunicação sem fio para determinar as áreas de cobertura de cada dispositivo da rede.

Um sistema de transmissão por rádio pode ser ilustrado simplesmente por um elemento transmissor e um elemento receptor. Ambos estão conectados às antenas e estes conjuntos estão separados por um meio por onde as ondas de rádio frequência irão propagar. Conhecendo o comportamento das ondas de rádio frequência pode-se calcular os níveis de potência do sinal rádio, quais as antenas adequadas bem como escolher adequadamente qual modulação deve ser utilizada para a transmissão em um enlace. Este cálculo é conhecido como *Link Budget*.

Na Figura 4.1, apresenta-se o diagrama de um enlace de rádio.

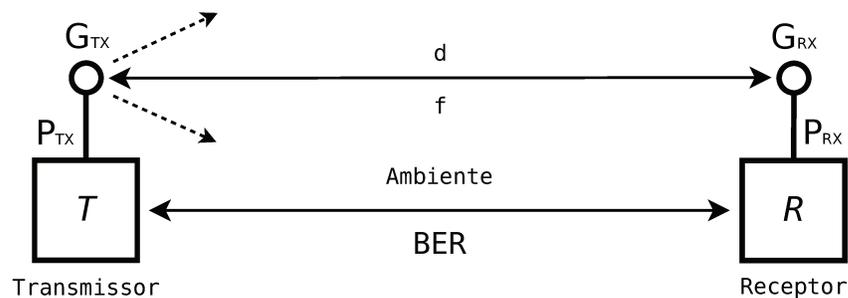


Figura 4.1: Diagrama de um link rádio.

Pode-se perceber através deste diagrama que para efetuar uma comunicação rádio com uma garantia de BER mínima deve-se, basicamente, determinar os ganhos das antenas

e a potência de transmissão, levando em consideração a distância entre as antenas, a frequência de operação, o ambiente de operação do sistema e, principalmente, a sensibilidade de recepção mínima.

O restante deste capítulo está organizado como se segue. A Seção 4.2 apresenta as considerações sobre propagação de sinal no meio sem fio. Na sequência, a Seção 4.3 introduz o arcabouço sobre modelos de propagação, focando nos modelos de perda de percurso.

## 4.2 Propagação

O primeiro assunto a ser tratado no âmbito da comunicação sem fio é a propagação. A propagação de um sinal rádio frequência pelo ambiente afeta principalmente a intensidade do sinal [27]. Modelos de propagação permitem calcular qual será a intensidade de sinal recebida por um receptor em um sistema a partir da utilização de parâmetros como os identificados no diagrama acima.

Neste trabalho, os modelos de propagação são importantes para que seja possível simular com maior precisão a rede que está sendo proposta.

## 4.3 Modelos de Propagação

O modelo de propagação consiste em prever a potência do sinal no receptor, considerando fenômenos físicos como a perda de percurso (*path loss*), o multipercurso (*multi-path delay spread*), o desvio de atenuação (*fading*) e outros [28]. O modelo de propagação é amplamente utilizado no planejamento de áreas de cobertura dos nós sensores.

### 4.3.1 Modelos de Path-Loss

O modelo de perda de potência em canais sem fio que prevê o valor médio da potência no receptor a uma distância  $d$  é denominado modelo de perda de percurso (*path loss*) [28] [27]. Estes modelos são amplamente utilizados para a predição da cobertura das redes sem fio. Existem os mais diversos modelos de perda de percurso para diferentes ambientes de propagação dos sinais. Os modelos mais simples apresentam o valor da potência média no receptor, o que é um valor determinístico e não representa a variação do nível de potência devido aos diversos fenômenos de propagação dos sinais.

Então, para se encontrar o valor da potência média no receptor, utiliza-se a Equação 4.1.

$$\frac{P_{TX}}{P_{RX}} = PL \quad (4.1)$$

$$P_{RX} = \frac{P_{TX}}{PL} \quad (4.2)$$

$$P_{RX}[dBm] = P_{TX}[dBm] - PL[dBm] \quad (4.3)$$

onde  $P_{TX}$  e  $PL$  estão em  $dBm$ .

$$P_{RX}[dBm] = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - PL \quad (4.4)$$

- $P_{TX}$  - potência de transmissão
- $P_{RX}$  - potência de recepção
- $G_{TX}$  - ganho da antena do transmissor
- $G_{RX}$  - ganho da antena o receptor

onde  $P_{TX}$ ,  $G_{TX}$ ,  $G_{RX}$  e  $PL$  estão em  $dBm$ .

### Modelo Free-Space

O modelo *Free Space* [28] é o modelo de perda de percurso que tem a situação mais otimista de perda de percurso, no qual o transmissor e o receptor estão em um espaço livre de obstruções e de reflexões em qualquer direção.

Nesse modelo, a equação do *path loss* é dada pela Equação 4.5.

$$PL(d) = \left( \frac{4 * \pi * d}{\lambda} \right)^2 \quad (4.5)$$

$$PL(d)[dBm] = 10 * \log_{10} \left( \frac{4 * \pi * d}{\lambda} \right)^2 \quad (4.6)$$

Então, para se obter a potência de recepção deve-se utilizar as Equações 4.4 e 4.6, obtendo, assim, a Equação 4.7.

$$P_{RX}[dBm] = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - 20 * \log_{10} \left( \frac{4 * \pi * d}{\lambda} \right) \quad (4.7)$$

- $\lambda$  - comprimento de onda

- $d$  - distância que separa as duas antenas

onde  $P_{TX}$ ,  $G_{TX}$  e  $G_{RX}$  estão em  $dBm$ .

A Equação 4.7, também, é conhecida como equação de *Friis* e é utilizada para sistemas com linha de visada totalmente desobstruídas.

### Modelo Log-Distance

O modelo *Log-Distance* [28] é amplamente utilizado para caracterizar ambientes de propagação, principalmente ambientes internos. Este modelo considera que a potência recebida a uma distância  $d$  pode ser calculada considerando-se um fator de atenuação e uma potência de referência recebida a uma distância  $d_0$ , próxima da estação base.

A distância  $d_0$  deve ser pelo menos 10 vezes menor que a distância  $d$ . Esta é uma consideração prática obtida através de realizações de medidas. Deste modo, o *path loss* a uma distância  $d$  pode ser calculado a partir do *path loss* a uma distância  $d_0$  pela Equação 4.8.

$$PL(d) = PL(d_0) * \left(\frac{d}{d_0}\right)^\beta \quad (4.8)$$

onde  $\beta$  é o fator de atenuação que define o ambiente.

Para se utilizar a equação em  $dBm$ , utiliza-se a Equação 4.9.

$$PL(d)[dBm] = PL(d_0) + 10 * \beta * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (4.9)$$

onde  $PL(d_0)$  está em  $dBm$ .

O *path loss*  $PL(d_0)$  é a atenuação sofrida na distância de referência  $d_0$ , e o fator  $\beta$  é utilizado para determinar o tipo de ambiente.

O *path loss* até a distância de referência  $d_0$  é considerado como sendo o de *Free Space*. Deste modo, a potência recebida a uma distância  $d$ , poderá ser calculada utilizando as Equações 4.4 e 4.9.

$$P_{RX}(d)[dBm] = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - 20 * \log\left(\frac{4 * \pi * d_0}{\lambda}\right) - 10 * \beta * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (4.10)$$

onde  $P_{TX}$ ,  $G_{TX}$  e  $G_{RX}$  então em  $dBm$ .

### Modelo Shadowing

Os cálculos da atenuação do sinal em função do ambiente utilizaram informações determinísticas como potência, ganho de antena e a atenuação. Entretanto, como mostrado em [28], existe um grau de incerteza em relação ao ambiente e, para completar a caracterização do ambiente, é necessário considerar a variação em função de cada ponto devido às condições do ambiente.

O modelo *Free Space* representa um cenário ideal, onde a potência recebida depende apenas da distância entre o transmissor e receptor. Na realidade, porém, a potência recebida é uma variável aleatória, já que os sinais percorrem múltiplos caminhos e sofrem diversos efeitos de propagação.

O modelo *Log-distance* não considera o fato que a diversidade no ambiente pode ser amplamente diferente. Isto conduz a medida dos sinais diferente do valor médio previsto na equação. Cálculos mostram que em qualquer valor de  $d$ , o *path loss*  $PL(d)$  em uma localização é aleatória e normalmente distribuída.

A distribuição *lognormal* descreve os efeitos aleatórios do *shadowing* que ocorre sobre um grande número de medições locais e que tem a mesma distância, mas com diferentes níveis de desordem ao longo do caminho de propagação. Este fenômeno é referido como *lognormal shadowing*.

Neste trabalho, o modelo *lognormal Shadowing* é utilizado para representar as características do *path loss* dos ambientes naturais. Este modelo representa a relação do *path loss* com a distância, através de um expoente de decaimento do meio e um *shadowing* aleatório, e é mostrado na Equação 4.11.

$$PL(d)[dBm] = PL(d_0) + 10 * \beta * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (4.11)$$

onde  $PL(d_0)$  está em  $dBm$  e  $X_\sigma$  é uma variável aleatória com distribuição Gaussiana, média zero e desvio padrão  $\sigma$ .

$$P_{RX}(d)[dBm] = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - 20 * \log\left(\frac{4 * \pi * d_0}{\lambda}\right) - 10 * \beta * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (4.12)$$

onde  $P_{TX}$ ,  $G_{TX}$  e  $G_{RX}$  estão em  $dBm$ .

O valor da variável aleatória normal traz uma incerteza na rede uma vez que torna também incerta uma possível colisão entre as transmissões, uma vez que outras transmissões podem ser iniciadas a uma distância maior e não conseguir detectar essa transmissão.



# Capítulo 5

## Arquitetura Híbrida de Sensores sem fio e Rádio-sobre-Fibra

### 5.1 Introdução

Uma das principais desvantagens das redes de sensores sem fio é a baixa área de cobertura que seus nós sensores alcançam, devido às restrições físicas impostas a eles. No entanto, com o advento da tecnologia Rádio-sobre-Fibra tornou-se possível aumentar a área de cobertura das redes de sensores sem fio mantendo uma baixa atenuação.

Neste capítulo, se discutirá o sistema proposto neste trabalho, que integra dois paradigmas: redes de sensores sem fio e a tecnologia Rádio-sobre-Fibra. O intuito deste sistema é possibilitar o aumento da área de cobertura da rede de sensores sem prejudicar sua confiabilidade, tirando proveito da baixa atenuação encontrada nas fibras ópticas.

Com a introdução do paradigma de um sistema híbrido de sensores sem fio e Rádio-sobre-Fibra surgem alguns problemas que devem ser considerados para a criação do referido sistema. O sistema de Rádio-sobre-Fibra deveria se comportar de forma totalmente transparente para a rede de sensores sem fio. Entretanto, características da construção do sistema de Rádio-sobre-Fibra e também da transmissão óptica degradam o sinal no domínio radioelétrico e no domínio óptico.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma. Na Seção 5.2, são apresentados os principais trabalhos de análise de desempenho de redes sem fio com a tecnologia Rádio-sobre-Fibra. A Seção 5.3 detalha a arquitetura proposta nesta dissertação.

## 5.2 Trabalhos Relacionados

As limitações da tecnologia Rádio-sobre-Fibra têm sido muito exploradas em estudos acadêmicos, mas a maioria destes estudos foram realizados no nível físico dos sistemas, com foco na infraestrutura de telefonia celular e novas redes 3G e 4G [29]. Mais recentemente, a tecnologia RoF vem sendo estudada por pesquisadores de redes sem fio de dados, como uma forma viável para a expansão dos serviços nestas redes. Os problemas que impactam a viabilidade e o desempenho destas redes vão além das questões na camada Física. O maior efeito é o atraso adicional introduzido pelos enlaces de fibras ópticas que pode exceder os tempos limites dos protocolos utilizados impossibilitando a rede de funcionar corretamente.

Os problemas que impactam a viabilidade e o desempenho dessas redes vão além das limitações da camada Física. A principal mudança na arquitetura da rede com RoF é a introdução de um atraso adicional de propagação dos sinais devido às grandes extensões das fibras ópticas, que pode exceder os limites de temporização do protocolo de controle de acesso ao meio e impedir o bom funcionamento da rede. Os impactos causados pelo atraso adicionado variam para cada tipo de protocolo MAC, onde, protocolos centralizados como o *IEEE 802.16* e *HIPERLAN/2* podem ser facilmente adaptados para suportar os cenários de RoF, considerando limites para a extensão máxima das fibras ópticas. Protocolos distribuídos, como o *IEEE 802.11*, sofrem limitações mais severas devido à necessidade de algoritmos aleatórios e de detecção de portadora para o acesso ao meio.

Em [30] e [31] os autores tratam a escassez de largura de banda usando faixas de frequência com comprimento de onda milimétrico (17 GHz e 60 GHz), para a criação de redes locais em ambientes *indoor*. Os trabalhos comparam os protocolos *HiperLAN/2* e *IEEE 802.11*, representando, respectivamente, protocolos de controle de acesso ao meio centralizado e distribuído. Os cenários analisados exploram os efeitos do problema do terminal escondido nas redes locais. Nestes cenários, o desempenho da rede não sofre forte degradação em ambos os protocolos com enlaces de fibra óptica com até 4 Km de extensão. Observando-se, porém, que alguns problemas relativos às fases de acesso aleatório de ambos protocolos causam forte impacto no desempenho e limitam a extensão máxima dos enlaces.

O trabalho [32] propõe soluções para o aumento da extensão da fibra óptica com base no emprego do RTS/CTS e da manipulação dos seus temporizadores. Os resultados das simulações mostram que fibras ópticas de até 8 Km são viáveis, mas os impactos podem degradar o desempenho em até 15% da vazão da rede.

Em [33] e [34], uma extensa análise foi feita através de testes reais em *testbeds*, simulações e aproximações analíticas, e os resultados mostram que a inserção da fibra óptica diminui a vazão em pelo menos 15%. No entanto, atrasos na propagação dos sinais

nas fibras ópticas que excedem o tempo limite definido de reconhecimento de quadros de dados (ACK) e do mecanismo de RTS/CTS causam falha de comunicação com fibras ópticas maiores que 8.1 Km.

Nas arquiteturas de RoF com o padrão *IEEE 802.16*, os estudos consideram, principalmente, as restrições físicas de propagação dos sinais nas fibras ópticas. Os trabalhos em [35] e [36] são uns dos poucos que exploram os impactos do RoF no protocolo de controle de acesso ao meio em redes WiMAX. Em [35], os autores afirmam que o atraso causado pela fibra óptica pode ser acomodado em sistemas TDD aumentando os tempos de guarda TTG e RTG. Eles mostram alguns resultados de simulação para o desempenho e eficiência da MAC para diferentes extensões de fibra óptica e diferentes tamanhos de quadro. O trabalho em [36] propõe um sistema de comunicação baseado em OFDMA e TDD, similar ao padrão *IEEE 802.16*. Além da questão do tempo de guarda esse trabalho analisa o problema de interferência intersimbólica causado pelos multipercursos dos sinais, quando mais de uma RAU espalha o mesmo sinal na rede. Este último trabalho propõe o aumento do prefixo cíclico dos símbolos OFDM ou a utilização de atrasadores ajustáveis para eliminar o problema. Apesar da boa explicação teórica, o trabalho carece de análise teórica e de simulações para medir a degradação do desempenho devido ao aumento das extensões das fibras ópticas e devido aos problemas de multipercurso.

Os trabalhos em [37] e [38] apresentam o projeto de protocolos de acesso ao meio específicos para redes que utilizam o RoF em ambientes *indoor* ou para redes veiculares. Todas as implementações específicas apresentam como principais características os protocolos centralizados, sem períodos de acesso aleatórios e com o dimensionamento otimizado dos intervalos de guarda entre os quadros dos usuários. Pode-se concluir, portanto, que o grande responsável pelo impacto nos protocolos de alto nível é o atraso de propagação nas fibras ópticas. Este problema pode ser resolvido com protocolos MAC centralizados com seus parâmetros de sincronização corretamente ajustados.

Entre os trabalhos que consideram RoF como um *backhaul* para aplicações de rádio, [39] apresenta uma análise do uso da tecnologia RoF em redes WiMAX. O atraso de propagação introduzido pelo comprimento da fibra óptica afeta o ajuste de parâmetros das camadas MAC e Física. Para um ajuste eficaz, o trabalho apresenta um estudo abrangente da degradação do desempenho de redes WiMAX empregando infra-estrutura RoF e conclui-se que cenários RoF com degradação limitada a 20% na camada Física são viáveis ao se usar os enlaces de fibras ópticas com comprimento máximo de 115 Km ou degradação limitada a 20% na camada de Aplicação ao se usar fibras ópticas de até 80 Km de comprimento.

O trabalho em [40] apresenta uma nova arquitetura híbrida de rede de sensores sem fio baseada em Rádio-sobre-Fibra para compensar as deficiências da arquitetura das WSNs convencionais. Ele investiga diferentes regras e comportamentos das RAUs nesta nova

arquitetura, e os resultados mostram que esta arquitetura melhora o desempenho da WSN bem como diminui o atraso fim-a-fim da rede e o consumo de energia.

Redes de sensores sem fio baseadas em *Zigbee* são a tecnologia chave na implementação de Cidades Ubíquas (Ubiquitous City *u-City*). No entanto, caso somente redes *ad-hoc* forem utilizadas em redes de sensores de grande porte como a *u-City*, é necessário muitos saltos para a informação chegar até o nó sorvedouro (estação base), causando problemas na atribuição de endereço e no atraso fim-a-fim da rede. Em [7], a solução proposta para estes problemas divide a rede em vários *clusters*, cada um com um coordenador (nó responsável pela transmissão até o PANC), e interliga todos os coordenadores com a estação base através de enlaces ópticos utilizando RoF.

O trabalho em [34] investiga as restrições e limitações enfrentados no desempenho de redes híbridas óptica-802.11. Através de simulações, experimentos e aproximações teóricas, mostrou-se que, devido aos atrasos adicionais inerentes à fibra óptica, uma pequena degradação de 15% no desempenho ocorre. Foi, também, evidenciado que, quando os temporizadores definidos no padrão são excedidos, ocorre um falha na comunicação. Essa falha ocorre quando o comprimento da fibra óptica atinge 13.2 Km para o método de acesso básico e 8.2 Km quando se usa o mecanismo RTS/CTS.

Uma investigação experimental do desempenho da tecnologia RoF aplicada como *back-haul* para redes de sensores sem fio é apresentada em [41]. Os resultados obtidos indicaram que a inclusão de equipamentos RoF no sistema introduz uma degradação apreciável no ruído para o sistema e conseqüentemente deteriora severamente a área de cobertura dos *clusters*. No entanto, esta deterioração pode ser facilmente superada pela utilização dos equipamentos LNA (*Low Noise Amplifier*).

### 5.3 Arquitetura Proposta - WSN-RoF

Quando falamos em monitoramento através de redes de sensores sem fio para gasodutos, oleodutos, aquedutos, rodovias, linhas de transmissão elétricas, ferrovias entre outros com as mesmas características, estamos falando em monitoramento em longas extensões lineares, chegando a milhares de quilômetros, e não em grandes áreas geográficas como uma floresta.

Sistemas convencionais de redes de sensores sem fio não são muito indicados para esse tipo de monitoramento, pois seriam necessários muitos nós que apenas funcionariam como roteadores para os dados trafegarem dos nós sensores nos *clusters* de cobertura até a estação base, como mostrado na Figura 5.1. Porém existe um grande problema, pois se algum destes nós roteadores falhar, os dados não serão entregues na estação base. Estes nós roteadores teriam que estar ativos o tempo todo para poderem propagar as transmissões oriundas de diversos *clusters* de cobertura, assim, consumindo sua energia

rapidamente e diminuindo sua vida útil.

Outro ponto é a distância entre os nós roteadores, pois se a distância for muito grande a atenuação do sinal será muito alta, incapacitando a recepção correta das transmissões. Para resolver este problema, os sistemas convencionais utilizam múltiplos saltos para transmitir os dados da origem até o destino, o que acarreta em aumentar as chances de erros nos dados transmitidos e ocasionar tráfego nos nós onde maiores quantidade de dados irão trafegar.

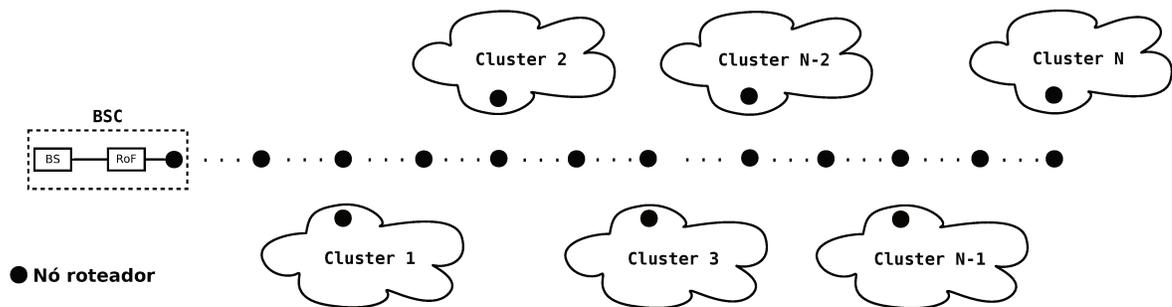


Figura 5.1: Sistema de redes de sensores sem fio tradicional.

Neste ponto, a tecnologia Rádio-sobre-Fibra mostra-se muito vantajosa para interligar a estação base e diversos *clusters* de cobertura.

Uma maneira de fazer essa interligação é utilizar um enlace óptico para cada *cluster* de cobertura do sistema e com isto um equipamento de RoF seria necessário na Estação Base de Controle para cada *cluster* de cobertura, como mostrado na Figura 5.2. No entanto, a construção deste sistema tem a desvantagem de necessitar de uma grande quantidade de enlaces ópticos que aumenta com o aumento da quantidade de *clusters* de cobertura e o mesmo ocorre com a adição de equipamentos RoF no lado da Estação Base de Controle. Isto encarece o sistema tornando-o desvantajoso financeiramente.

Por esses motivos, é proposta uma nova arquitetura no qual utiliza a tecnologia RoF como *backhaul* e somente um enlace óptico (par de fibras ópticas) é utilizado em todo o sistema (outros enlaces podem ser utilizados como *backup*) para conectar a Estação Base de Controle com os muitos *clusters* de cobertura do sistema. Esta arquitetura recebeu a definição de Redes Híbridas de Sensores sem Fio e Rádio-sobre-Fibra (*Hybrid Radio-over-Fiber Wireless Sensors Networks (WSN-RoF)*).

Nessa arquitetura, a portadora óptica é diretamente modulada com o sinal rádio frequência oriundo dos nós sensores da rede. O sinal modulado é então enviado para o receptor RoF que está localizado ou na Estação Base de Controle ou nos *clusters* de cobertura. Acopladores ópticos podem ser utilizados na criação de novos *clusters* de

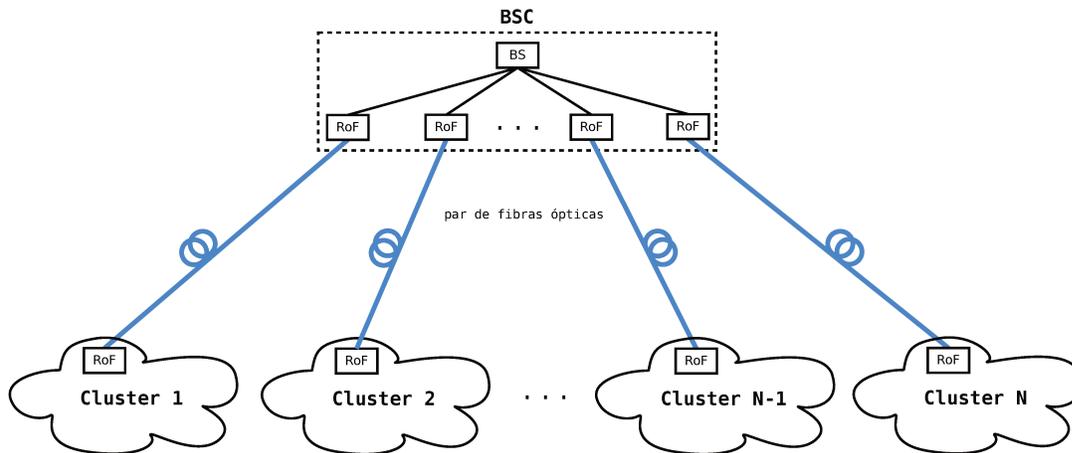


Figura 5.2: Rede Híbrida de Sensores sem fio e Rádio-sobre-Fibra com vários enlaces ópticos.

cobertura, permitindo, assim, cobertura de diferentes regiões. No entanto, a adição de novos acopladores ópticos eleva a contribuição do *RIN* no receptor acarretando dois problemas: aumento da figura de ruído e a diminuição da área de cobertura dos *clusters* de cobertura [41].

Tal sistema é uma arquitetura híbrida onde temos uma central de controle conectada a uma base na qual é chamada de Estação Base de Controle. A Estação Base de Controle por sua vez conecta-se aos nós sensores sem fio por um link rádio através de um sistema RoF, conforme a Figura 5.3. Os equipamentos de RoF e as antenas estão ligados através de circuladores de RF, como na Figura 8.3, para evitar a realimentação do equipamento de RoF.

O intuito deste sistema é possibilitar a troca de informações de cada um dos *clusters* de cobertura com a Estação Base de Controle e vice-versa, estando todos os *clusters* de cobertura conectados a Estação Base de Controle utilizando apenas um enlace de fibras ópticas compartilhado, mas sem a existência de comunicação direta entre os diversos *clusters* de cobertura. Como se pode perceber, quando a informação é oriunda dos *clusters* de cobertura, apenas a Estação Base de Controle receberá tais informações, porém quando a informação é oriunda da Estação Base de Controle todos os *clusters* de cobertura receberão estas informações.

O atraso de propagação do sinal pelas fibras ópticas é uma característica inerente da transmissão óptica. Pelo fato de que na fibra óptica a luz trafega a uma velocidade menor que no espaço livre, este fato tem de ser levado em consideração no desenvolvimento dos protocolos de controle de acesso ao meio devido às temporizações. Este atraso pode causar o não funcionamento de sistemas com protocolos distribuídos por estouro no tempo de resposta.

A velocidade da luz na fibra pode ser medida conforme a Equação 5.1.

$$V_f = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1,54} = 194,80m/\mu s \quad (5.1)$$

onde  $V_f$  é a velocidade de propagação da luz na fibra óptica,  $c$  a velocidade da luz e  $n$  o índice de refração da fibra óptica utilizada.

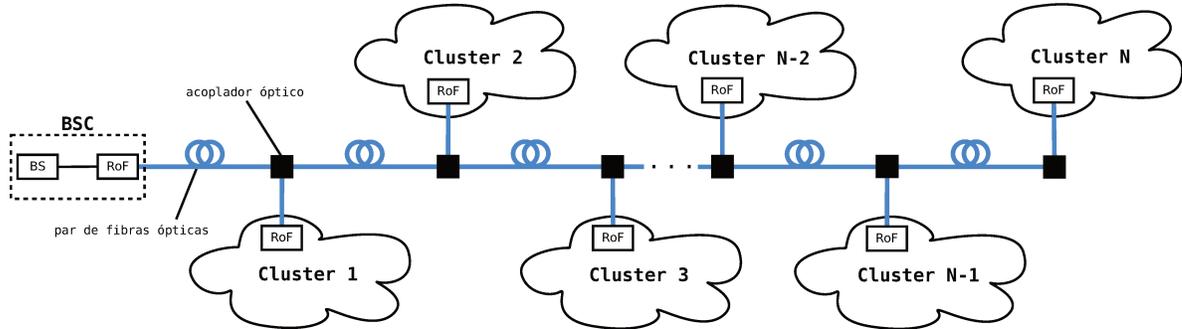


Figura 5.3: Rede Híbrida de Sensores sem fio e Rádio-sobre-Fibra proposta.

Esse atraso pode parecer muito pequeno, mas é importante notar que comunicações ópticas podem se estender por milhares de quilômetros ao contrário das comunicações entre dispositivos sem fio. Da Equação 5.1 chega-se a um atraso aproximado de  $5\mu s$  por quilômetro de fibra óptica.

Como o atraso é proporcional ao comprimento do enlace de fibra óptica, é preciso verificar como ele se propaga ao longo da rede. Considerando que os *clusters* de cobertura sejam numerados a partir do mais próximo da Estação Base de Controle até o mais distante da mesma, teremos que a distância de cada uma delas pode ser obtida pela Equação 5.2.

$$D_n[Km] = \sum_{i=1}^n d_i[Km] \quad (5.2)$$

onde  $D_n$  é a distância (em quilômetros) do  $n$ -ésimo *cluster* de cobertura da rede em relação a Estação Base de Controle.

Para se utilizar tal sistema eficientemente, novos protocolos de controle de acesso ao meio são necessários, pois este sistema apresenta características únicas não encontradas em nenhum outro sistema. Entre tais características, pode-se citar que na direção de *downlink* apenas a estação base transmite para os nós sensores, desta maneira, não havendo colisão com outras transmissões; já na direção de *uplink*, todos os nós sensores transmitem, ocasionando, assim, várias colisões. Outro ponto importante é o consumo de energia, pois

não se pode consumir exageradamente a energia dos nós sensores diminuindo, assim, seu tempo de operação na rede.

O protocolo também deve considerar os diferentes atrasos de propagação entre os diversos *clusters* de cobertura e a estação base, pois isto pode levar a colisões inesperadas.

# Capítulo 6

## Protocolos de Controle de Acesso ao Meio propostos para WSN-RoF

### 6.1 Introdução

Um dos principais efeitos negativos do emprego da tecnologia Rádio-sobre-Fibra em redes sem fio é o atraso da propagação adicional dos sinais entre a Estação Base de Controle e as Unidades de Antenas Remotas. Para grandes extensões de fibra óptica este atraso pode ultrapassar os limites de temporizações dos protocolos MAC, o que pode degradar o desempenho da rede ou até mesmo interromper a sua operação.

Protocolos de acesso ao meio distribuídos, como o *IEEE 802.11*, sofrem maiores limitações. Já protocolos de controle de acesso ao meio centralizados, como o *IEEE 802.16*, normalmente, são mais imunes aos problemas de temporizações, dado que estas redes não implementam métodos de acesso aleatórios e possuem temporizações mais flexíveis; no entanto, a perfeita sincronização é necessária quando a duplexação por divisão de tempo (TDD) é utilizada. A inserção do enlace óptico deve ser devidamente acomodada pelos tempos de comutação entre *downlink* e *uplink*.

Protocolos baseados em amostragem de preâmbulo, comumente utilizados em redes de sensores sem fio, não são muito indicados para esse sistema proposto, pois um *cluster* de cobertura não se comunica com outro, o que impossibilita que os nós sensores de diferentes *clusters* de cobertura saibam da existência de transmissões, além de grandes comprimentos de fibra óptica necessitarem de maiores preâmbulos, o que consumiria muita energia.

Neste capítulo, serão apresentados os protocolos de controle de acesso ao meio desenvolvidos especialmente para o sistema híbrido proposto no Capítulo 5. Dois protocolos serão apresentados, cada um projetado de uma maneira para obter o acesso ao canal.

O restante deste capítulo está organizado como segue. A Seção 6.2 apresenta as considerações para o projeto de um protocolo de controle de acesso ao meio para redes de

sensores sem fio, obtidas através da análise dos diversos protocolos discutidos no Capítulo 3. Na sequência, a Seção 6.3 apresenta o protocolo SPP-MAC. Além da visão geral, são discutidas algumas características do projeto, bem como uma análise dos parâmetros configuráveis e das funções previstas pelo algoritmo. Por fim, a Seção 6.4 apresenta o protocolo HMARS. Além da visão geral, são discutidas algumas características do projeto, bem como uma análise dos parâmetros configuráveis e das funções previstas pelo algoritmo.

## 6.2 Considerações para o projeto

A principal função dos protocolos MAC é coordenar o acesso e a transmissão sobre um meio comum para vários nós [42]. No contexto sem fio isto é complicado pelo fato que o meio comum é o canal sem fio no qual é *broadcast* por natureza, isto é, qualquer transmissão interfere com as outras.

No projeto de protocolos de controle de acesso ao meio para WSNs, nos quais os dispositivos sofrem com alta restrição energética, baixa capacidade computacional, pouca memória e pequena largura de banda (algumas centenas de Kbps), faz-se necessário o entendimento das principais causas do desperdício de energia, que são, em sua maioria [43]:

- **Colisões:** ocorrem quando um nó sensor está com sua transmissão em andamento e outros nós sensores começam a transmitir seus dados. No final, estas transmissões se sobrepõem nos nós receptores, impossibilitando que sejam identificadas corretamente.
- **Overhearing:** acontece quando um nó sensor recebe quadros irrelevante, ou seja, quadros destinados a outros nós na rede.
- **Overhead:** ocorre quando quadros de controle (por exemplo, quadros RTS, CTS e ACK) são transmitidos ou recebidos, e quando grandes quantidades de informações inúteis (que não sejam o payload) são transmitidas.
- **Idle Listening:** ocorre quando um nó mantém seu transceptor ligado ouvindo o canal esperando quadros em potencial.

Muitos dos protocolos MAC desenvolvidos para WSNs tem como princípio atacar um ou mais desses problemas para reduzir o consumo de energia, e, no desenvolvimentos dos protocolos para essa nova arquitetura integrada foi utilizado o mesmo princípio.

A integração da fibra óptica ao sistema levou a adição de um atraso causado pela propagação do sinal que deve ser considerado no projeto dos protocolos. Como o comprimento da fibra óptica utilizada pode chegar a milhares de quilômetros, as limitações

impostas pelos protocolos em relação ao comprimento máximo da fibra óptica deve ser minimizada. Como todos os *clusters* de cobertura estão conectados com a Estação Base de Controle através de um único enlace óptico (par de fibras ópticas), os protocolos devem ser capazes de minimizar as colisões entre as comunicações de nós sensores vinculados a diferentes *clusters* de cobertura como, também, as colisões entre as comunicações de nós sensores vinculados a um mesmo *cluster* de cobertura, considerando que os nós sensores vinculados a diferentes *clusters* de cobertura não se comunicam.

Com tudo isso, conclui-se que protocolos MAC distribuídos não são indicados para esse tipo de sistema, o que levou ao desenvolvimento de dois protocolos centralizados. Ambos os protocolos desenvolvidos são estritamente de comunicação direta, ou seja, o dispositivo de destino deve estar ao alcance do dispositivo fonte.

## 6.3 Scheduling of Polling Priority Medium Access Control

### 6.3.1 Introdução

O protocolo SPP-MAC (**S**cheduling of **P**olling **P**riority **M**edium **A**ccess **C**ontrol) é um protocolo centralizado confiável baseado em seleção que combina um mecanismo de priorização para alocar uma quantidade de sinalização para cada nó sensor da rede que melhor se adequa às suas necessidades. Esta alocação é feita através da seleção dos nós sensores, ou seja, um agente central - denominado estação base - seleciona qual nó sensor poderá transmitir por vez através de alternância circular, utilizando a sinalização. Se um nó sensor não tem dados para ser enviado, a estação base sinaliza o próximo nó sensor da fila.

O SPP-MAC lida com o processo de acessar o canal sem fio e o canal óptico além de ser responsável pelas seguintes tarefas:

- Prover uma conexão confiável entre a estação base e os nós sensores;
- Empregar e manter o mecanismo de priorização se o dispositivo é a estação base;
- Escalonar e alocar a quantidade correta de sinalizações para cada nó sensor se o dispositivo é a estação base;
- Sinalizar os nós sensores para transmissão através da lista de sinalização se o dispositivo é a estação base;
- Receber a sinalização e transmitir os dados se o dispositivo é um nó sensor.

A confiabilidade deste protocolo é dada pela utilização de dois mecanismos:

1. quadros de confirmação, os quais podem ser requisitados pelos quadros de dados; no entanto, este mecanismo tem um preço, o gasto de energia para a manipulação deste quadro.
2. *Frame Check Sequence* (FCS), no qual verifica se os dados recebidos estão corretos através de operações matemáticas sobre os bits que compõe o quadro.

Para a realização da seleção dos nós sensores da rede, é necessário que alguma entidade tenha o conhecimento da topologia da rede. Esta entidade deve conhecer, a priori, quantos *clusters* de cobertura e nós sensores existem na rede. Como esta entidade deve ter uma maior capacidade computacional, nada mais justo que seja a estação base a encarregada do mecanismo de seleção.

Como o protocolo também trabalha com prioridades, é possível atribuir diferentes níveis de prioridade para os nós sensores da rede. Desta maneira, é necessário que exista algum algoritmo que aloque, corretamente, as sinalizações dos nós sensores de acordo com suas prioridades. O mecanismo de priorização é centralizado na estação base, assim, não é necessário programar cada nó sensor com sua prioridade. Basta, apenas, inserir cada nó sensor em sua lista de prioridade na estação base para, assim, a sinalização ser feita corretamente.

Uma desvantagem do protocolo é que ele introduz um atraso de sinalização, um período de tempo requerido para a estação base notificar um nó sensor que ele pode transmitir. Desta maneira, quanto maior for o comprimento do enlace óptico maior será este atraso de sinalização, o que pode se tornar um problema para redes com enlace óptico de grande extensão.

Para diminuir o desperdício de energia, esse protocolo foi projetado de maneira a evitar, totalmente ou parcialmente, três dos quatro problemas que causam o desperdício de energia: a colisão, o *overhearing* e o *idle listening*. O *overhead*, no entanto, é combatido diminuindo o tamanho do *overhead* dos quadros MAC, porém, como o protocolo utiliza sinalização, mais quadros precisam trafegar na rede, assim, o *overhead* ainda desperdiça energia.

Como somente os nós sensores que recebem o quadro de sinalização podem transmitir, e apenas um quadro de sinalização é enviado por vez - nunca um quadro de sinalização é enviado se uma sinalização anterior não foi finalizada - não é possível que dois nós sensores possam transmitir de maneira que suas informações colidam na estação base, eliminando, assim, totalmente a probabilidade de ocorrerem colisões, tanto intra-cluster quanto inter-clusters.

Uma maneira de diminuir o consumo de energia foi implementar um mecanismo que analisa o endereço de destino dos quadros recebidos logo após receber os *bytes* dedicados

ao endereço de destino dos quadros. Se a análise confirmar que o quadro é destinado ao nó sensor, o recebimento do quadro é finalizado, se não, o recebimento é interrompido. Dessa maneira, a energia que seria desperdiçada no recebimento de quadros longos é economizada. Esta é uma maneira de diminuir a energia desperdiçada no *overhearing*.

Para evitar permanecer por muito tempo no estado *idle listening*, o que consome muita energia, o SPP-MAC tem um modo de economia de energia, no qual o transceptor dos nós sensores pode ser desativado. No entanto, quando o transceptor está desativado, não é possível que o nó sensor receba o quadro de sinalização e, conseqüentemente, não será possível transmitir seus dados. Então, para possibilitar o recebimento do quadro de sinalização, os nós sensores ativam o transceptor quando existe informações para serem transmitidas, o que possibilita a recepção da sinalização. Se um nó sensor da rede precisar permanecer o tempo todo com o transceptor ligado, é necessário apenas que o modo de economia de energia não seja ativado.

### 6.3.2 Especificação do formato dos quadros MAC

As estruturas dos quadros foram projetadas para serem minimalistas e ao mesmo tempo serem robustas para transmissão em canais sem fio e óptico com ruídos. Cada camada sucessiva de protocolo adiciona para a estrutura do quadro os cabeçalhos e rodapés específicos da camada.

Este protocolo define três tipos de quadros: um quadro de sinalização, utilizado pela estação base para transmitir a sinalização para os nós sensores; um quadro de dados, utilizado por todas as transmissões de dados; e um quadro de confirmação, utilizado para confirmação de recepção bem sucedida.

Cada quadro MAC consiste dos seguintes componentes básicos: i) MHR (*MAC Header*), é o cabeçalho do quadro e consiste dos campos controle do quadro, dos endereços de destino e fonte e do número de sequência; ii) MAC *payload*, de tamanho variado, no qual contém informações específicas para cada tipo de quadro; iii) MFR (*MAC Footer*), no qual contém o FCS (*Frame Check Sequence*).

#### Formato geral do quadro MAC

O quadro MAC é composto de um MHR, um MAC *payload* e um MFR. Os campos do MHR aparecem em uma ordem fixa. O quadro MAC geral deve ser formatado como mostra a Figura 6.1.

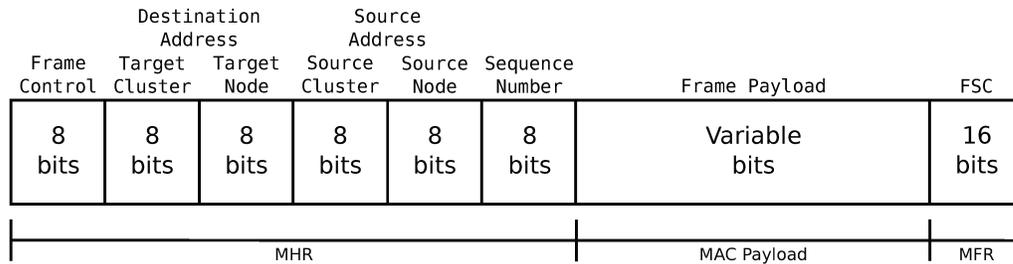


Figura 6.1: Formato geral do quadro MAC do protocolo SPP-MAC.

O MHR tem tamanho fixo e contem:

- Campo *Frame Control*: tem 8 bits de tamanho e contém informações que define o tipo do quadro e outras marcadores de controle. O campo *Frame Control* deve ser formatado segundo a Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Formato do campo *Frame Control* do protocolo SPP-MAC.

Subcampos	Tamanho	Posição
Frame Type	3 bits	0 - 2
Acknowledgement Request	1 bit	3
Data Pending	1 bit	4
Ready to Receive	1 bit	5
Reservado	2 bits	6 - 7

Tabela 6.2: Valores do subcampo *Frame Type* do protocolo SPP-MAC.

Valor do Frame Type	Descrição
000	Sinalização
001	Dados
010	Confirmação
011 - 111	Reservado

- Campos *Target Cluster* e *Target Node*: ambos têm 8 *bits* de tamanho e contém o identificador do *cluster* de cobertura destino e o identificador do nó sensor destino respectivamente. A junção dos dois forma o endereço de destino do quadro.
- Campos *Source Cluster* e *Source Node*: ambos têm 8 *bits* de tamanho e contém o identificador do *cluster* de cobertura origem e o identificador do nó sensor origem respectivamente. A junção dos dois forma o endereço de origem do quadro.
- Campos *Sequence Number*: tem 8 *bits* de tamanho e especifica o identificador da sequência do quadro.

O MAC *payload* tem tamanho variável e contém:

- Campo *Frame Payload*: tem um tamanho variável e contém a carga útil dos quadros.

O MFR tem tamanho fixo e contém:

- Campo *FCS*: tem 16 *bits* de tamanho e contém um 16-*bit* ITU-T CRC e é calculado sobre o MHR e MAC *payload*.

### Formato individual dos tipos de quadros MAC

Três tipos de quadros são definidos: sinalização, dados e confirmação.

- **Quadro de Sinalização:** O quadro de sinalização deve ser formatado conforme ilustrado na Figura 6.2. Ele é utilizado para a estação base informar qual nó sensor terá a oportunidade de transmitir.

Frame Control	Destination Address		Source Address		Sequence Number	FSC
	Target Cluster	Target Node	Source Cluster	Source Node		
8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	16 bits

Figura 6.2: Formato do quadro de sinalização do protocolo SPP-MAC.

- **Quadro de Dados:** O quadro de dados deve ser formatado conforme ilustrado na Figura 6.3. Ele é utilizado para a transmitir os dados dos nós sensores para a estação base ou da estação base para os nós sensores.

Frame Control	Destination Address		Source Address		Sequence Number	Data Payload	FSC
	Target Cluster	Target Node	Source Cluster	Source Node			
8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	Variable bits	16 bits

Figura 6.3: Formato do quadro de dados do protocolo SPP-MAC.

- **Quadro de Confirmação:** O quadro de confirmação deve ser formatado conforme ilustrado na Figura 6.4. Ele é utilizado para informar se o quadro de dados foi recebido com sucesso ou não.

Frame Control	Destination Address		Source Address		Sequence Number	FSC
	Target Cluster	Target Node	Source Cluster	Source Node		
8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	16 bits

Figura 6.4: Formato do quadro de confirmação do protocolo SPP-MAC.

### 6.3.3 Constantes e atributos

Tabela 6.3: Constantes do protocolo SPP-MAC.

Constante	Valor
<i>phyTurnaroundTime</i>	75 $\mu$ s
<i>phyMaxPSDUSize</i>	127 bytes
<i>phyFiberDelay</i>	5 $\mu$ s
<i>macMHRSize</i>	6 bytes
<i>macMFRSize</i>	2 bytes
<i>macPollPayloadLength</i>	0 bytes
<i>macAckPayloadLength</i>	0 bytes

Tabela 6.4: Atributos do protocolo SPP-MAC.

Atributo	Descrição
<i>phyCurrentChannel</i>	o canal de rádio frequência
<i>phyTransmitPower</i>	a potência utilizada para a transmissão
<i>macPriorities</i>	a quantidade de prioridades existente na rede
<i>macEnergy</i>	se o modo de economia de energia está ativado ou não

### 6.3.4 Atribuição de prioridades

Nas redes de sensores sem fio, os nós sensores da rede tipicamente realizam diferentes funções sendo umas mais críticas do que outras. Desta maneira, alguns nós sensores podem precisar de maiores possibilidades de transmissão enquanto outros nós podem precisar de menores possibilidades de transmissão, ou seja, a quantidade de sinalização dos nós sensores da rede não precisa ser iguais.

Para resolver esse problema, o protocolo SPP-MAC usa um mecanismo de prioridades, cuja função é atribuir diferentes prioridades para cada nó sensor da rede de acordo com a sua função. Esta atribuição é realizada estaticamente, ou seja, o administrador da rede deve atribuir uma prioridade, sendo 1 a maior e  $m$  a menor ( $m \geq 1$ ), para cada nó da rede.

A estação base mantém um conjunto com os nós sensores para cada prioridade utilizada na rede, e, baseado nestes conjuntos é construída a lista de sinalização. Somente os nós sensores nesta lista de sinalização são elegíveis para receber o quadro de sinalização.

No entanto, não é apenas necessário atribuir as prioridades aos nós sensores da rede mas também é necessário um modo de escalonar e alocar as sinalizações que satisfaça as condições impostas pelo protocolo que é a de permitir que nós com as maiores prioridades possam ter maiores possibilidades de transmissão. A Subseção 6.3.5 trata justamente de como o protocolo SPP-MAC escalona e aloca as sinalizações na lista de sinalização.

### 6.3.5 Escalonamento e alocação das sinalizações

Por se tratar de um protocolo baseado em seleção, o SPP-MAC utiliza o quadro de sinalização para realizar a sinalização para cada nó sensor da rede poder transmitir seus dados. Para isto, um algoritmo de escalonamento de alocação de sinalização é necessário para construir a lista de sinalização.

A construção deste algoritmo deve levar em consideração se o mecanismo de priorização esta sendo utilizado ou não. Se o mecanismo não estiver sendo utilizado a alocação das sinalizações na lista de sinalização é realizada alocando uma sinalização para cada nó sensor da rede sequencialmente. No entanto, o desafio ocorre quando o mecanismo é utilizado, pois é necessário evitar sinalizar nós sensores que não tenham dados para transmitir e sinalizar mais vezes nós sensores que tenham uma quantidade maior de dados para transmitir, ou seja, o objetivo do algoritmo é sinalizar mais vezes os nós sensores com prioridades maiores.

Para isso, é necessário uma maneira eficiente para escalonar e alocar a quantidade certa de sinalizações para cada prioridade da rede.

Como a única exigência que o protocolo faz em termos do escalonamento e alocação é que os nós sensores com maiores prioridades tenham uma quantidade maior de sinalizações em comparação com os nós sensores com menores prioridades, a maneira mais eficiente encontrada para satisfazer tal necessidade foi alocar uma sinalização a mais na lista de sinalização para cada nó sensor com prioridade  $i$  em relação aos nós sensores com prioridade  $i + 1$ . Assim, os nós sensores com prioridade 1 terão uma sinalização a mais em relação aos nós sensores com prioridade 2, que por sua vez terão uma sinalização a mais em relação aos nós sensores com prioridade 3 e assim por diante.

Supondo que o número de nós sensores com prioridade  $i$  ( $1 \leq i \leq m$ ) seja  $n_i$  e cada nó sensor com prioridade  $m$  seja alocado exatamente uma única vez durante a lista de sinalização, então cada nó sensor com prioridade  $i$  terá  $m - i + 1$  alocações na lista de sinalização.

Portanto, o número total de sinalizações alocadas na lista de sinalização é dada pela Equação 6.1.

$$\sum_{i=1}^m n_i * (m - i + 1) \quad (6.1)$$

No entanto, outro problema que surge é qual a maneira mais eficiente de escalonar as alocações na lista de sinalização. Uma maneira de realizar o escalonamento das sinalizações na lista de sinalização é escalonar as  $m - i + 1$  alocações das sinalizações para cada nó sensor com prioridade  $i$  consecutivamente, porém, esta estratégia não é muito adequada, pois os nós sensores precisarão esperar um tempo considerável para voltar a transmitir e este tempo crescerá proporcionalmente com o aumento do número de nós sensores na rede e da quantidade de prioridades utilizada. Ao invés disto, decidiu-se construir a lista de sinalização em *rounds*, mais precisamente em  $m$  rounds.

Para cada *round*, todos os nós sensores com prioridade entre 1 e  $m - \text{round} + 1$  deverão ser escalonados na lista de sinalização. O contador do número de *rounds* (*round*) é iniciado com o valor 1 e incrementado sempre depois que todos os nós sensores pertencentes

ao *round* forem inseridos na lista de sinalização até seu valor chegar a  $m + 1$ . Quando o contador de *rounds* chegar a  $m + 1$  significa que a lista de sinalização foi construída, ou seja, todas as sinalizações estão alocadas corretamente.

Depois que a lista de sinalização estiver construída, a estação base deve utilizá-la para sinalizar quais nós sensores poderão transmitir. Para isto, um algoritmo de envio de sinalização - Algoritmo 2 - é utilizado. É importante perceber que a lista de sinalização é utilizada ciclicamente, ou seja, depois que todas as sinalizações forem feitas elas recomeçam. Devido a esta característica, quando a lista de sinalizações está sendo utilizada ela recebe o nome de ciclo de sinalização.

A Figura 6.5, mostra um exemplo do escalonamento e alocação das sinalizações para uma rede utilizando 5 níveis de prioridade com 3 nós sensores em cada nível de prioridade. É possível notar que, primeiramente, todos os nós sensores de todos os níveis de prioridade são inseridos na lista de sinalização. Depois, apenas os nós sensores pertencentes aos níveis de prioridade 1 até 4, e assim sucessivamente até apenas os nós sensores do nível de prioridade 1 serem inseridos. Desta maneira, percebe-se que os nós sensores com maiores níveis de prioridade terão maiores oportunidades de transmissão devido a maior quantidade de sinalização.

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo de escalonamento de sinalização.

---

**Entrada:**  $P_i$  conjunto dos nós sensores com prioridade  $i$  ( $1 \leq i \leq m$ ) e  $m$

**Saída** :  $L_- = \{P_1, P_2, \dots, P_{m-1}, P_m, P_1, P_2, \dots, P_{m-1}, \dots, P_1\}$  conjunto dos nós da rede escalonados

```

1  $L_- = \{\}$ 
2  $round_- = 1$ 
3 while  $round_- \leq m$  do
4   for each  $i \in [1, m - round_- + 1]$  do
5      $L_- = L_- \cup P_i$  (adiciona em  $L_-$  todos os nós de  $P_i$ )
6    $round_- = round_- + 1$ 

```

---



---

**Algoritmo 2:** Algoritmo de sinalização.

---

**Entrada:**  $L_-$  e  $next\_poll$

**Saída** :  $next\_poll$

```

1 sendPoll( $L_-[next\_poll]$ )
2  $next\_poll = next\_poll + 1$ 
3 if  $next\_poll \geq len(L_-)$  then
4    $next\_poll = 0$ 

```

---

Tabela 6.5: Principais variáveis e constantes do algoritmo de escalonamento.

Variável	Descrição
1	a maior prioridade
$m$	a menor prioridade e o número de prioridades
$round\_$	o número do round, $1 \leq round\_ \leq m$
$i$	prioridade
$L\_$	lista de sinalizações

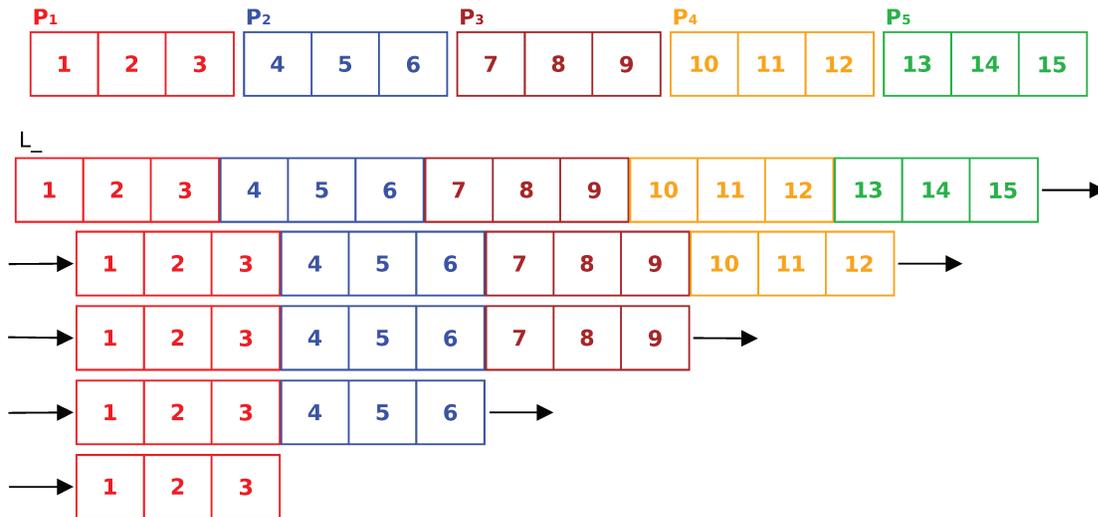


Figura 6.5: Exemplo de execução do algoritmo de escalonamento.

### 6.3.6 Transmissão de Dados

Existem dois tipos de transações de transmissão de dados: a primeira é a transmissão para a estação base na qual um nó sensor da rede transmite os dados e a segunda transação é a transmissão da estação base para um nó sensor da rede.

#### Nós sensores para a estação base

Sempre que um nó sensor da rede desejar transmitir dados para a estação base, ele primeiro deve habilitar o seu transceptor e esperar por um quadro de sinalização enviado pela estação base destinado a ele.

Ao receber esse quadro de sinalização, o nó sensor transmite o quadro de dados corretamente para a estação base. Se o nó sensor requisitar um quadro de confirmação, ele permanece com o transceptor habilitado até recebê-lo. Se o nó sensor não requisitar e o modo de economia de energia está ativado, ele desativa o transceptor logo após o quadro de dados ser enviado; se ele não requisitou e o modo de economia de energia está desativado, ele permanece com o transceptor ativo.

Na chegada do quadro de dados, a estação base verifica se o nó sensor emissor requisitou um quadro de confirmação analisando o subcampo de controle *Acknowledgment Request* do quadro, e caso tenha requisitado, transmite o quadro de confirmação de volta para o nó sensor emissor *phyTurnaroundTime*  $\mu s$  após a recepção do último bit quadro de dados.

### Estação base para os nós sensores

Quando existe dados pendentes na estação base para serem enviados para os nós sensores da rede, a estação base deve ativar o subcampo de controle *Data Pending* no campo de controle do quadro de sinalização mostrando que existem dados pendentes para serem enviados ao nó sensor sendo sinalizado.

Quando o nó receber esse quadro de sinalização com o subcampo de controle *Data Pending* ativo, duas ações podem ser tomadas:

1. Se o nó sensor tiver dados para enviar, ele envia um quadro de dados para a estação base com o subcampo de controle *Ready to Receive* ativo indicando que ele estará pronto para receber o quadro de dados da estação base logo depois que seu quadro de dados ser totalmente transmitido. O nó sensor deve permanecer ativo até receber o quadro de dados da estação base.
2. Se o nó sensor não tiver dados para enviar, ele envia um quadro de confirmação para a estação base com o subcampo de controle *Ready to Receive* ativo indicando que ele está pronto para receber o quadro de dados.

Quando a estação base receber ou o quadro de dados ou o quadro de confirmação com a subcampo de controle *Ready to Receive* ativo, ela deve transmitir seus dados através de um quadro de dados.

Quando o nó sensor receber este quadro de dados, ele deve verificar se a estação base requisitou um quadro de confirmação analisando o subcampo de controle *Acknowledgment Request*, e caso tenha requisitado, enviar um quadro de confirmação de volta para a estação base *phyTurnaroundTime*  $\mu s$  após a recepção do último bit do quadro de dados.

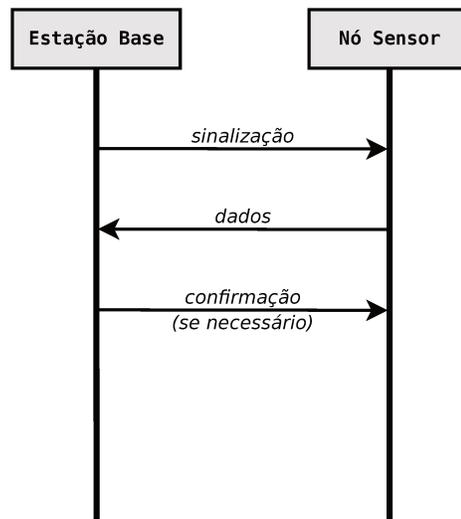


Figura 6.6: Comunicação entre os nós sensores da rede e a estação base do protocolo SPP-MAC.

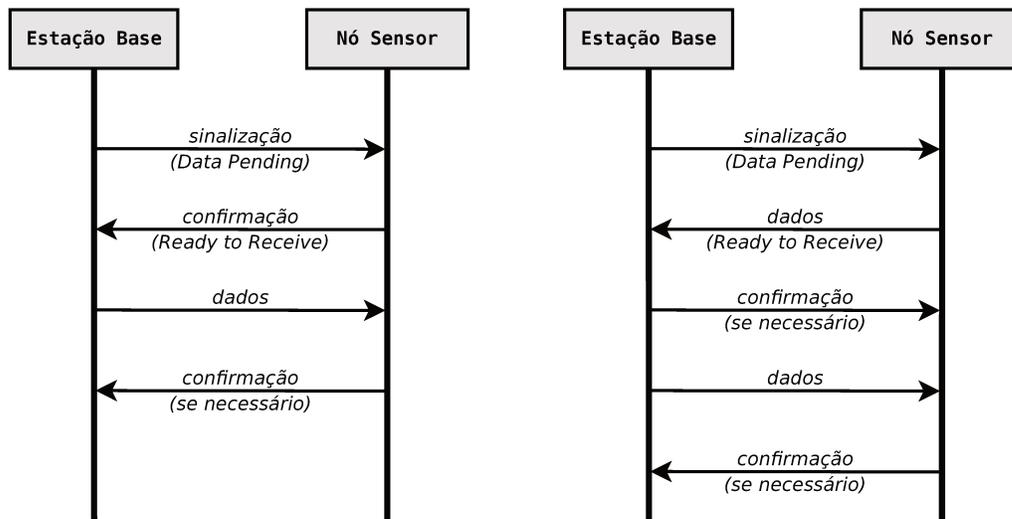


Figura 6.7: Comunicação entre a estação base e os nós sensores da rede do protocolo SPP-MAC.

### 6.3.7 Confirmação de Recebimento e Retransmissão de Dados

#### Sem Confirmação

Um quadro de dados transmitido com seu subcampo de controle *Acknowledgment Request* igual a zero não deve ter sua recepção confirmada pelo dispositivo receptor. O dispositivo emissor deve assumir que a transmissão do quadro de dados foi bem sucedida.

### Com Confirmação

Um quadro de dados transmitido com seu subcampo de controle *Acknowledgment Request* igual a um deve ter sua recepção confirmada pelo dispositivo receptor. Se o dispositivo receptor recebeu corretamente o quadro, ele deve gerar e transmitir um quadro de confirmação contendo o mesmo número de sequência do quadro de dados que está sendo confirmado.

A transmissão de um quadro de confirmação deve começar *phyTurnaroundTime*  $\mu s$  depois da recepção do último bit do quadro de dados.

### Retransmissões

Um dispositivo que transmite um quadro de dados com o subcampo de controle *Acknowledgment Request* igual a zero deve assumir que a transmissão foi recebida com sucesso e não deve realizar o procedimento de retransmissão.

Um dispositivo que transmite um quadro de dados com o subcampo de controle *Acknowledgment Request* igual a um deve aguardar o recebimento do quadro de confirmação correspondente. Se o dispositivo em questão for a estação base, o não recebimento do quadro de confirmação faz com que haja uma nova transmissão do quadro de dados na próxima sinalização do nó sensor. Se o dispositivo for um nó sensor, ele permanecerá com o transceptor ativo e na próxima sinalização transmitirá o quadro de dados novamente.

## 6.4 Hybrid Medium Access Control for Hybrid Radio-over-Fiber Wireless Sensor Network System

### 6.4.1 Introdução

O protocolo HMARS (**H**ybrid **M**edium **A**ccess **C**ontrol for **H**ybrid **R**adio-over-Fiber **W**ireless **S**ensor **N**etwork **A**rchitecture) foi desenvolvido exclusivamente para sistemas híbridos de Rede de Sensores sem Fio e Rádio-sobre-Fibra (WSN-RoF), conforme o Capítulo 5, com a finalidade de promover a melhor economia de energia possível.

O HMARS lida com o processo de acessar o canal sem fio e o canal óptico além de ser responsável pelas seguintes tarefas:

- Prover uma conexão confiável entre a estação base e os nós sensores;
- Empregar o mecanismo CSMA/CA para acesso ao canal;
- Escalonar o superframe se o dispositivo é a estação base;

- Propagar o escalonamento do superframe para os nós sensores utilizando os quadros de beacons se o dispositivo é a estação base.

Para diminuir o desperdício de energia, esse protocolo foi projetado de maneira a evitar os quatro problemas que causam o desperdício de energia: a colisão, o *overhearing*, o *overhead* e o *idle listening*. Porém, ele introduz um novo mecanismo que consome energia que é a sincronização dos relógios da rede.

Ele define um método de acesso híbrido combinando o *Time Division Multiplexing* (TDM) e o *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA) não-persistente. Para o TDM, dois métodos foram utilizados: o *Time Division Duplex* (TDD) e o *Time Division Multiple Access* (TDMA). O TDD foi utilizado para emular uma comunicação *full-duplex* no canal sem fio e o TDMA foi utilizado para permitir a comunicação de múltiplos *clusters* de cobertura sem que suas transmissões colidam.

O uso do TDM foi considerado para ser o método de acesso para o canal óptico, utilizando tanto o TDD quanto o TDMA. A utilização do TDD se deve ao fato que mesmo tendo uma fibra óptica para *downlink* e outra para *uplink* no meio óptico, não é possível separá-las fisicamente no meio sem fio. Desta maneira, a utilização do TDD para emular uma comunicação *full-duplex* no meio sem fio é uma ótima solução, pois, ao invés de dividir fisicamente o *downlink* e o *uplink* ele o faz logicamente através da divisão do tempo. Assim, em uma transmissão TDD, a ocupação do canal é alternada entre tráfegos de *downlink* e *uplink*.

No entanto, o TDD apenas divide o tempo de comunicação em *downlink* e *uplink* e não é eficaz quando existem vários *clusters* de cobertura na rede. Por este motivo, foi implementado o TDMA, pois ele permite que muitos *clusters* de cobertura compartilhem a mesma frequência no canal sem fio. O TDMA é utilizado para evitar as colisões no canal óptico dos diferentes *clusters* de cobertura da rede através da separação de diferentes períodos de tempo destinados a cada *cluster* de cobertura. Para isto, faz-se necessária uma sincronização forte dos relógios dos componentes da rede como também o conhecimento prévio de toda topologia da rede por parte de uma unidade central que estabelecerá todo o escalonamento para a rede.

Para garantir as exclusividades de transmissão para o *downlink* e o *uplink*, uma estrutura de *superframe* é utilizada, que é definida pela estação base através de parâmetros de configuração. O *superframe* é dividido em dois *frames*: o *frame downlink* e o *frame uplink*. O *frame uplink* é dividido em *subframes uplink*, um para cada *cluster* de cobertura da rede. É no *subframe uplink* que os *clusters* de cobertura transmitem. O *subframe uplink* é utilizado para separar as transmissões dos diversos *clusters* de cobertura que constituem a rede, impossibilitando, assim, as colisões das transmissões de diferentes *clusters* de cobertura.

Uma vez que um dispositivo comece a transmitir um quadro, ele o transmite integralmente, isto é, tão logo um dispositivo inicie, não há volta. Como é de esperar, transmitir quadros inteiros quando existe grande possibilidade de colisão pode degradar significativamente o desempenho de um protocolo de acesso múltiplo. Para reduzir a probabilidade de colisões, o HMARS emprega uma versão modificada do CSMA/CA. Ele é utilizado para minimizar as colisões intra-cluster, ou seja, no canal sem fio, através do monitoramento prévio do canal para cada transmissão. Para isto, foi proposto um mecanismo não-persistente que utiliza um *backoff* exponencial aleatório para diminuir a probabilidade de colisões e o consumo de energia. Então, antes de cada transmissão, os nós sensores e a estação base devem avaliar a condição do canal e apenas começar a transmissão se o canal estiver livre.

Para reduzir o *overhead*, nem quadros de controle nem quadros de confirmação são utilizados, assim, não existe a troca de quadros RTS/CTS e nem a confirmação da recepção dos quadros de dados. Desta maneira, o protocolo não contém nenhuma disposição contra o problema dos terminais ocultos, o que pode acarretar em alguns falsos positivos na avaliação do canal. No entanto, a redução do *overhead* tem uma grande vantagem no consumo de energia.

Outro mecanismo implementado no protocolo para diminuir o consumo de energia está relacionado ao *overhearing*. Este mecanismo verifica se o quadro sendo recebido é destinado ao dispositivo. Se o mecanismo verificar que o quadro não é destinado para o dispositivo, a recepção é suspensa imediatamente, se não, continua até o final do quadro. Mesmo que uma pequena parte do quadro seja recebida, a maior parte que é a carga útil não será, o que acarretará em economia de energia.

Foi também implementado o Modo de Economia de Energia, que define três modos de operação:

1. *Low*: o transceptor é desativado quando o nó sensor está fora do seu *subframe uplink* e é ativado quando o nó sensor está dentro do seu *subframe uplink* ou quando está dentro do *frame downlink*.
2. *Middle*: o transceptor é apenas ativado quando esta dentro do *frame downlink* ou quando tem algum dado para transmitir e está dentro de seu *subframe uplink*. No demais, ele permanece com seu transceptor desativado. Desta forma, se o nó sensor não tiver dados para transmitir ele não ativará seu transceptor.
3. *High*: o transceptor é apenas ativado quando tem algum dado para transmitir e está dentro de seu *subframe uplink*. No demais, ele permanece com seu transceptor desativado, mesmo no *frame downlink*. Desta maneira, o nó sensor neste modo não receberá quadros de dados da estação base.

Como o protocolo não utiliza quadros de confirmação, a confiabilidade é dada apenas pela utilização do *Frame Check Sequence* (FCS), no qual verifica se os dados recebidos estão corretos através de operações matemáticas sobre os bits que compõem o quadro. Desta forma, os dispositivos que transmitem informações não tem o parecer do recebimento por parte do dispositivo destino. Um dos motivos, já mencionado anteriormente, de não se utilizar quadros de confirmação é a redução do *overhead*, mas não é o único motivo. Outro motivo é o tempo que o dispositivo precisaria esperar para receber o quadro de confirmação, que aumenta com o aumento do comprimento da fibra, podendo ser maior que o tempo hábil para a transmissão dos dados.

A organização do protocolo se dá por *rounds*, onde cada *round* é dividido em duas fases: uma fase de setup e outra fase de execução, como pode ser visto na Figura 6.8. Na fase de setup é realizado a sincronização dos relógios dos componentes da rede, o escalonamento do *superframe* e a propagação do *superframe* para os nós sensores da rede; e na fase de execução é realizada as transmissões dos dados propriamente dito.

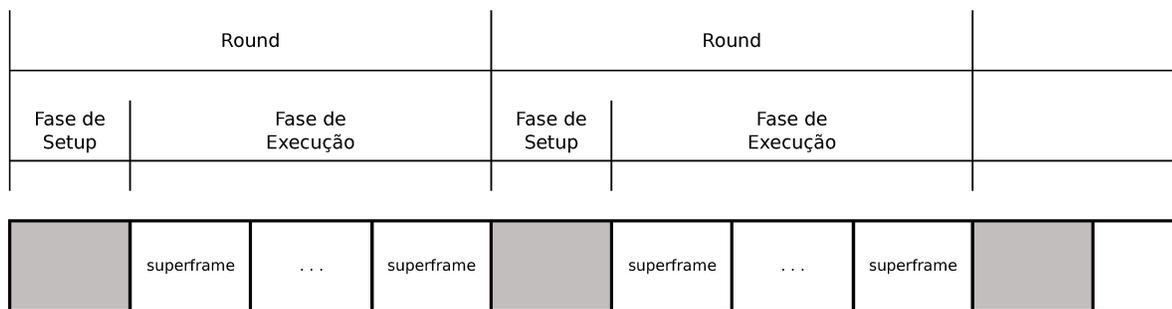


Figura 6.8: Fases do protocolo HMARS.

### 6.4.2 Especificação do formato dos quadros MAC

As estruturas dos quadros foram projetadas para serem minimalistas e ao mesmo tempo serem robustas para transmissão em canais sem fio e óptico com ruídos. Cada camada sucessiva de protocolo adiciona para a estrutura do quadro os cabeçalhos e rodapés específicos da camada.

O protocolo HMARS define dois tipos de quadros: um quadro de beacon, utilizado pela estação base para transmitir os beacons de escalonamento do superframe; e um quadro de dados, utilizado por todas as transmissões de dados.

Cada quadro MAC consiste dos seguintes componentes básicos: i) MHR (*MAC Header*), é o cabeçalho do quadro e consiste dos campos controle do quadro, dos endereços de destino e fonte e do número de sequência; ii) *MAC payload*, de tamanho variado, no qual contém informações específicas para cada tipo de quadro; iii) MFR (*MAC Footer*), no qual contém o FCS (*Frame Check Sequence*).

### Formato geral do quadro MAC

O quadro MAC é composto de um MHR, um MAC *payload* e um MFR, onde os campos do MHR aparecem em uma ordem fixa. Ele deve ser formatado como mostra a Figura 6.9.

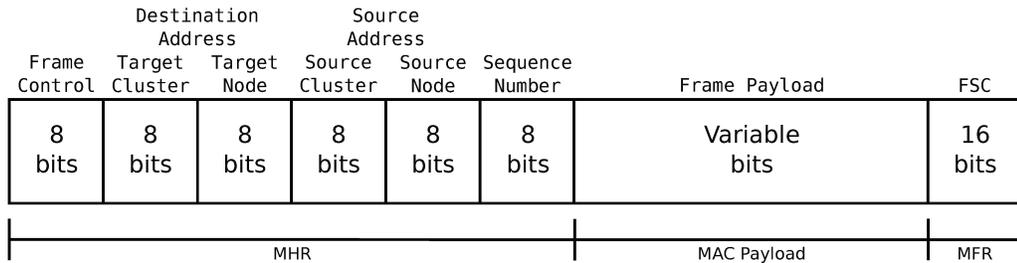


Figura 6.9: Formato geral do quadro MAC do protocolo HMARS.

O MHR tem tamanho fixo e contém:

- Campo *Frame Control*: esse campo tem 8 *bits* de tamanho e contém informações que define o tipo do quadro. Ele deve ser formatado segundo a Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Formato do campo *Frame Control* do protocolo HMARS.

Subcampos	Tamanho	Posição
Frame Type	3 <i>bits</i>	0 - 2
Reservado	5 <i>bits</i>	3 - 7

Tabela 6.7: Valores do subcampo *Frame Type* do protocolo HMARS.

Valor do Frame Type	Descrição
000	Beacon
001	Dados
010 - 111	Reservado

- Campos *Target Cluster* e *Target Node*: ambos têm 8 bits de tamanho e contém o identificador do *cluster* de cobertura destino e o identificador do nó sensor destino respectivamente. A junção dos dois forma o endereço de destino do quadro.
- Campos *Source Cluster* e *Source Node*: ambos têm 8 bits de tamanho e contém o identificador do *cluster* de cobertura origem e o identificador do nó sensor origem respectivamente. A junção dos dois forma o endereço de origem do quadro.
- Campos *Sequence Number*: tem 8 bits de tamanho e especifica o identificador da sequência do quadro.

O MAC *payload* tem tamanho variável e contém:

- Campo *Frame Payload*: tem um tamanho variável e contém a carga útil dos quadros.

O MFR tem tamanho fixo e contém:

- Campo *FCS*: tem 16 bits de tamanho e contém um 16-bit ITU-T CRC e é calculado sobre o MHR e MAC *payload*.

### Formato individual dos tipos de quadros MAC

Dois tipos de quadros são definidos: beacon e dados.

- **Quadro de Beacon:** O quadro de beacon deve ser formatado conforme ilustrado na Figura 6.10. Ele é utilizado para a transmitir a configuração do escalonamento do superframe da rede para os nós sensores.

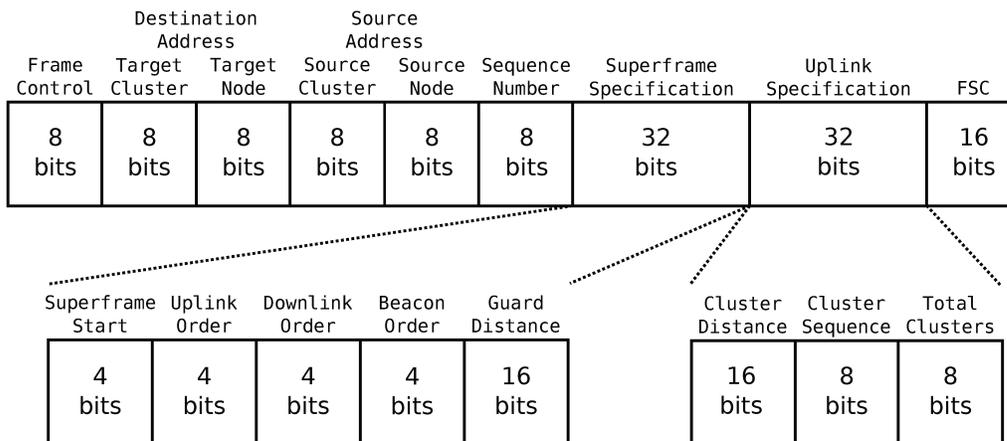


Figura 6.10: Formato do quadro de beacon do protocolo HMARS.

O MAC *payload* do quadro de beacon tem tamanho fixo e contem:

- O subcampo *Superframe Start* (SS) tem 4 *bits* de tamanho e especifica quando a fase de execução irá começar.
- O subcampo *Uplink Order* (UO) tem 4 *bits* de tamanho e especifica a duração de cada *subframe uplink* no *superframe*.
- O subcampo *Downlink Order* (DO) tem 4 *bits* de tamanho e especifica a duração do *frame downlink* no *superframe*.
- O subcampo *Beacon Order* (BO) tem 4 *bits* de tamanho e especifica a duração da fase de execução.
- O subcampo *Guard Distance* (GD) tem 16 *bits* de tamanho e especifica a distância, em quilômetros, de segurança do sistema, que é igual ao comprimento do enlace de fibra óptica entre a Estação Base de Controle e o *cluster* de cobertura mais distante.
- O subcampo *Cluster Distance* (CD) tem 16 *bits* de tamanho e especifica o comprimento, em quilômetros, do enlace de fibra óptica entre a Estação Base de Controle e o *cluster* de cobertura para o qual o quadro de beacon é destinado.
- O subcampo *Cluster Sequence* (CS) tem 8 *bits* de tamanho e especifica a ordem dos *clusters* de cobertura no sistema.
- O subcampo *Total Clusters* (TC) tem 8 *bits* de tamanho e especifica a quantidade total de *clusters* de cobertura no sistema.

- **Quadro de Dados:** O quadro de dados deve ser formatado conforme ilustrado na Figura 6.11. Ele é utilizado para a transmitir os dados dos nós sensores para a estação base ou da estação base para os nós sensores.

Frame Control	Destination Address		Source Address		Sequence Number	Data Payload	FSC
	Target Cluster	Target Node	Source Cluster	Source Node			
8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	Variable bits	16 bits

Figura 6.11: Formato do quadro de dados do protocolo HMARS.

### 6.4.3 Constantes e atributos

Tabela 6.8: Atributos do protocolo HMARS.

Atributo	Descrição
<i>phyCurrentChannel</i>	o canal de rádio frequência utilizado para transmissão e recepção
<i>phyTransmitPower</i>	a potência utilizada para a transmissão
<i>macCW</i>	a janela de contenção no algoritmo CSMA/CA
<i>macMinBE</i>	o número mínimo do expoente backoff
<i>macMaxBE</i>	o número máximo do expoente backoff
<i>macEnergy</i>	modo de operação da economia de energia

Tabela 6.9: Constantes do protocolo HMARS.

Constante	Valor
<i>phyTurnaroundTime</i>	75 $\mu$ s
<i>phyCCATime</i>	85 $\mu$ s
<i>phyMaxPSDUSize</i>	127 bytes
<i>phyFiberDelay</i>	5 $\mu$ s
<i>macMHRSize</i>	6 bytes
<i>macMFRSize</i>	2 bytes
<i>macBaseSlotDuration</i>	510 $\mu$ s
<i>macNumFramesSlots</i>	16
<i>macBaseFrameDuration</i>	$\text{macBaseSlotDuration} * \text{macNumFramesSlots} \mu$ s
<i>macMaxCSMABackoffs</i>	7
<i>macUnitBackoffPeriod</i>	$\text{phyTurnaroundTime} + \text{phyCCATime} + 10 \mu$ s
<i>macBeaconPayloadLength</i>	8 bytes

#### 6.4.4 Estrutura do Superframe

Para o uso eficiente do TDD e do TDM nesse tipo de arquitetura, o conhecimento prévio da topologia da rede se faz necessário. Este conhecimento engloba a quantidade de *clusters* de cobertura existentes no sistema, os identificadores destes *clusters* de cobertura, a disposição destes *clusters* de cobertura ao longo do enlace óptico e o comprimento do enlace óptico entre a estação base e cada *clusters* de cobertura.

Por ser um método centralizado, o TDM necessita de um agente para gerenciar o escalonamento, e nada mais óbvio do que utilizar a estação base para esta tarefa.

O protocolo define uma estrutura temporal chamada de *superframe* que serve de referência para o sincronismo da rede, como pode ser visto na Figura 6.12. Esta estrutura é responsável por manter o TDD e o TDM do protocolo, separando os *frames downlink* dos *frames uplink*.

Antes do começo do *superframe*, uma fase de *setup* é realizada, e é nesta fase que, tanto a sincronização dos relógios dos componentes da rede quanto o escalonamento do *superframe* é realizado. No término da sincronização, todos os relógios dos componentes da rede deverão estar marcando o mesmo tempo, que será considerado como sendo o tempo *zero* do sistema para esta sincronização. O *superframe* é construído de acordo com os parâmetros de configuração centralizados na estação base e por propriedades contantes do protocolo. Depois que o *superframe* estiver construído, é necessário que a estação base informe os nós sensores da rede sobre como se dará o funcionamento do *superframe* e isso é realizado através da transmissão de quadros de beacon.

Dentro do período de um *superframe*, tem-se a divisão em dois intervalos de tempo assimétricos chamados de *frames*, definidos como *frame downlink* e *frame uplink*. É importante perceber que, por padrão do protocolo, o *frame downlink* sempre precede o *frame uplink*. O *frame downlink* é utilizado para a estação base transmitir seus dados para os nós sensores da rede e o *frame uplink* para os nós sensores da rede transmitirem seus dados para a estação base.

Para não haver colisões entre as transmissões de diferentes *clusters* de cobertura, o *frame uplink* é dividido em *subframes uplink*, onde cada *cluster* de cobertura é atribuído a um único *subframe uplink* dentro do *frame uplink*. Desta forma, os nós sensores pertencentes a cada *cluster* de cobertura só poderão transmitir quando estiverem dentro do intervalo de tempo pertencentes ao seu *subframe uplink*.

Quando os nós tem a permissão de transmissão, eles devem utilizar o mecanismo CSMA/CA não-persistente para transmitirem.

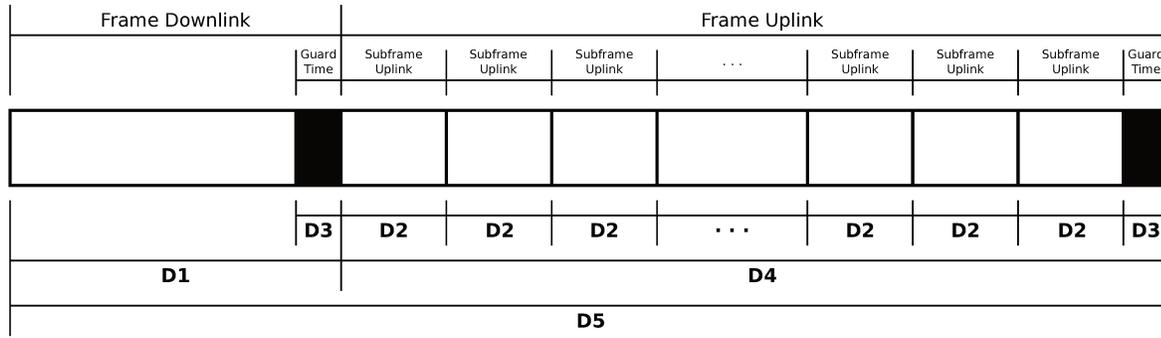


Figura 6.12: Estrutura do Superframe do protocolo HMARS.

- $D1 = (macBaseFrameDuration * 2^{DO}) + D3$
- $D2 = macBaseFrameDuration * 2^{UO}$
- $D3 = Guard\ Distance[km] * phyFiberDelay[s]$
- $D4 = (Total\ Clusters * D2) + D3$
- $D5 = D1 + D4$

É possível notar que no final tanto do *frame downlink* quanto do *frame uplink* existe um tempo de guarda chamado *Guard Time*. Este tempo é necessário para garantir que os dados consigam trafegar por todo o comprimento do enlace óptico antes que outros dados sejam transmitidos.

A duração da fase de execução é dada pela Equação 6.2:

$$Duration = D5 * 2^{BO} \quad (6.2)$$

Portanto, o ciclo de trabalho (*duty cycle - dc*) dos nós sensores da rede é dado pela Equação 6.3:

$$dc = \frac{D2}{D5} \quad (6.3)$$

### 6.4.5 Escalonamento do Superframe

Como visto anteriormente, a responsabilidade de construir o escalonamento do *superframe* e propagá-lo para todos os nós sensores da rede é da estação base. Para isto, a estação base mantém alguns valores de configuração para serem utilizados somente na construção do escalonamento. Tais valores são mantidos em parâmetros que estão mostrados abaixo:

- **Superframe Start (SS):** determina quando termina a fase de setup e começa a fase de execução, e seu valor deve estar entre 0 e 15.
- **Beacon Order (BO):** determina a duração da fase de execução, ou seja, indica quantos *superframes* serão realizados até a próxima fase de setup, e seu valor deve estar entre 0 e 15.
- **Downlink Order (DO):** determina a duração do *frame downlink*, e seu valor deve estar entre 0 e 15.
- **Uplink Order (UO):** determina a duração de cada *subframe uplink* no *superframe*, e seu valor deve estar entre 0 e 15.
- **Guard Distance (GD):** utilizado para calcular o tempo de guarda (*Guard Time*) e é o comprimento do enlace óptico entre a estação base e o *cluster* de cobertura mais distante, em quilômetros. Seu valor é dado através da Equação 5.2 e deve estar entre 0 e 65535
- **Cluster Distance (CD):** a estação base mantém o comprimento, em quilômetros, do enlace óptico para cada *cluster* de cobertura do sistema, e seu valor deve estar entre 0 e 65535.
- **Cluster Sequence (CS):** a estação base mantém a sequência na qual os *clusters* de cobertura estão colocadas no enlace óptico, e seu valor deve estar entre 0 e 255.
- **Total Clusters (TC):** a estação base mantém a informação da quantidade total de *clusters* de cobertura no sistema, e seu valor deve estar entre 0 e 255.

Para construir o quadro de beacon, a estação base utiliza as informações mantida por ela. Cada subcampo do quadro de beacon deve receber os dados correspondente ao parâmetro de configuração de mesmo nome de acordo com o *cluster* de cobertura.

Depois de definir o escalonamento do *superframe*, a estação base deve propagar as informações para todos os nós sensores da rede através dos quadros de beacon, sendo um quadro destinado a cada *cluster* de cobertura.

Depois de receberem o quadro de beacon, cada nó sensor deve computar os tempos pertinentes ao escalonamento para, assim, saber quando poderá receber dados da estação base (*frame downlink*), quando poderá transmitir dados para a estação base (*subframe uplink*) e quando será a ressincronização e o reescalonamento da rede (próxima fase de setup).

Quando um nó sensor é incorporado na rede, ele deve ficar ouvindo o canal esperando pela sincronização e escalonamento que ocorrem na fase de setup. Quando o nó sensor

recebe o quadro de beacon da estação base, ele aprende o escalonamento global da rede, assim podendo transmitir seus dados.

Tanto a sincronização quanto o escalonamento são feitos durante a fase de setup que se repete em intervalos determinados pela estação base através de parâmetros de configuração.

A existência do *frame downlink* no *superframe* não é algo obrigatório. A estação base é a entidade que decide se o superframe terá ou não o *frame downlink* através do parâmetro de configuração *downlink order* (DO) no qual quando seu valor é igual a 15, o *frame downlink* não é alocado no *superframe*.

#### 6.4.6 Mecanismo CSMA/CA não-persistente

O protocolo HMARS não contém nenhuma provisão para a situação do terminal-oculto, pois não existe a troca de quadros RTS/CTS. Para reduzir a probabilidade de colisão, o protocolo usa um método de atraso aleatório (*backoff* aleatório), assim sendo um protocolo baseado no CSMA/CA para acesso ao canal sem fio.

Quando os nós sensores ou a estação base têm informações (quadros de dados ou quadros de beacon) para transmitirem e estão habilitados para isto, eles usam o mecanismo CSMA/CA não-persistente descrito logo abaixo.

Embora o transceptor do dispositivo esteja ativo durante a porção de análise *Clear Channel Assessment* (CCA) deste algoritmo, o dispositivo deve descartar quaisquer quadros recebidos durante este tempo.

Um dos procedimentos mais importantes é verificar se existe tempo hábil para a realização do CSMA/CA antes do final do *subframe uplink* do *cluster* de cobertura do nó sensor. Se o tempo restante não for o suficiente, a transmissão é adiada até o próximo *subframe uplink*.

Cada dispositivo mantém três variáveis para cada tentativa de transmissão: *CW*, *NB*, e *BE*. A variável *CW* é o tamanho da janela de contenção que define quantos períodos *backoffs* devem ocorrer antes da transmissão poder começar; seu valor é inicializado em *macCW* antes de cada tentativa de transmissão e resetado para *macCW* cada vez que o canal sem fio é encontrado ocupado. A variável *NB* é o número de vezes que o algoritmo CSMA/CA entra no período *backoff* ao tentar a transmissão atual; este valor deve ser inicializado em zero antes de cada tentativa de transmissão. A variável *BE* é o expoente *backoff*, que está relacionado com quantos períodos *backoff* um dispositivo deve esperar antes de tentar avaliar um canal; seu valor é inicializado em *macMinBE* antes de cada tentativa de transmissão.

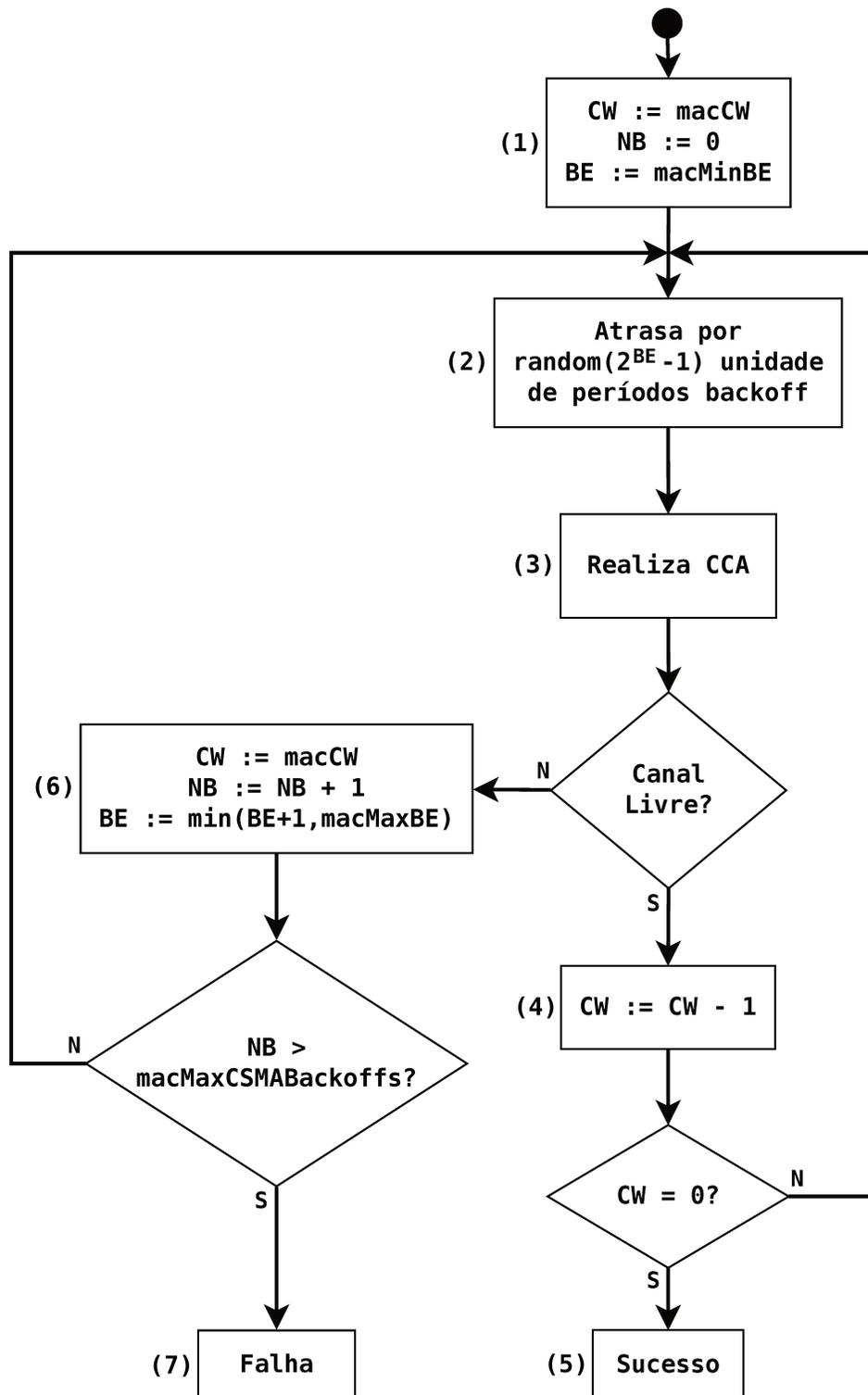


Figura 6.13: Diagrama do mecanismo CSMA/CA não-persistente do protocolo HMARS.

Quando um dispositivo deseja transmitir um quadro de dados ou beacon, ele adia sua transmissão por um número aleatório de períodos completos *backoff* entre 0 e  $2^{BE} - 1$  (Figura 6.13, Passo 2), onde cada período completo *backoff* é igual a *macUnitBackoffPeriod* microssegundos, para então requisitar à camada Física a realização de uma operação de monitoramento do canal chamada de *Clear Channel Assessment* (CCA) (Figura 6.13, Passo 3). A CCA é realizado durante um período curto de tempo igual a *phyCCATime* microssegundos, por isto o mecanismo é dito não-persistente.

Se a operação avaliar que o canal sem fio está ocupado, a subcamada MAC deve incrementar tanto *NB* quanto *BE* por um, garantindo que *BE* não seja maior do que *macMaxBE* e redefinir *CW* como *macCW* (Figura 6.13, Passo 6). Se o valor de *NB* for menor ou igual a *macMaxCSMABackoffs*, o algoritmo CSMA/CA deve adiar novamente sua transmissão por um número aleatório de períodos completos *backoff* entre 0 e  $2^{BE} - 1$  (Figura 6.13, Passo 2). Se o valor de *NB* é maior que *macMaxCSMABackoffs*, o algoritmo CSMA/CA deve terminar com um status de falha de acesso ao canal (Figura 6.13, Passo 7).

Se a operação avaliar que o canal sem fio está livre, a subcamada MAC deve assegurar que a janela de contenção expirou antes de iniciar a transmissão. Para fazer isso, a subcamada MAC deve primeiro decrementar *CW* por um (Figura 6.13, Passo 4) e, subsequentemente, determinar se seu valor é zero. Ser não for igual a zero, o algoritmo CSMA/CA deve adiar novamente sua transmissão por um número aleatório de períodos completos *backoff* entre 0 e  $2^{BE} - 1$  (Figura 6.13, Passo 2). Se for igual a zero, a subcamada MAC deve começar a transmissão do quadro (Figura 6.13, Passo 5).

### 6.4.7 Transmissão dos dados

Existem dois tipos de transações de transmissão de dados. A primeira é a transmissão para a estação base no qual um nó sensor da rede transmite os dados. A segunda transação é a transmissão da estação base para um nó sensor da rede. Não existe transmissão entre dois nós sensores da rede, mesmo que eles estejam no mesmo *cluster* de cobertura.

O protocolo HMARS foi desenvolvido para sistemas de comunicação direta, ou seja, o destino da comunicação deve estar ao alcance direto da origem.

Para a transmissão dos quadros de dados poder ser iniciada, todos os nós sensores da rede devem conhecer o escalonamento do *superframe*, pois é através do *superframe* que as transmissões são executadas.

#### Estação base para os nós sensores

Quando a estação base deseja transmitir dados para um nó sensor da rede, ela deve fazê-lo no *frame downlink*. Estando dentro do *frame downlink*, a estação base pode transmitir

seus dados usando o mecanismo CSMA/CA. Desta maneira, apenas a estação base terá permissão para transmitir, enquanto os nós sensores apenas receberão os dados.

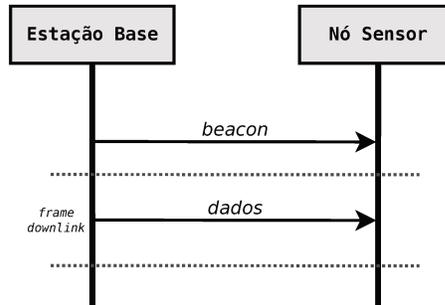


Figura 6.14: Comunicação entre a estação base e os nós sensores da rede do protocolo HMARS.

### Nós sensores para a estação base

Quando um nó sensor da rede deseja transmitir dados para a estação base, ele deve esperar estar dentro do *subframe uplink* relacionado ao seu *cluster* de cobertura.

Estando dentro do seu *subframe uplink*, o nó sensor da rede pode transmitir seus dados usando o mecanismo CSMA/CA, dessa maneira, ele deve disputar o canal sem fio com os outros nós sensores do *cluster* de cobertura.

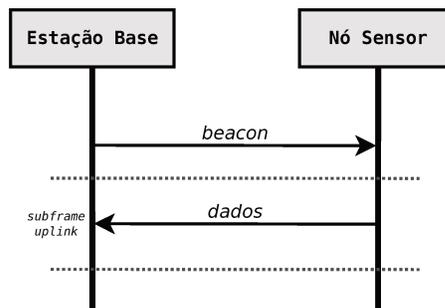


Figura 6.15: Comunicação entre os nós sensores da rede e a estação base do protocolo HMARS.



# Capítulo 7

## Avaliação do desempenho dos protocolos propostos

### 7.1 Introdução

A simulação é uma ferramenta essencial em pesquisas na área de redes de computadores, pois permite o desenvolvimento e análise de novos protocolos e mecanismos em topologias complexas, sem a necessidade de uma implantação real. O simulador de redes *Network Simulator 2 (NS2)* é um simulador de código aberto e bastante utilizado na academia dado que fornece elementos para simular os principais protocolos de Internet e permite simular as mais diversas arquiteturas e topologias de redes.

Neste capítulo, apresenta-se a avaliação de desempenho dos protocolos de controle de acesso ao meio HMARS e SPP-MAC e dos demais protocolos de controle de acesso ao meio utilizados para comparação. Todos os resultados apresentados, neste capítulo, foram obtidos através de simulações realizadas utilizando o *NS2*.

Foram considerados diferentes cenários, abrangendo o sistema de rede infraestruturada de comunicação, proposto no Capítulo 5. O objetivo é avaliar as propriedades e o comportamento dos protocolos HMARS e SPP-MAC. Não foram considerados os erros provenientes da camada Física [41], exceto a perda de potência devido a propagação do sinal.

O restante deste capítulo está organizado como segue. Na Seção 7.2, é descrito o processo de implementação das funcionalidades dos equipamentos Rádio-sobre-Fibra no simulador de redes utilizado. Na Seção 7.3, são apresentadas as configurações e parâmetros utilizados nas simulações. As descrições dos cenários simulados, os gráficos comparativos e as análises dos resultados obtidos encontram-se entre as Seções 7.4 e 7.8.

## 7.2 Implementação do Simulador

Para avaliar o comportamento dos protocolos de controle de acesso ao meio, o simulador de redes *NS2* (versão 2.35) foi utilizado.

Como nenhuma funcionalidade para a tecnologia Rádio-sobre-Fibra está implementada no *NS2*, foi preciso desenvolver para o simulador com as funcionalidades de equipamento de Rádio-sobre-Fibra. Para isto, foi realizado um estudo do funcionamento dos equipamentos RoF, tanto na comunicação no meio sem fio quanto no meio óptico, para levantar as necessidades para a implementação do módulo no simulador.

Feito esse estudo, decidiu-se criar três novas classes no simulador: *RoFWirelessPhy*, *RoFOpticalPhy* e *OpticalChannel*; além de inserir modificações em diversas outras classes.

A classe *OpticalChannel* implementa o canal óptico de comunicação, no qual fibras ópticas são utilizadas para trafegar as informações. Ela utiliza alguns parâmetros de configuração:

- **reflectiveIndex\_**: índice de refração da fibra óptica, e serve para calcular a velocidade de propagação da luz na fibra óptica, conforme a Equação 5.1.
- **opticalAttenuation\_**: atenuação óptica sofrida na fibra óptica dada em dB/Km.
- **length\_**: comprimento do enlace óptico da Estação Base de Controle até cada Unidade de Antena Remota.

A classe *RoFWirelessPhy* implementa a camada Física do canal sem fio do equipamento RoF e é responsável pela propagação das informações no canal sem fio do RoF, ou seja, ela tanto recebe as informações que são transmitidas no canal sem fio quanto transmite informações para o canal sem fio.

A classe *RoFOpticalPhy* implementa a camada Física do canal óptico do equipamento RoF e é responsável pela propagação das informações no canal óptico do RoF, ou seja, ela tanto recebe as informações que são transmitidas no canal óptico quanto transmite informações para o canal óptico.

Essas duas classes formam a base do equipamento RoF no *NS2*, pois todas as informações recebidas pela *RoFWirelessPhy* são enviadas para todas as *RoFOpticalPhy*, e todas as informações recebidas pelas *RoFOpticalPhy* são enviadas para a *RoFWirelessPhy* do equipamento RoF, ou seja, existe uma conexão entre as duas classes.

Para medir o consumo de energia dos componentes do sistema, utilizou-se o modelo de consumo de energia implementado no *NS2* e disponível na classe *EnergyModel*. No entanto, este modelo apresenta alguns problemas, impossibilitando uma medição precisa do consumo de energia dos componentes do sistema. Foi necessário, conseqüentemente, corrigir estes problemas antes de que o modelo pudesse ser utilizado. O consumo de energia

foi medido apenas pelo consumo por parte do transceptor dos nós sensores, assim, não se considera o consumo de energia dos microcontroladores ou outras partes do hardware dos nós sensores.

O consumo de energia é medido em quatro situações: quando está transmitindo, quando está recebendo, quando está ocioso e quando está desligado (mesmo estando desligado, o transceptor consome um pouco de energia). Para se fazer o cálculo do consumo, o modelo primeiro calcula quanto tempo foi necessário para a realização da operação, por exemplo, de transmitir uma quantidade de bits. Por último, multiplica-se o tempo gasto na operação pela potência necessária para realizar a operação.

A soma do consumo de cada operação é o consumo total de energia do nó sensor.

### 7.3 Configuração das Simulações

Para avaliar os protocolos HMARS e SPP-MAC, foram definidos alguns cenários. O simulador *NS2* foi configurado para operar em conformidade com as necessidades das simulações.

O modelo de perda de percurso adotado foi o *Lognormal Shadowing* em conjunto com a comparação da potência percebida durante a recepção dos quadros com a potência de sensibilidade dos transceptores para decidir se a potência recebida é suficiente para o transceptor obter os dados. O modelo *Poisson* foi adotado em todas as simulações.

Nas simulações, foi utilizado o agente de roteamento *DumbAgent*, disponível no *NS2*. Este é um bom agente para avaliação de protocolos de controle de acesso ao meio, pois estabelece comunicação direta, sem reencaminhamento de pacotes e nem mensagens de controle.

As principais métricas de desempenho consideradas durante as simulações deste capítulo são a taxa de entrega dos quadros de dados, a vazão efetiva agregada obtida pela rede e o consumo de energia. A vazão efetiva agregada é calculada a partir da seguinte equação:

$$V_{ef} = \frac{N_{dados} * L_{dados}}{\Delta T} \quad (7.1)$$

onde  $N_{dados}$  é o número de quadros de dados recebidos corretamente pela estação base,  $L_{dados}$  é o comprimento do MSDU (isto é, o tamanho do MAC payload) do quadro de dados e  $\Delta T$  é o tempo real de simulação, ou seja, o tempo total da simulação descontando o intervalo transiente inicial.

Todas as simulações foram replicadas 10 vezes com sementes aleatórias, e os resultados apresentados possuem intervalos de confiança de 95%. Os fluxos de dados são sempre

iniciados em tempos aleatórios inferior aos 10 primeiros segundos de simulação, sendo assim os 10 segundos iniciais considerados como transiente. A duração padrão de cada simulação é 510 segundos. Em todas as simulações, os nós sensores estavam dentro de um raio de 30 metros da RAU nos *clusters* de cobertura e o alcance máximo para as transmissões no canal sem fio foi estipulado em 100 metros.

Não foram considerados os problemas físicos causados pela utilização da tecnologia Rádio-sobre-Fibra nem os problemas decorrentes da comunicação de dados como: ruído, erro de bits da propagação, atenuação do sinal no enlace óptico, etc. Também não foi considerado o *overhead* atribuído pela camada Física (PHY).

As Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 mostram os valores utilizados para cada parâmetro de configuração nas simulações.

As seções a seguir descrevem as simulações e os resultados obtidos. Além da taxa de entrega, da vazão efetiva agregada obtida pela rede e do consumo médio de energia, discuti-se, também, o comportamento dos protocolos HMARS e SPP-MAC em função de seus parâmetros configuráveis. O modo de economia de energia foi ativado tanto no SPP-MAC quanto no HMARS, onde, neste último, foi atribuído para o estado *middle*.

Tabela 7.1: Parâmetros do transceptor nas simulações.

Parâmetro	Valor
Potência de transmissão da estação base	10 dBm
Potência de transmissão do nó sensor	10 dBm
Sensibilidade de recepção da estação base	-95 dBm
Sensibilidade de recepção do nó sensor	-95 dBm
Ganho da antena da estação base	0 dBi
Ganho da antena do nó sensor	0 dBi
Ganho da antena do RoF	0 dBi
Frequência de transmissão	915 MHz
Taxa de transmissão	250 Kbps
Consumo de energia em transmissão	90 mW
Consumo de energia em recepção	60 mW
Consumo de energia ocioso	45 mW
Consumo de energia desligado	5 $\mu$ W

Tabela 7.2: Parâmetros do modelo de path-loss Lognormal Shadowing.

Parâmetro	Valor
$\beta$	3.41
Distância de referência ( $d_0$ )	1 metro
Semente	1
Desvio padrão do <i>shadowing</i> ( $\sigma$ )	5 dB

Tabela 7.3: Parâmetros do protocolo HMARS.

Parâmetro	Valor
Superframe Start	3
macCW	2
macMinBE	3
macMaxBE	10

## 7.4 Desempenho da rede em função da quantidade de nós sensores e cargas de tráfego

O objetivo desta primeira simulação é verificar o comportamento dos protocolos propostos em função da quantidade de nós sensores disputando o acesso ao meio, seja pelo aumento da quantidade de *clusters* de cobertura na rede ou pelo aumento da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura.

A topologia definida conta com uma Estação Base de Controle e diversos *clusters* de cobertura, variando de 2 até 20. Cada *cluster* de cobertura está distanciado 5 Km um do outro e a quantidade de nós sensores em cada *cluster* de cobertura variou de 10 em 10, no intervalo de 10 até 50.

Foram utilizados fluxos de dados gerados por cada nó sensor da rede tendo como destino a estação base, e a carga de geração destes fluxos variou entre 0.5, 1, 2, 4 e 8

quadros por segundo. O tamanho do MAC *payload* dos quadros de dados foi fixado em 48 *bytes*.

As primeiras simulações realizadas com esta topologia são apresentadas no parágrafo a seguir, e têm como objetivo mostrar o efeito da escolha do valor do *uplink order*.

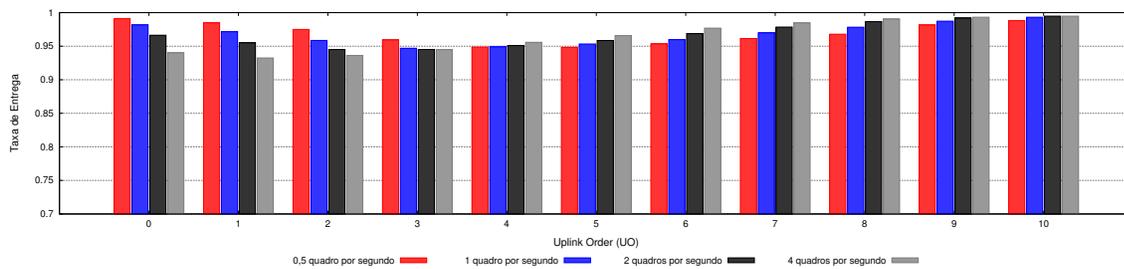
### 7.4.1 Parâmetros configuráveis do HMARS

Para configurar corretamente o protocolo de controle de acesso ao meio HMARS, foi preciso avaliar o efeito dos possíveis valores para o parâmetro *uplink order* na taxa de entrega e na vazão efetiva agregada obtida pela rede. Para isto, foram realizadas simulações com diferentes valores para este parâmetro.

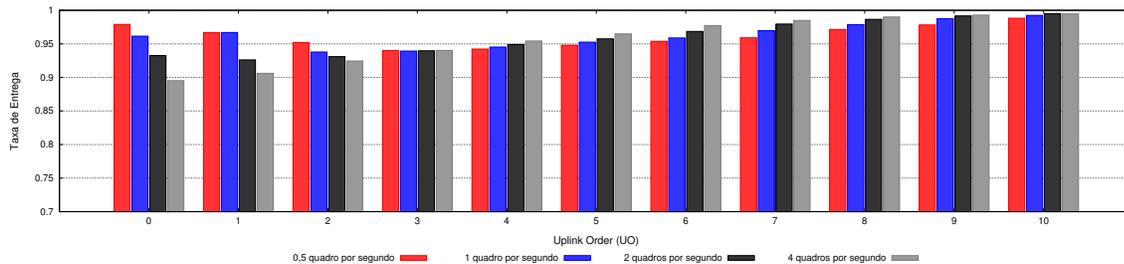
Foram testados valores para o parâmetro *uplink order*  $UO \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ . Para visualizar os resultados, foram desenhados gráficos que representam a taxa de entrega e a vazão efetiva agregada obtida pela rede em função do parâmetro *uplink order*.

Nos resultados, apenas as simulações com 5, 10, 15 e 20 *clusters* de cobertura são apresentados.

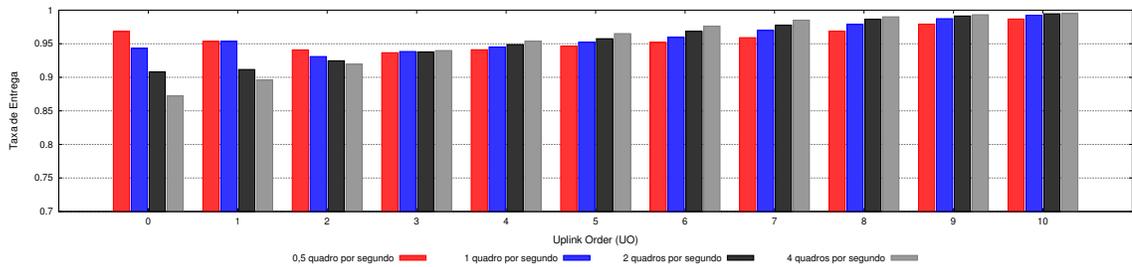
A Figura 7.1 exibe a taxa de entrega para os diferentes valores do *uplink order*. Pode-se observar que, independente de qual seja a carga, valores altos para o *uplink order* aumentam a taxa de entrega obtida e se mostram uma boa opção. Isto acontece devido a menor quantidade de colisões intra-clusters que ocorrem pois uma quantidade menor de quadros de dados serão transmitidos à medida que o *uplink order* aumenta.



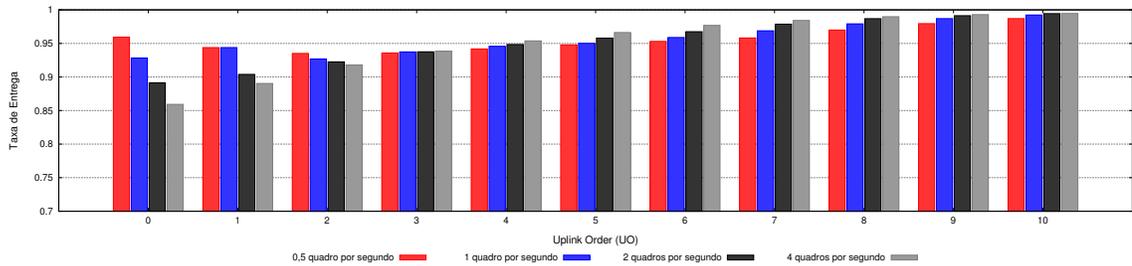
(a) 5 *clusters* de cobertura com 10 nós sensores



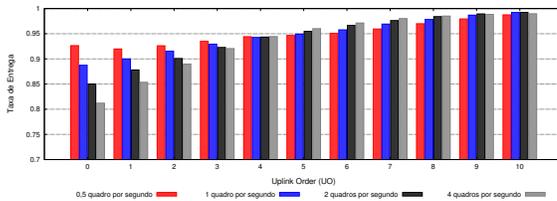
(b) 10 *clusters* de cobertura com 10 nós sensores



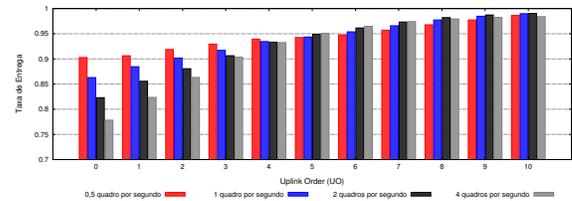
(c) 15 *clusters* de cobertura com 10 nós sensores



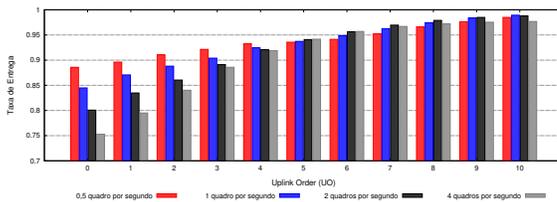
(d) 20 *clusters* de cobertura com 10 nós sensores



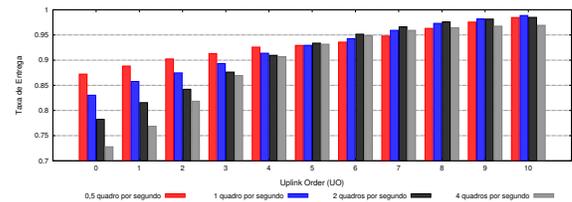
(e) 20 *clusters* de cobertura com 20 nós sensores



(f) 20 *clusters* de cobertura com 30 nós sensores



(g) 20 *clusters* de cobertura com 40 nós sensores

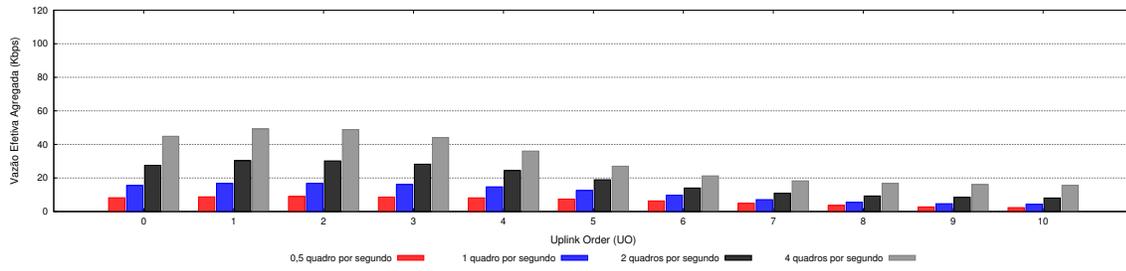


(h) 20 *clusters* de cobertura com 50 nós sensores

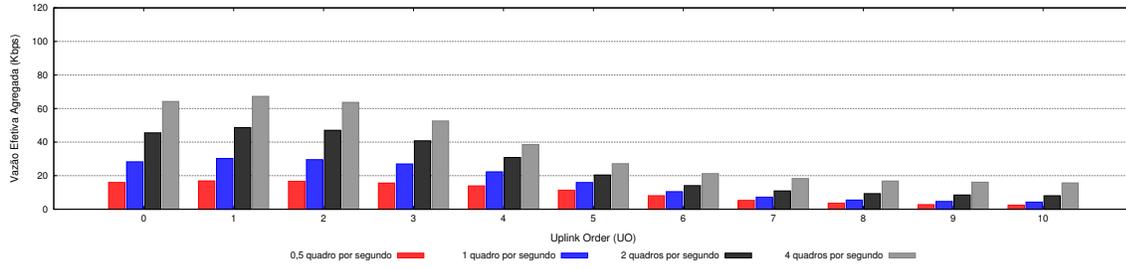
Figura 7.1: Taxa de entrega do protocolo HMARS em função do *uplink order*.

Outra observação é que, independente da quantidade de *clusters* de cobertura na rede, para uma mesma quantidade de nós sensores a taxa de entrega fica praticamente igual a partir de um determinado valor do *uplink order*, e, neste caso o valor é 4.

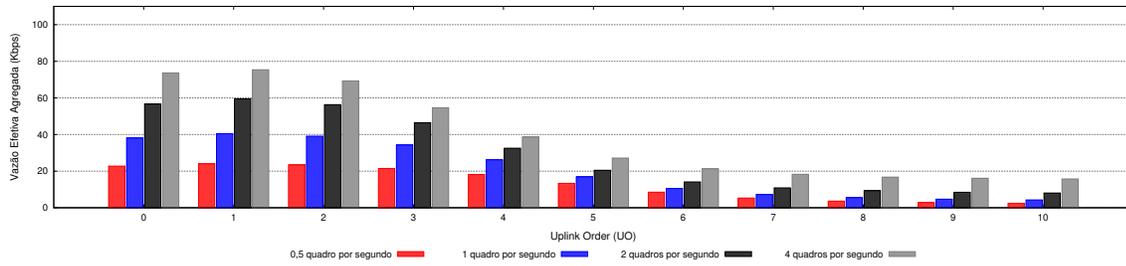
É possível identificar, também, que independente da quantidade de *clusters* de cobertura na rede, quando existem 10 nós sensores em cada *cluster* de cobertura a taxa de entrega é maior em pequenas cargas quando o valor do *uplink order* é pequeno e com o aumento do valor do *uplink order* existe uma inversão, ou seja, cargas maiores têm maiores taxas de entregas.



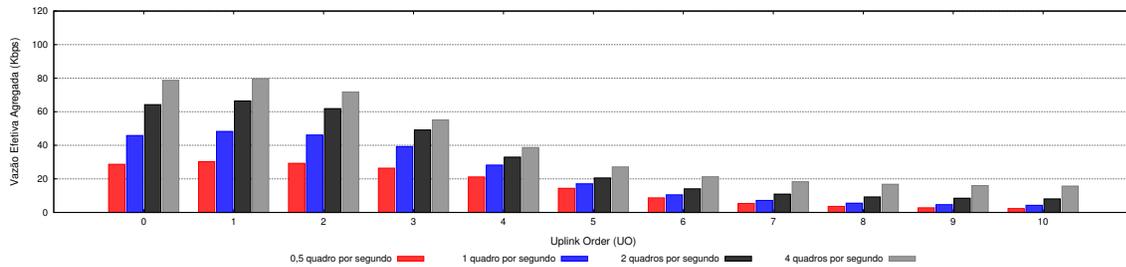
(a) 5 clusters de cobertura com 10 nós sensores



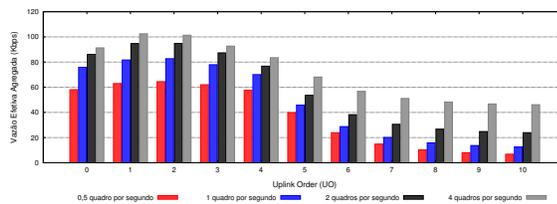
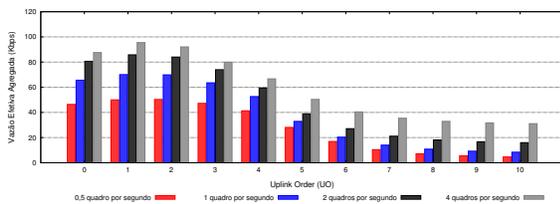
(b) 10 clusters de cobertura com 10 nós sensores



(c) 15 clusters de cobertura com 10 nós sensores



(d) 20 clusters de cobertura com 10 nós sensores



(e) 20 clusters de cobertura com 20 nós sensores

(f) 20 clusters de cobertura com 30 nós sensores

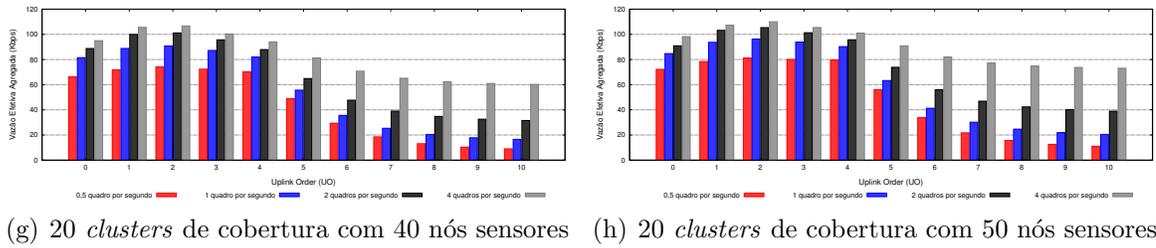


Figura 7.2: Vazão efetiva agregada do protocolo HMARS em função do *uplink order*.

Os gráficos da Figura 7.2 exibem a vazão efetiva agregada obtida pela rede para os diferentes valores do *uplink order*. Pode-se observar que, independentemente da quantidade de *clusters* de cobertura ou carga utilizada, valores altos do *uplink order* reduzem a vazão efetiva agregada. Isto se deve porque quando se aumenta o *uplink order* o tamanho do *subframe uplink* de cada *cluster* de cobertura aumenta, levando os nós sensores a permanecerem mais tempo ociosos do que transmitindo dados quando estão nos *subframes uplink* correspondentes a seus *clusters* de cobertura. Isto acontece, de maneira geral, porque os nós sensores dos *clusters* de cobertura não geram muito tráfego, tendo, assim, um grande intervalo entre a geração de seus dados. Então o melhor é passar de um *cluster* de cobertura para outro mais rapidamente, para aproveitar o tráfego dos outros *clusters* de cobertura.

Com base na análise das Figuras 7.1 e 7.2, foi definido o melhor valor do *uplink order*, que é utilizado nas demais simulações desta dissertação. O valor definido como melhor para o *uplink order* é 4, pois as taxas de entrega para todas as cargas são semelhantes, não desperdiça muita energia com colisões e leva à vazão efetiva agregada satisfatória. Este valor para o *uplink order* não representa necessariamente o valor ótimo, pois a escolha do melhor *uplink order* depende de várias características da rede, como a quantidade de nós sensores por *cluster* de cobertura, a quantidade de *clusters* de cobertura e a carga, além da escolha de qual maximização é necessária na rede.

Outro parâmetro importante do HMARS é o *downlink order* que define o tamanho do *frame downlink*. É fácil compreender que, quanto maior seu valor ( $0 \leq DO \leq 14$ ) maior será a duração do *frame downlink* no *superframe* e, conseqüentemente, menor será o tempo destinado ao *frame uplink* em um dado intervalo de tempo. Como os nós sensores transmitem seus dados no *frame uplink*, quanto menor sua duração menor será a quantidade de dados transmitidos num intervalo de tempo fazendo, assim, com que a vazão efetiva agregada diminua.

Para mostrar o comportamento da rede com relação ao *downlink order*, foram realizadas simulações variando o valor do *downlink order* entre 0, 5, 10 e 15. Em todas as simulações, o tráfego gerado é o mesmo, 4 quadros por segundo com 48 bytes de *payload*, a quantidade de *clusters* de cobertura é 10 e quantidade de nós sensores em cada *cluster*

de cobertura é 10. O *uplink order* foi fixado em 4. A Figura 7.4 mostra a vazão efetiva agregada para diferentes valores de *downlink order*.

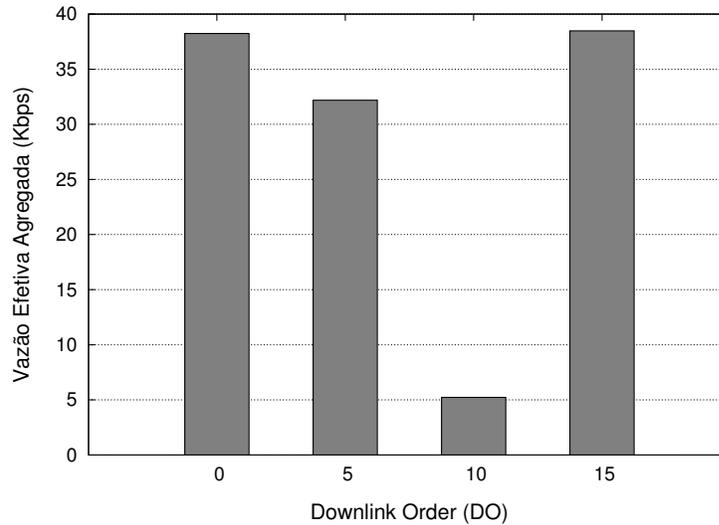
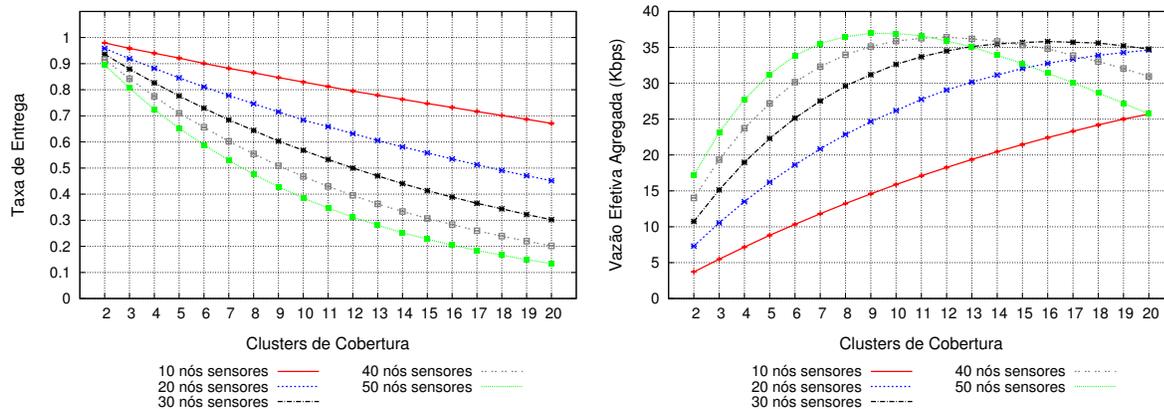


Figura 7.3: Vazão efetiva agregada do protocolo HMARS em função do *downlink order*.

## 7.4.2 Comparação dos protocolos

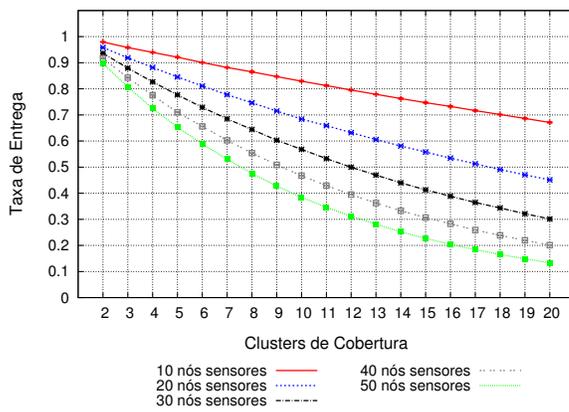
Foram realizadas simulações para avaliar o comportamento dos protocolos de controle de acesso ao meio propostos e compará-los a outros protocolos de controle de acesso ao meio, tais como o pure-ALOHA, o CSMA  $p$ -persistente e o S-MAC.

No pure-ALOHA, quando um nó sensor tem dados para transmitir ele o faz de imediato, ou seja, quando a camada MAC recebe dados da camada superior ela já os transmite. Já no CSMA  $p$ -persistente, quando um nó sensor tem dados para transmitir ele avalia a condição do canal sem fio antes da transmissão.

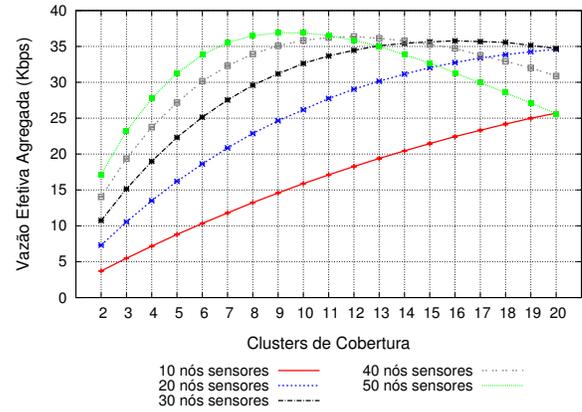


(a) Taxa de Entrega - pure-ALOHA

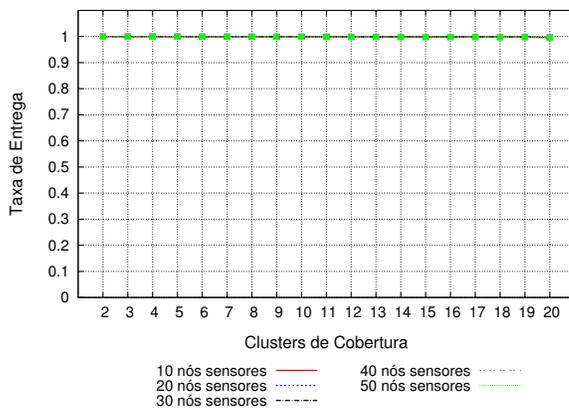
(b) Vazão efetiva agregada - pure-ALOHA



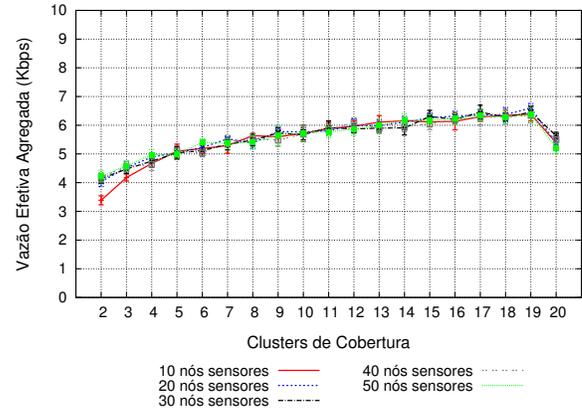
(c) Taxa de entrega - CSMA



(d) Vazão efetiva agregada - CSMA



(e) Taxa de Entrega - S-MAC



(f) Vazão efetiva agregada - S-MAC

Figura 7.4: Taxa de entrega e vazão efetiva agregada dos protocolos pure-ALOHA, CSMA e S-MAC em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede para carga de 0.5 quadro por segundo.

Analisando os gráficos mostrados na Figura 7.4, pode-se verificar que tanto o protocolo pure-ALOHA quanto o CSMA têm uma grande degradação com relação a taxa de entrega com o aumento da quantidade de *clusters* de cobertura na rede e quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura. Isto ocorre pois ambos protocolos não têm mecanismos para evitar as colisões inter-clusters, fazendo, assim, com que quanto maior a quantidade de *cluster* de cobertura disputando o canal óptico, maior será a quantidade de colisões e menor a taxa de entrega.

Por sua vez, como o protocolo S-MAC emprega o mecanismo de troca de quadros de controle RTS/CTS, mesmo aumentando a quantidade de *clusters* de cobertura na rede ou a quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura não ocorrem colisões. Isto mostra que a troca de quadros de controle RTS/CTS entre o nó sensor que deseja transmitir com os demais é eficiente, pois não permite que outros nós sensores interfiram com a

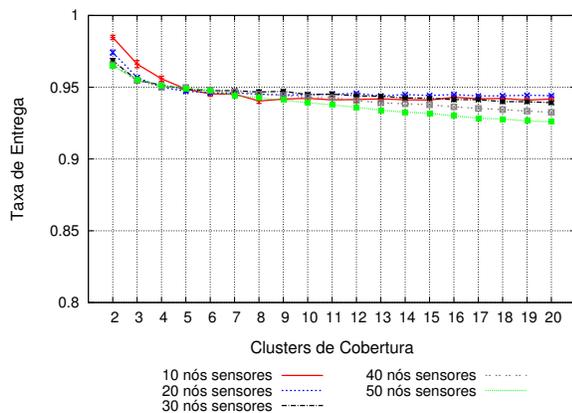
transmissão dos dados, como mostra a Figura 7.4(e).

Quando quadros de controle RTS/CTS são utilizados, o nó sensor reserva o canal durante o tempo necessário para a transmissão de seus dados, assim, evitando que outros nós sensores transmitam ao mesmo tempo. Desta maneira, não ocorrem colisões de quadros de dados no S-MAC, porém, muitos quadros de controle RTS colidem na estação base, pois todos os nós sensores devem enviar este quadro de controle quando desejam transmitir seus dados.

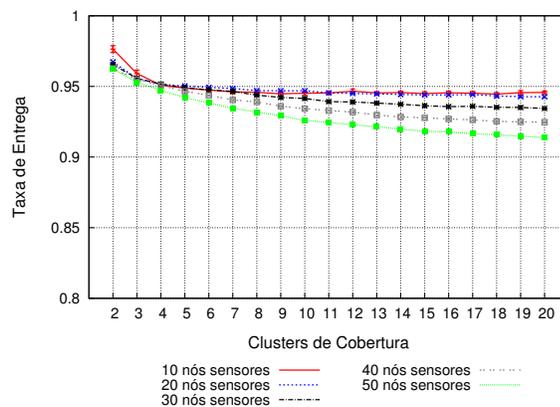
No entanto, esse mecanismo tem uma desvantagem que se traduz na baixa vazão efetiva agregada mostrada na Figura 7.4(f), pois uma grande parte das transmissões serão de pacotes de controle, gerando, assim, muito *overhead*.

Os gráficos da Figura 7.5 mostram a relação da taxa de entrega com a quantidade de *clusters* de cobertura na rede para diferentes quantidades de nós sensores e cargas para o protocolo HMARS. Estes gráficos servem para se ter uma ideia do comportamento do protocolo com relação as colisões que ocorrem na rede, ou seja, o quanto a rede degrada com o aumento da quantidade de nós sensores na rede em diferentes cargas.

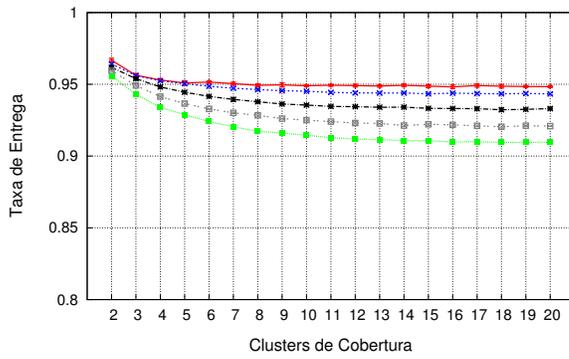
Analisando os gráficos, percebe-se que o aumento da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura implica na diminuição da taxa de entrega. Isto se deve ao uso do mecanismo CSMA/CA por parte do protocolo HMARS, pois quanto maior o número de nós sensores compartilhando o meio, maior será a quantidade de 'falsos positivos' gerados pelo monitoramento do meio e maior será a quantidade de colisões, que se agrava com o aumento da carga. Estes 'falsos positivos' nada mais são do que a notificação enviada pela operação de *CCA* (operação de monitoramento do canal) de que o canal está livre. No entanto, logo após esta notificação, o canal torna-se ocupado por uma transmissão oriunda de outro nó sensor do *cluster* de cobertura que também recebeu a notificação de que o canal está livre. Desta maneira, as duas transmissões colidem na estação base.



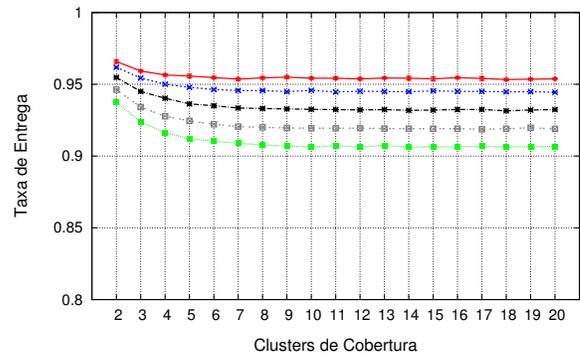
(a) 0.5 quadro/segundo



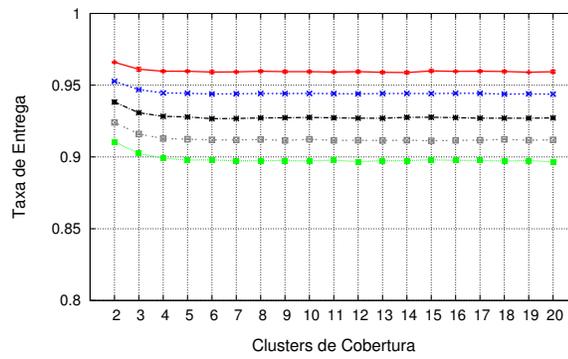
(b) 1 quadro/segundo



(c) 2 quadros/segundo

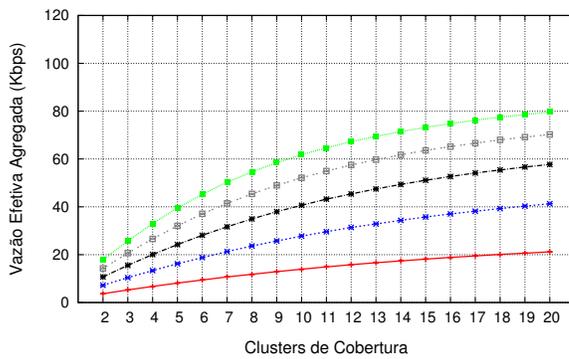


(d) 4 quadros/segundo

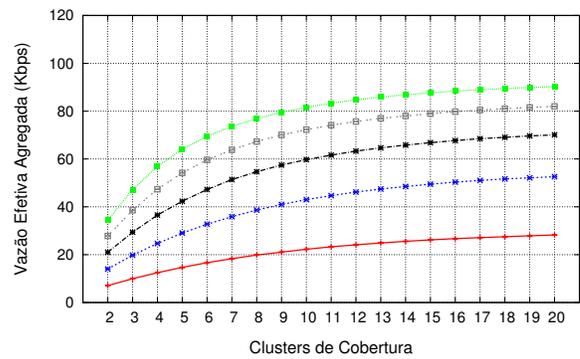


(e) 8 quadros/segundo

Figura 7.5: Taxa de entrega do protocolo HMARS em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede para diferentes cargas.



(a) 0.5 quadro/segundo



(b) 1 quadro/segundo

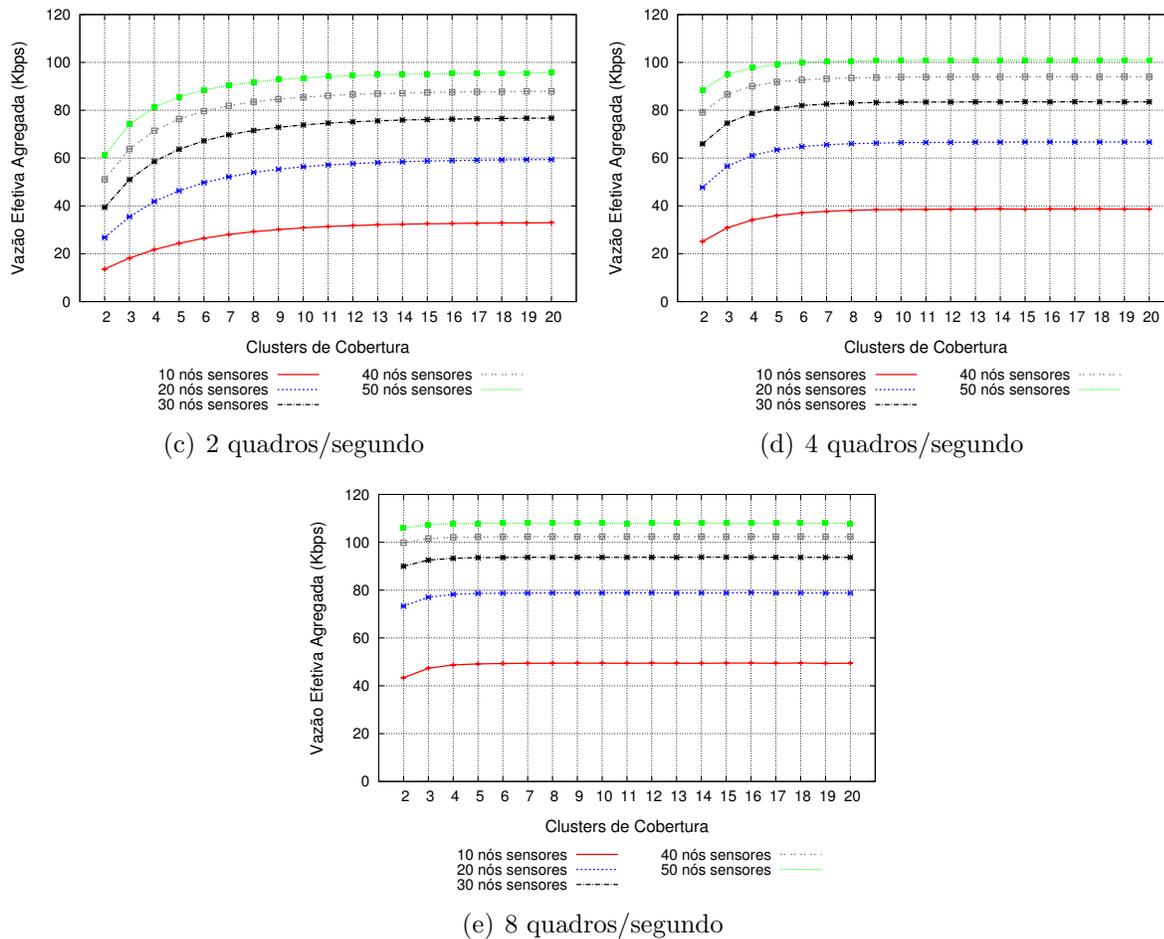


Figura 7.6: Vazão efetiva agregada do protocolo HMARS em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede para diferentes cargas.

Uma característica importante que se pode obter da análise dos gráficos em relação as colisões é que elas são todas intra-clusters, ou seja, não ocorre nenhuma colisão entre os *clusters* de cobertura na rede. Pode-se verificar isto pela análise de que a taxa de entrega permanece praticamente constante independentemente da quantidade de *clusters* de cobertura na rede, porém, varia quando a quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura aumenta ou diminui. Esta é uma das principais característica do protocolo HMARS, a anulação completa das colisões inter-clusters.

Através da análise dos gráficos da Figura 7.6, fica fácil perceber que para cargas pequenas os nós sensores permanecem mais tempo ociosos do que transmitindo em seus *subframes uplink*, pois a vazão efetiva agregada da rede aumenta com o aumento da quantidade de *clusters* de cobertura na rede, o que não ocorre com cargas maiores, que tendem a permanecer constantes.

Nota-se um aumento de aproximadamente 82% na vazão efetiva agregada com 10 nós

sensores nos *clusters* de cobertura e de aproximadamente 77% com 50 nós sensores nos *clusters* de cobertura para uma carga de 0.5 quadro por segundo. Para uma carga de 8 quadros por segundo, o aumento na vazão efetiva agregada com 10 nós sensores é de aproximadamente 12% e com 50 nós sensores é de aproximadamente 2%. Isto mostra que o protocolo HMARS tem a tendência de levar a vazão efetiva agregada a permanecer constante com o aumento da carga.

Outro ponto importante é que mesmo com a diminuição da taxa de entrega, mostrado na Figura 7.5, a vazão efetiva agregada aumenta, como mostra a Figura 7.6. Isto é estranho, pois a diminuição da taxa de entrega significa que mais quadros de dados são perdidos, então deveria haver uma diminuição na vazão efetiva agregada. No entanto, o que realmente ocorre é um aumento na quantidade de quadros de dados transmitidos pelos nós sensores, e, mesmo com o aumento das perdas dos quadros de dados, uma quantidade maior de quadros de dados será recebido pela estação base, elevando, assim, a vazão efetiva agregada.

O SPP-MAC apresenta uma característica única em relação a vazão efetiva agregada, como apresentado na Figura 7.7. É possível observar que a vazão efetiva agregada tende para um valor máximo, independente da carga experimentada pela rede, ou seja, para cada carga e quantidade de nós sensores na rede existe uma vazão efetiva agregada máxima.

Não foram mostrados resultados da taxa de entrega para o protocolo SPP-MAC pois não há colisões neste protocolo, dado que apenas um nó sensor tem permissão de transmitir dados por vez. Isto é uma das principais características dos protocolos baseados em seleção, pois os nós sensores somente podem enviar seus dados quando recebem um sinalização, e não há como duas sinalizações ocorrerem ao mesmo tempo.

É importante observar que, para o protocolo SPP-MAC, a partir do momento que o valor máximo da vazão efetiva agregada é alcançado a mesma começa a diminuir. Isto se deve pelo fato de que quando *clusters* de cobertura são adicionados à rede, o comprimento do enlace óptico aumenta acarretando o aumento do atraso de propagação, o que leva a um fenômeno chamado de Fenômeno do Crescimento Contínuo, que será avaliado na Seção 7.5.

Os gráficos da Figura 7.8 exibem as taxas de sinalização bem sucedida alcançada pela rede para cada uma das cargas utilizadas nas simulações. Esta taxa é a relação entre a quantidade de quadros de sinalizações enviados pela quantidade de quadros de dados recebidos pela estação base e serve para mostrar a eficiência da rede. Esta análise apresenta detalhes fundamentais para o entendimento do protocolo SPP-MAC. É possível notar que o aumento no tráfego, seja pelo aumento da quantidade de nós sensores na rede ou pelo aumento da carga, tende a levar a saturação da rede, ou seja, todas as sinalizações enviadas pela estação base são respondidas por quadros de dados. Isto mostra que a vazão efetiva agregada obtida pela rede depende diretamente da quantidade de quadros

de sinalizações que a estação base consegue transmitir.

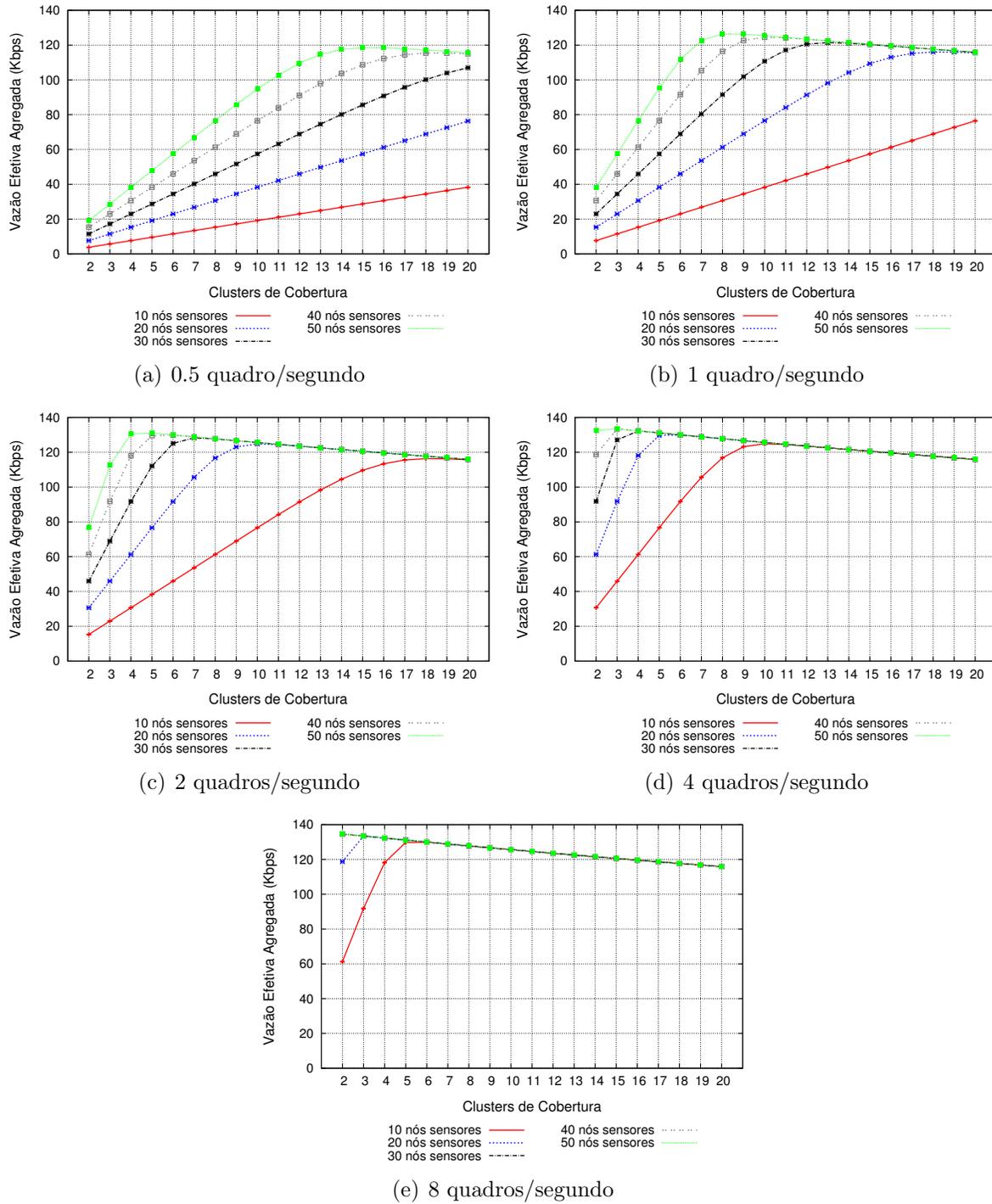


Figura 7.7: Vazão efetiva agregada do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de clusters de cobertura na rede para diferentes cargas.

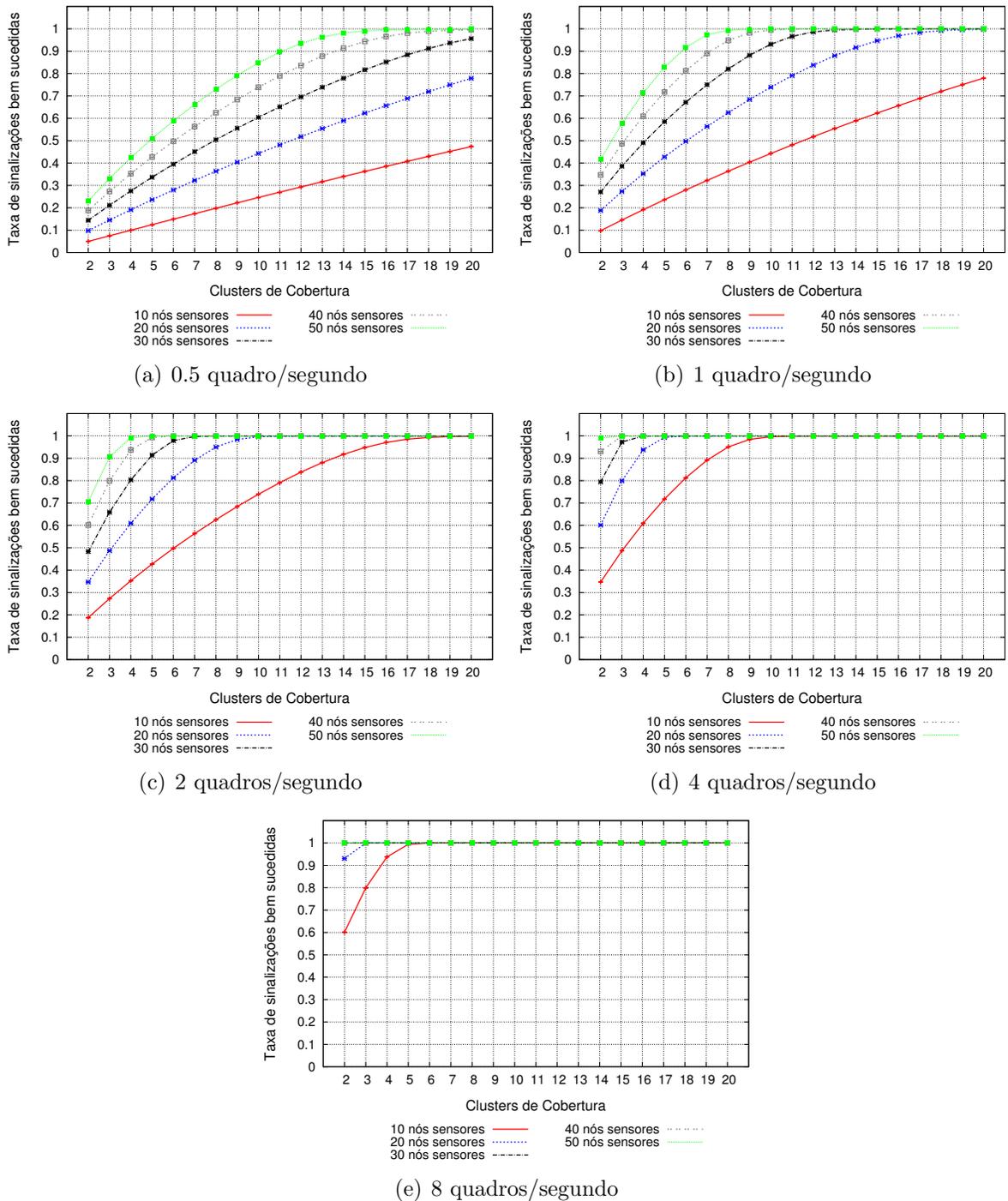


Figura 7.8: Taxa de sinalização bem sucedida do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede para diferentes cargas.

Ao se comparar os protocolos HMARS e SPP-MAC, percebe-se que a vazão efetiva agregada obtida pelo protocolo HMARS tende a aumentar com o aumento da carga e a

vazão efetiva agregada obtida pelo protocolo SPP-MAC tende a um valor máximo devido a taxa de sinalização da rede.

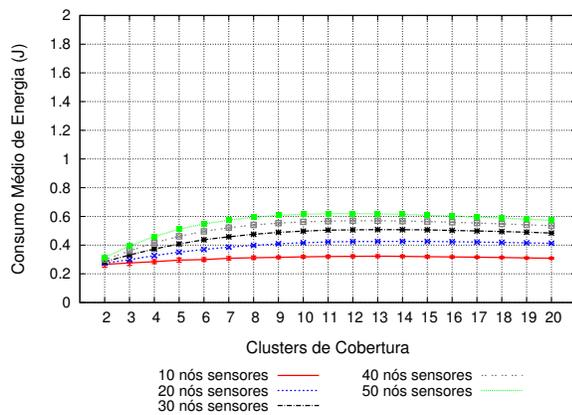
### 7.4.3 Consumo de energia

O transceptor de um nó sensor consome uma quantidade significativa de energia quando está num dos seus quatro principais estados: transmitindo, recebendo, ocioso ou dormindo. Por isto, um dos maiores desafios no projeto de redes de sensores sem fio é conseguir estender sua vida útil fazendo-a consumir a menor quantidade de energia possível para realizar suas atividades sem que suas funções sejam comprometidas.

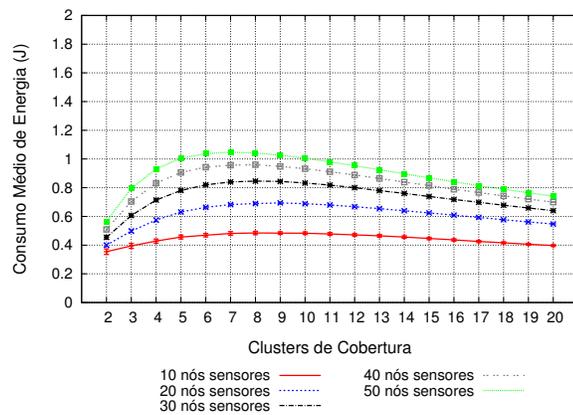
A principal função dos protocolos de controle de acesso ao meio para redes de sensores sem fio é coordenar quando e como os nós sensores acessam o meio de comunicação compartilhado tendo como um dos principais requisitos a eficiência energética.

Nesta seção, foram realizadas medições do consumo de energia dos protocolos HMARS e SPP-MAC, como mostram os gráficos das Figuras 7.9 e 7.10. Como esperado, os nós sensores utilizando o protocolo SPP-MAC tem seu consumo médio de energia maior do que os nós sensores utilizando o protocolo HMARS.

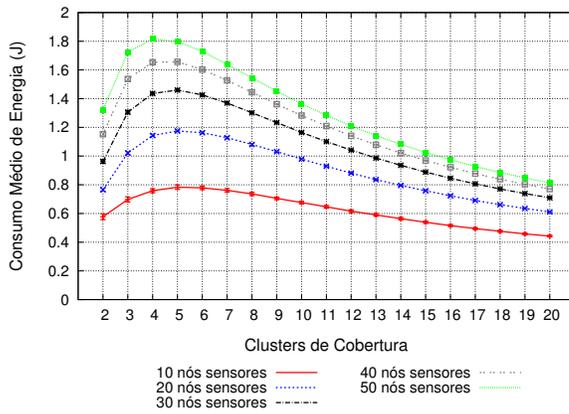
No protocolo HMARS, quando os nós sensores pertencentes a um *cluster* de cobertura da rede têm permissão para transmitirem o restante dos nós sensores da rede, ou seja, os nós sensores pertencentes aos outros *clusters* de cobertura devem estar com seus transceptores desativados, desta maneira, diminuindo o consumo de energia pela anulação do *idle listening*. Já no protocolo SPP-MAC, como os nós sensores ativam seus transceptores tão logo tenham dados para transmitirem (ou permanecem sempre com o transceptor ativo) para poderem receber os quadros de sinalização, eles permanecem com o transceptor ativo enquanto esperam o quadro de sinalização destinados a eles, desta maneira consumindo energia tanto com o *overhearing* quanto com o *idle listening*, pois eles receberão todos os quadros que cheguem até eles.



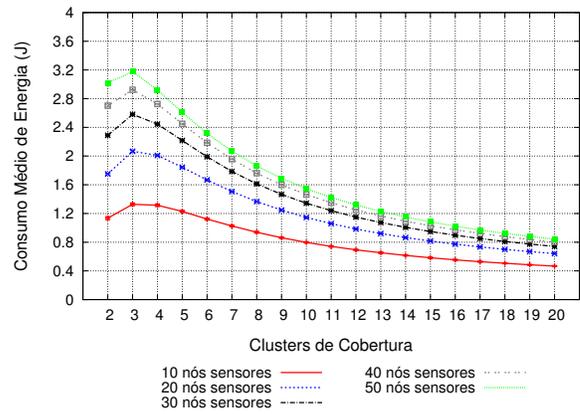
(a) 0.5 quadro/segundo



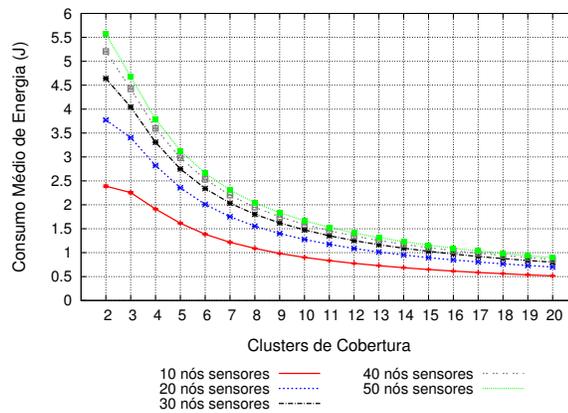
(b) 1 quadro/segundo



(c) 2 quadros/segundo

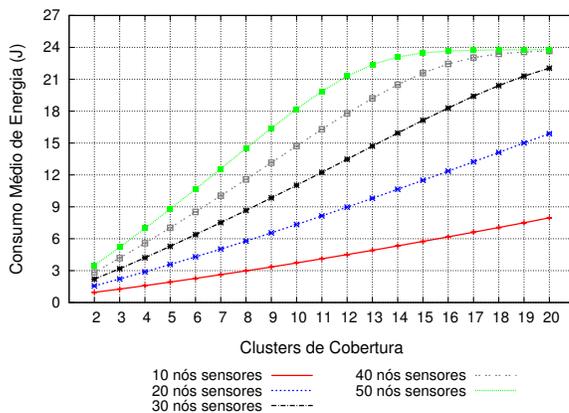


(d) 4 quadros/segundo

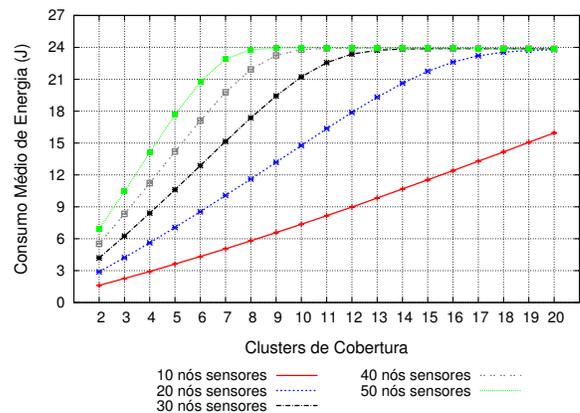


(e) 8 quadros/segundo

Figura 7.9: Consumo médio de energia do protocolo HMARS em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede para diferentes cargas.



(a) 0.5 quadro/segundo



(b) 1 quadro/segundo

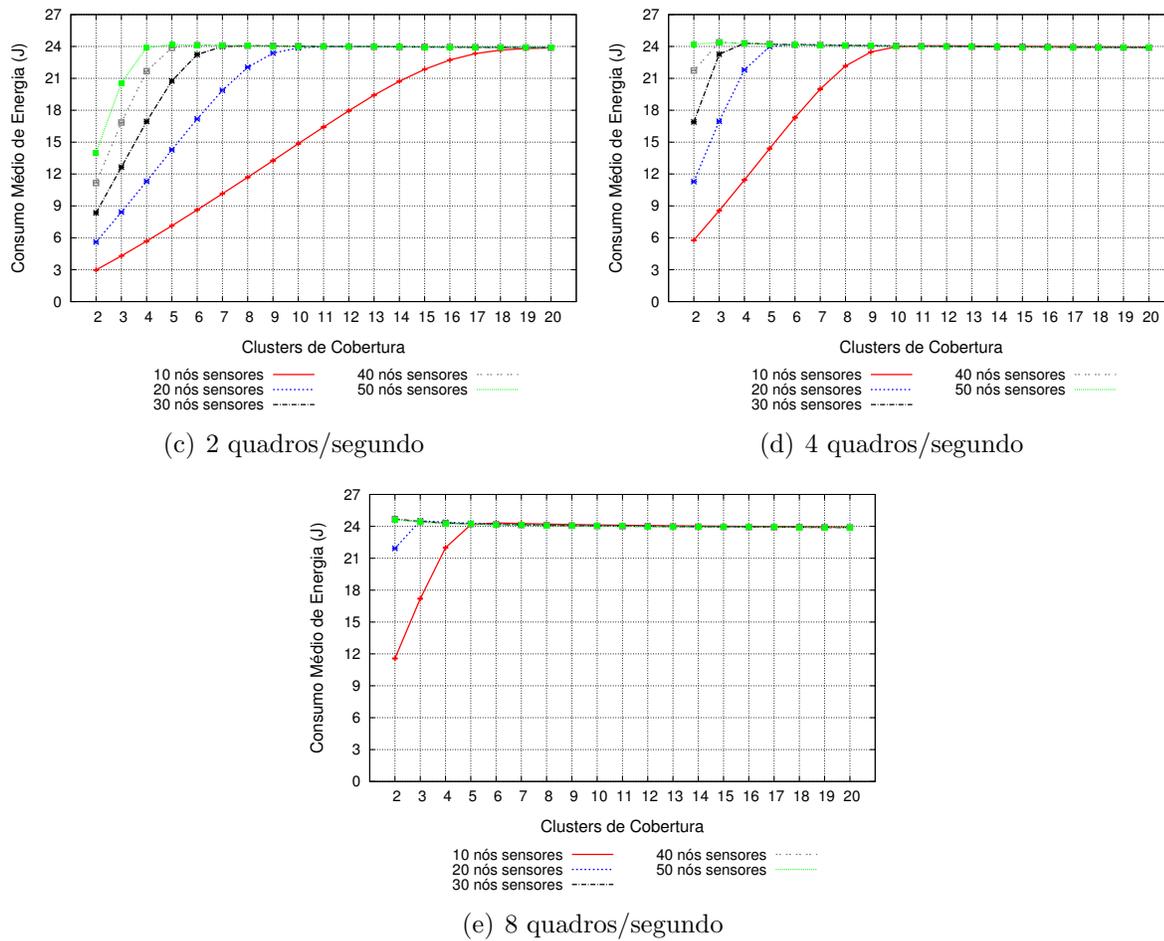


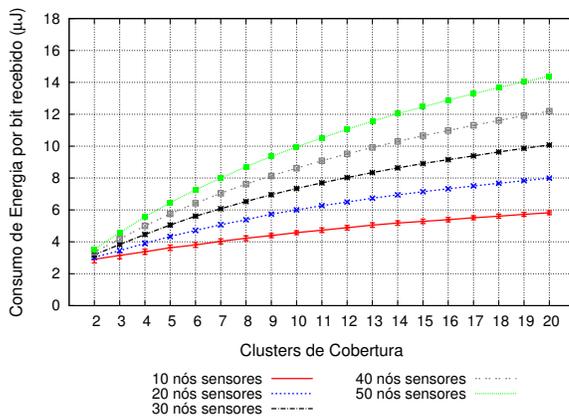
Figura 7.10: Consumo médio de energia do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede para diferentes cargas.

Analisando as Figuras 7.9 e 7.10, percebe-se que o consumo médio de energia diminui no protocolo HMARS e aumenta no protocolo SPP-MAC com o acréscimo de *clusters* de cobertura na rede. Isto acontece devido a natureza cíclica das sinalizações no SPP-MAC, ou seja, as sinalizações são realizadas em um ciclo acarretando que os nós sensores devem esperar receber a sinalização para poder transmitir seus dados, e quanto maior o número de nós sensores na rede maior será a espera pela próxima sinalização. Esta espera é prejudicial pois no protocolo SPP-MAC os nós sensores ativam seus transceptores tão logo quanto têm dados para serem transmitidos, pois precisam esperar o quadro de sinalização, permanecendo assim até transmitirem seus dados.

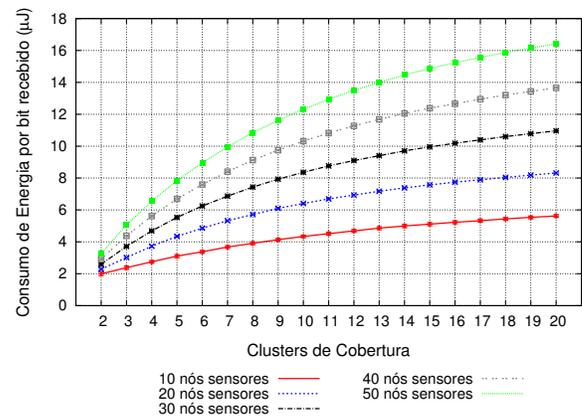
Observando os gráficos do consumo médio de energia na Figura 7.10 e da taxa de sinalização bem sucedida na Figura 7.8, encontra-se uma relação das curvas nos gráficos. O consumo médio de energia tende a uma constante do mesmo modo que a taxa de sinalização bem sucedida e o consumo máximo de energia ocorre exatamente quando

a taxa de sinalização bem sucedida atinge 100%, independente da quantidade de nós sensores na rede ou carga utilizada.

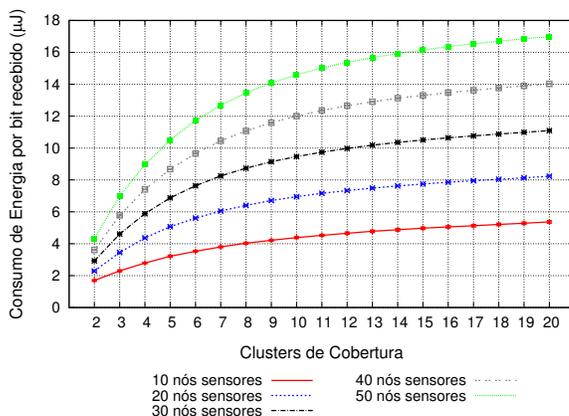
Não é possível comparar o consumo de energia dos dois protocolos apenas pelo consumo médio, pois existem diferenças no modo como cada um dos protocolos acessa o meio (existe um *overhead* no protocolo SPP-MAC devido a utilização de quadros de sinalização) e na quantidade de quadros de dados enviados entre os protocolos e sabendo que quanto maior for a quantidade de quadros enviados maior será o consumo de energia, sendo, assim, necessário a introdução de uma nova métrica para o consumo de energia. Para uma melhor comparação, a métrica de consumo de energia por *bit* efetivo recebido com sucesso pela estação base foi utilizada, ou seja, a relação do consumo agregado de energia com a quantidade total de *bits* efetivos (quantidade de *bits* do MAC *payload*) recebidos corretamente pela estação base.



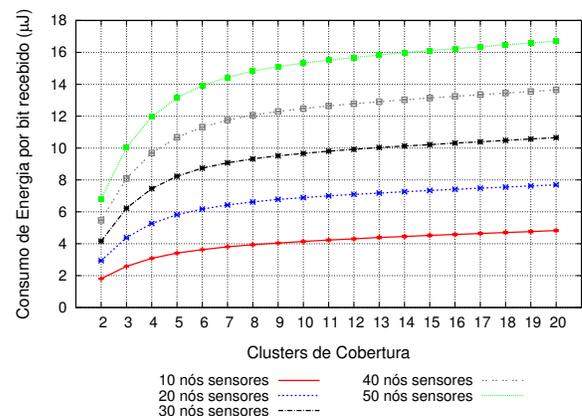
(a) 0.5 quadro/segundo



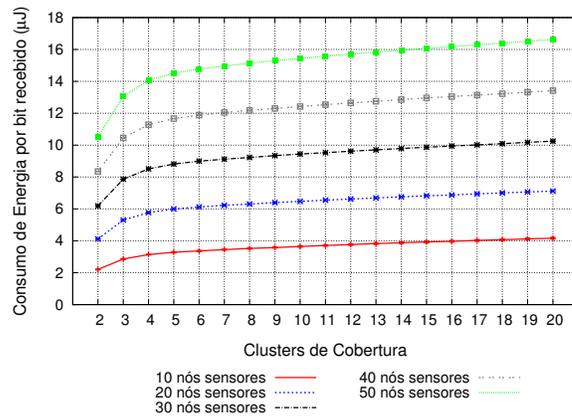
(b) 1 quadro/segundo



(c) 2 quadros/segundo

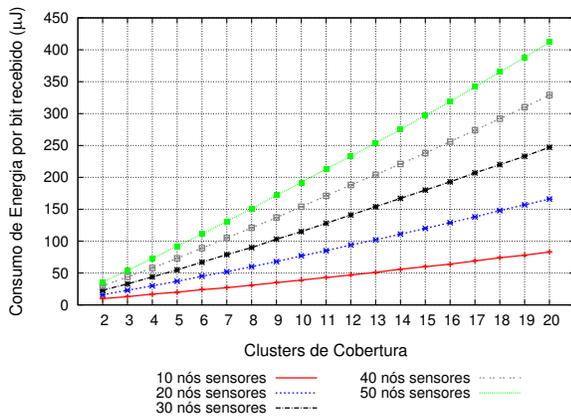


(d) 4 quadros/segundo

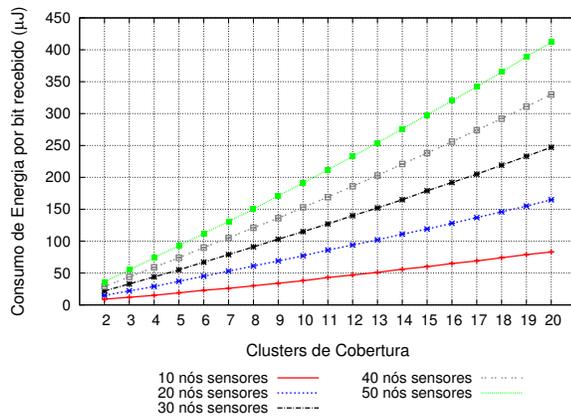


(e) 8 quadros/segundo

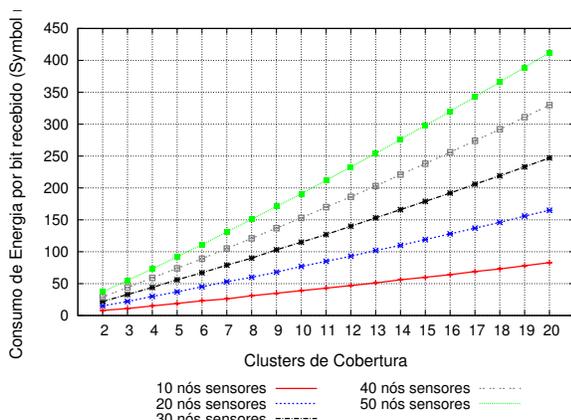
Figura 7.11: Consumo de energia por bit efetivo recebido base do protocolo HMARS em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede para diferentes cargas.



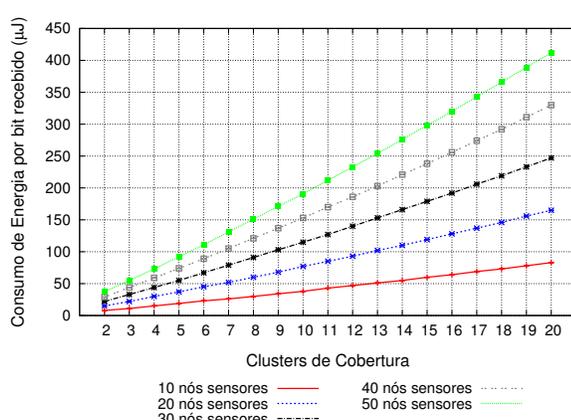
(a) 0.5 quadro/segundo



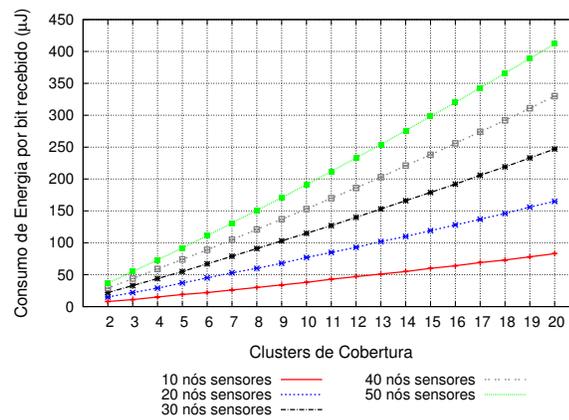
(b) 1 quadro/segundo



(c) 2 quadros/segundo



(d) 4 quadros/segundo



(e) 8 quadros/segundo

Figura 7.12: Consumo de energia por bit efetivo recebido do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede para diferentes cargas.

Analisando os gráficos da Figura 7.11, conclui-se que tanto o aumento na quantidade de *clusters* de cobertura na rede quanto o aumento da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura levam a um crescimento na energia utilizada para a transmissão de um *bit* com sucesso no protocolo HMARS. Nota-se, também, que o consumo de energia por *bit* efetivo recebido tende a uma constante, do mesmo modo que a vazão efetiva agregada do protocolo HMARS, como mostra a Figura 7.6. Isto já era de se esperar, pois como a vazão efetiva agregada aumenta com o aumento da quantidade de nós sensores na rede, o consumo também deverá aumentar, pois mais dados serão enviados pelos nós sensores.

Comparando-se os gráficos das Figuras 7.11 e 7.12, nota-se que o protocolo SPP-MAC consome mais energia que o protocolo SPP-MAC para transmitir um bit efetivo com sucesso. Isto se deve ao desperdício de energia dos nós sensores utilizando o protocolo SPP-MAC por permanecerem com o transceptor ativo enquanto esperam o quadro de sinalização, acarretando *idle listening* e *overhearing*. Por este motivo, o consumo de energia por *bit* efetivo recebido aumenta com o aumento da quantidade de nós sensores na rede.

## 7.5 Desempenho da rede em função do comprimento do enlace óptico

Nesta simulação, verifica-se as limitações impostas pelos protocolos de controle de acesso ao meio com relação ao comprimento do enlace óptico (fibras ópticas) que conecta a estação base aos *clusters* de cobertura, além de analisar o fenômeno do Crescimento

Contínuo experimentado pelo protocolo SPP-MAC.

Como esta simulação apenas objetiva verificar as limitações que os protocolos MAC impõe quando o comprimento do enlace óptico entre a Estação Base de Controle e a Unidade de Antena Remota aumenta, definiu-se uma topologia com apenas dois dispositivos na qual uma Estação Base de Controle está conectada a uma única Unidade de Antena Remota através de um enlace óptico e serve a um único nó sensor colocado aleatoriamente no raio de 30 metros da Unidade de Antena Remota.

Os protocolos utilizados nesta simulação são os S-MAC, SPP-MAC e HMARS. O protocolo S-MAC foi escolhido para se comparar com um protocolo distribuído que utiliza quadros de controle e temporizadores de recepção.

O tamanho do MAC *payload* dos quadros de dados foi fixado em 48 *bytes* para todos os protocolos, e a carga de geração de tráfego foi escolhida de maneira que o tempo entre gerações (tempo entre uma geração e a posterior) não seja maior que o atraso médio de propagação no enlace óptico.

Por ser um ambiente controlado onde não existem interferências de transmissões concorrentes, esta topologia apenas avalia o comportamento dos protocolos em função do comprimento do enlace óptico entre a Estação Base de Controle e a Unidade de Antena Remota no *cluster* de cobertura.

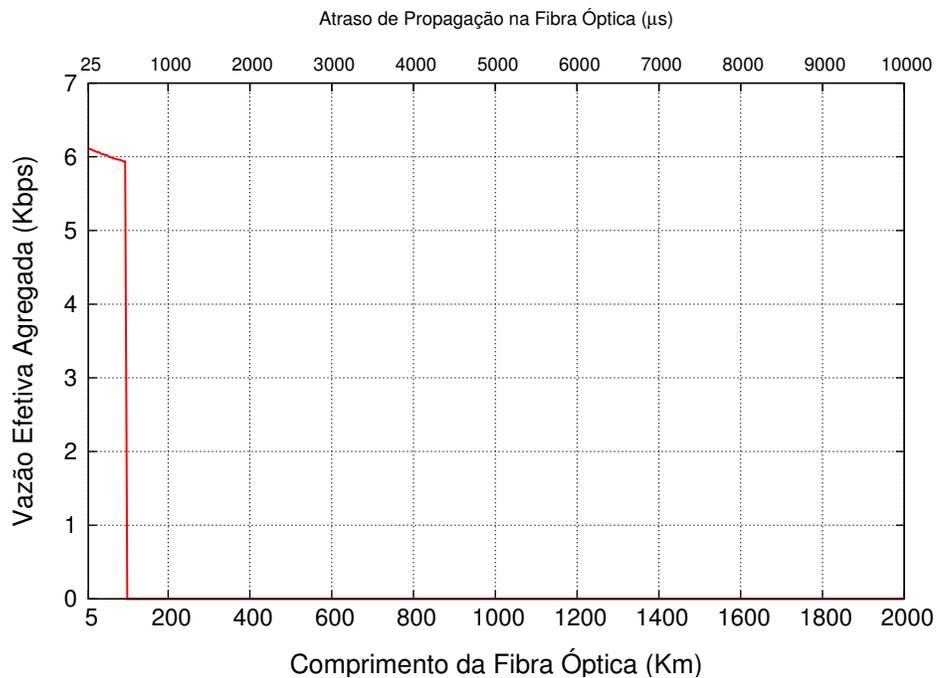


Figura 7.13: Vazão efetiva agregada do protocolo S-MAC em função do comprimento do enlace de fibra óptica.

Como o desempenho do protocolo HMARS varia pouco para valores do *uplink order*, apenas os dados referente ao *uplink order* igual a 4 é mostrado. Nesta avaliação, espera-se que com o aumento do comprimento do enlace óptico haja uma redução na vazão efetiva agregada motivado pelo aumento do atraso de propagação sofrido pelas transmissões.

Pode-se observar na Figura 7.13, que o protocolo S-MAC tem limitações em relação ao comprimento máximo do enlace óptico que conecta a estação base aos *clusters* de cobertura. Esta limitação, de aproximadamente 100 Km, deve-se ao temporizador fixo utilizado pelo protocolo S-MAC para o quadro de controle RTS e para o quadro de confirmação. Sempre que um quadro RTS é transmitido por um nó da rede, um temporizador é iniciado para esperar o quadro CTS. Se o quadro CTS não for recebido dentro deste intervalo de tempo, um novo quadro RTS é transmitido, assim, se o atraso entre o nó sensor e a estação base for igual ou maior do que o tempo de *timeout*, nenhum quadro de dados será transmitido.

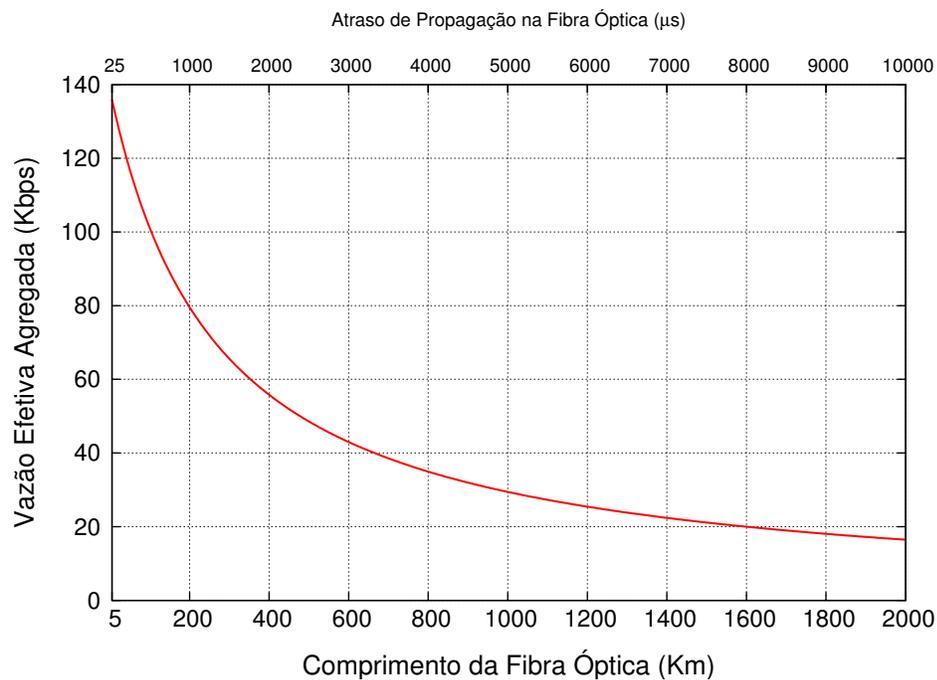


Figura 7.14: Vazão efetiva agregada do protocolo SPP-MAC em função do comprimento do enlace de fibra óptica.

Analisando-se as Figuras 7.14 e 7.16, é possível observar que os protocolos HMARS e SPP-MAC não sofrem essa limitação, pois não trabalham com temporizadores fixos para envio de seus quadros.

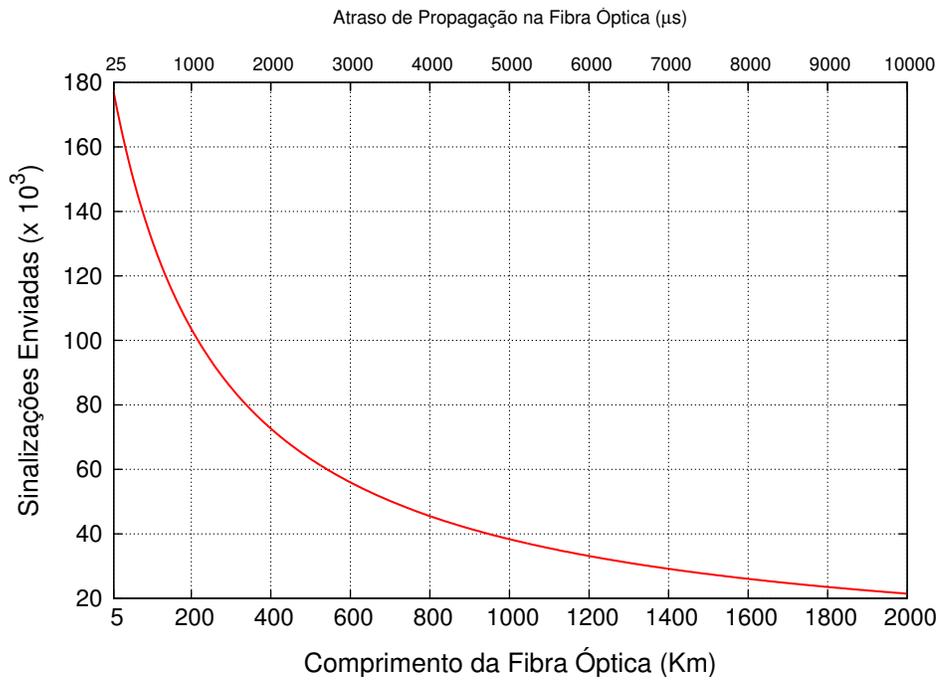


Figura 7.15: Quantidade de quadros de sinalização enviados no protocolo SPP-MAC em função do comprimento do enlace de fibra óptica.

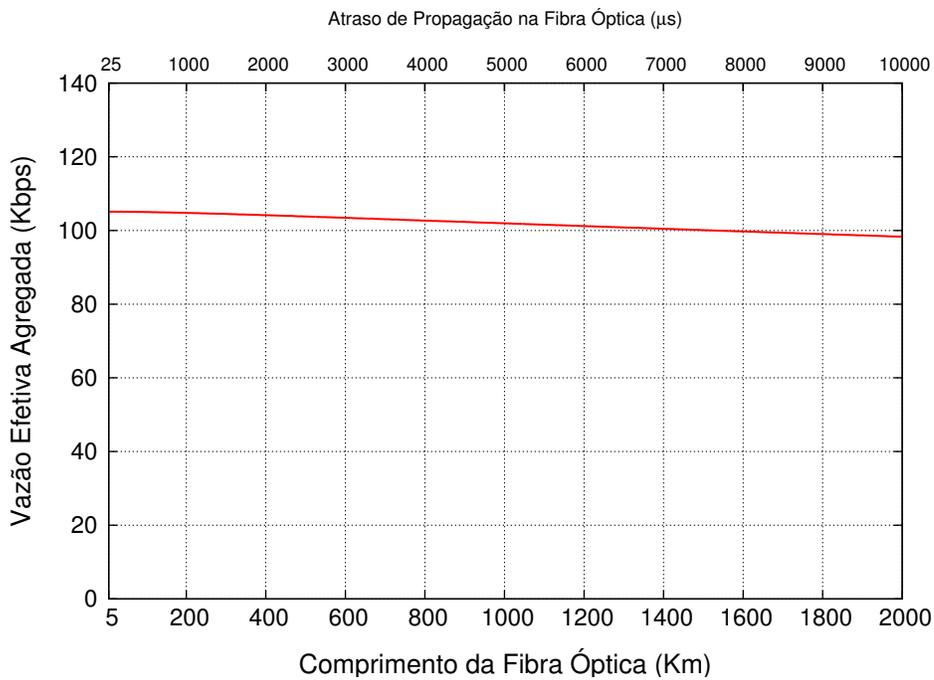


Figura 7.16: Vazão efetiva agregada do protocolo HMARS com *uplink order* = 4 em função do comprimento do enlace de fibra óptica.

Ao se observar o comportamento dos protocolos HMARS e SPP-MAC em relação a vazão efetiva agregada nas Figuras 7.14 e 7.16, nota-se que um enlace óptico de 5 Km de comprimento faz a vazão efetiva agregada do protocolo SPP-MAC ser aproximadamente 22% maior que a vazão efetiva agregada do protocolo HMARS para este mesmo comprimento, e com 2000 Km de comprimento a vazão efetiva agregada do protocolo SPP-MAC é aproximadamente 84% menor que a vazão efetiva agregada do protocolo HMARS para este mesmo comprimento, ou seja, o protocolo SPP-MAC experimenta uma maior degradação com o aumento do comprimento do enlace óptico em comparação ao protocolo HMARS, chegando a aproximadamente 87% enquanto o protocolo HMARS degrada aproximadamente 2%.

Quando se aumenta o comprimento do enlace óptico entre a estação base e o *cluster* de cobertura, ocorre, obviamente, um aumento no atraso de propagação experimentado pelas transmissões devido a uma maior distância que as informações terão de percorrer. Espera-se, portanto, que ocorra uma diminuição na vazão efetiva agregada, porém, como no protocolo SPP-MAC existe a necessidade do envio de quadros de sinalização, o aumento do atraso de propagação será sentido mais severamente.

Avaliam-se, para melhor compreender o motivo da diminuição da vazão efetiva agregada no protocolo SPP-MAC quando o comprimento do enlace óptico aumenta, as Figuras 7.14 e 7.15. Nelas é possível observar que a diminuição da vazão efetiva agregada no protocolo SPP-MAC se deve somente à diminuição no envio das sinalizações e isto ocorre devido ao fato de que o protocolo SPP-MAC é baseado em sinalização.

Como no protocolo SPP-MAC os nós sensores devem esperar receber a sinalização para poder transmitir, e apenas uma sinalização é enviada por vez (outra sinalização é enviada somente quando o quadro de dados é recebido pela estação base ou quando o tempo de espera pelo quadro de dados termina), o atraso experimentado pelas transmissões torna-se um problema pois uma quantidade menor de quadros de sinalização será enviada por período de tempo com o aumento do atraso.

Pode-se observar que o protocolo SPP-MAC sofre uma degradação de aproximadamente 87% na quantidade de quadros de sinalização enviados, ou seja, aproximadamente a mesma degradação sofrida pela vazão efetiva agregada. Isto mostra a relação direta entre a quantidade de quadros de sinalização enviados e a vazão efetiva agregada obtida pelo protocolo SPP-MAC.

Já no protocolo HMARS, para os nós sensores poderem transmitir apenas precisam esperar estarem dentro de seus *subframe uplink*, não havendo a necessidade de esperar que a estação base receba os dados para outros nós transmitirem como ocorre no protocolo SPP-MAC. Desta maneira, o protocolo HMARS não experimenta grande degradação com o aumento do atraso de propagação no enlace óptico já que as transmissões podem ser seguidas.

## 7.6 Desempenho da rede em função das diferentes cargas de tráfego

Um aspecto importante das redes de sensores é a diferença entre os as gerações de tráfegos dos diversos nós sensores na rede, pois alguns nós sensores desempenham papéis de maior importância do que outros, assim tendo cargas maiores e a necessidade de maiores oportunidades de transmissão.

O objetivo desta simulação é avaliar o comportamento dos protocolos HMARS e SPP-MAC quando diferentes cargas são utilizadas na rede, ou seja, os nós sensores têm cargas variadas, uma maiores e outras menores. Foi avaliado o comportamento do protocolo SPP-MAC quando se utiliza e quando não se utiliza o mecanismo de priorização com o intuito de verificar o quanto o mecanismo consegue melhorar a qualidade do sistema.

A topologia definida para esta simulação conta com uma Estação Base de Controle e diversos *clusters* de cobertura, variando de 2 até 20. Cada *cluster* de cobertura foi colocado a uma distância de 5 Km um do outro e a quantidade de nós sensores em cada *cluster* de cobertura variou de 10 em 10, no intervalo de 10 até 50.

Os fluxos de dados são gerados nos nós sensores da rede tendo como destino a estação base. Para cada nó sensor foi alocado uma carga aleatoriamente entre 0.5, 1, 2, 4, 8 ou 16 quadros por segundo com um MAC *payload* de 48 *bytes*.

Quando se utiliza o mecanismo de priorização no SPP-MAC, é necessário fixar os níveis de prioridade para cada nó sensor na estação base, para assim poder ser construído o escalonamento dos nós sensores. Para tal, cada tráfego recebeu um nível de prioridade diferente, como pode ser visto na Tabela 7.4.

Tabela 7.4: Prioridade para o tráfego do protocolo SPP-MAC

Tráfego	Nível de prioridade
0.5 quadro por segundo	6
1 quadro por segundo	5
2 quadros por segundo	4
4 quadros por segundo	3
8 quadros por segundo	2
16 quadros por segundo	1

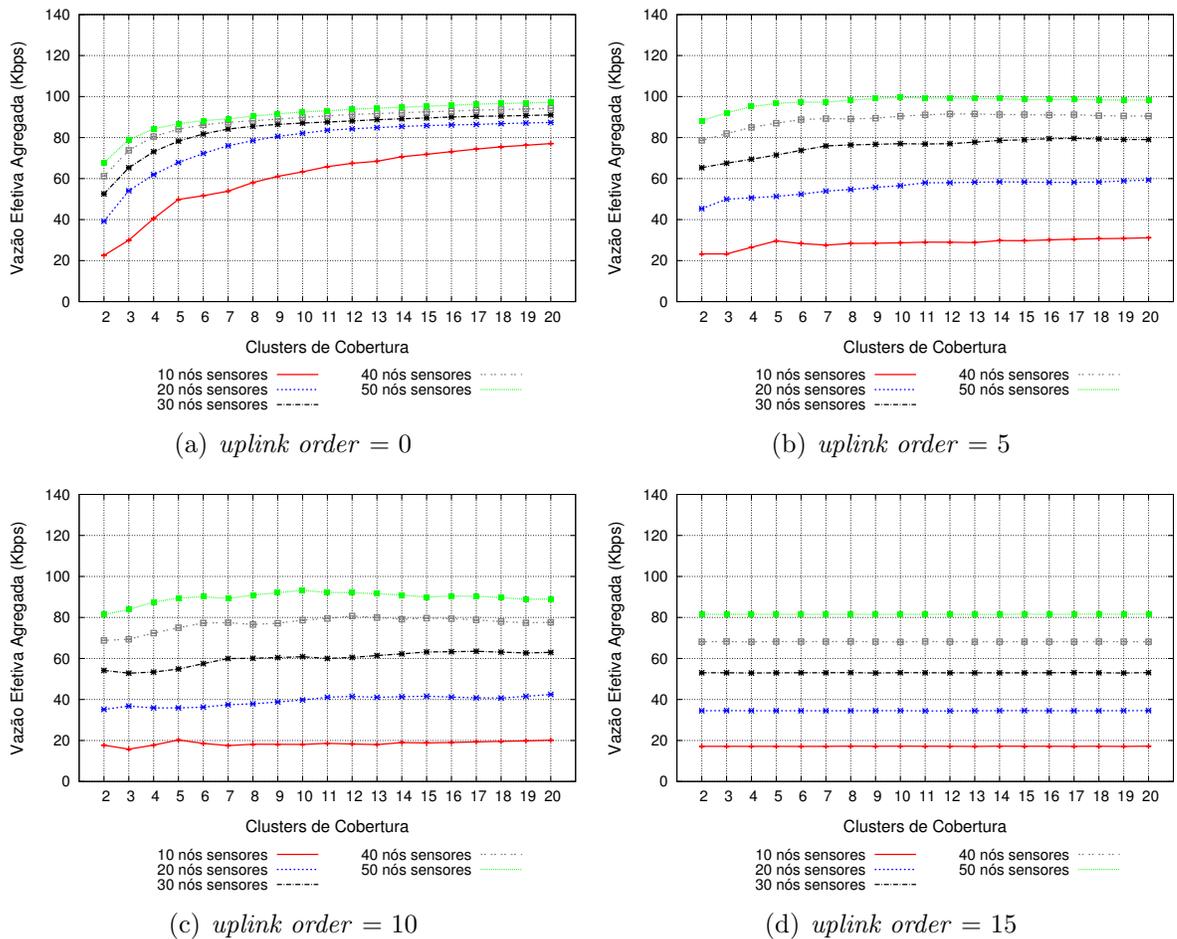


Figura 7.17: Vazão efetiva agregada do protocolo HMARS em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede para diferentes valores do *uplink order*.

Os gráficos da Figura 7.17 apresentam a vazão efetiva agregada para diferentes quantidades de nós sensores para o protocolo HMARS utilizando diferentes valores para o *uplink order*. É possível verificar que o desempenho da vazão efetiva agregada é diferente para cada valor do *uplink order* e que quanto menor o *uplink order*, mais próximas e maiores são as vazões para as diferentes quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura. Como o protocolo HMARS não tem nenhum mecanismo que dê maiores oportunidades de transmissão aos nós sensores com maiores tráfegos, a vazão efetiva agregada tem o seu máximo em aproximadamente 100 Kbps.

Percebe-se que, como mostrado na Seção 7.4.1, a vazão efetiva agregada obtida pela rede é maior para valores de *uplink order* menores. Para *uplink order* igual a 0 as vazões efetivas agregadas para as diferentes quantidade de nós sensores ficam próximas com o aumento da quantidade de *clusters* de cobertura na rede.

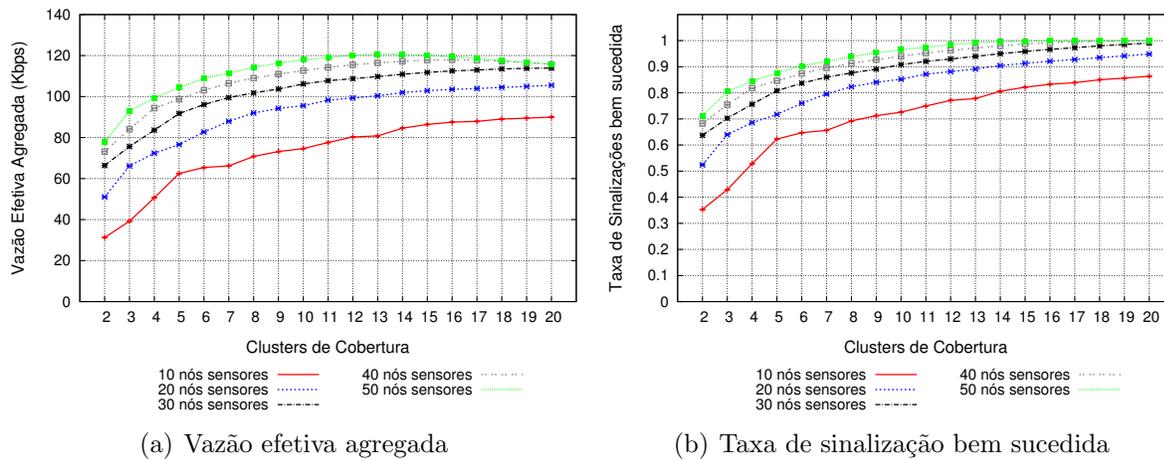


Figura 7.18: Vazão efetiva agregada e taxa de sinalização bem sucedida do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede sem a utilização do mecanismo de priorização.

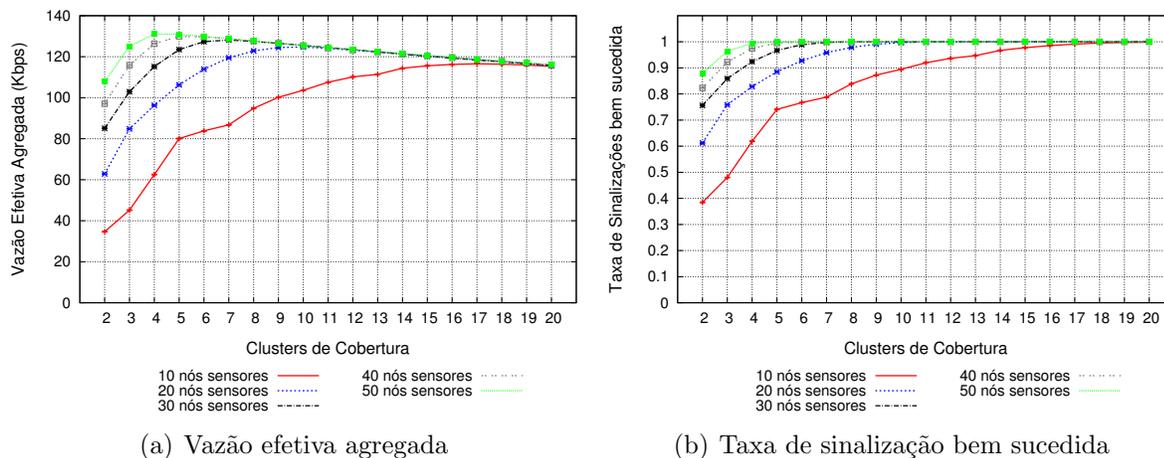


Figura 7.19: Vazão efetiva agregada e taxa de sinalização bem sucedida do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede utilizando o mecanismo de priorização.

Nota-se que as maiores vazões agregadas são obtidas quando o valor do *uplink order* é igual a 0 e não ultrapassa 100 Kbps. Isto é esperado pois o protocolo HMARS não faz diferença entre os nós sensores da rede, dando, assim, a mesma oportunidade de transmissão para todos os nós sensores da rede.

Como esperado, o uso do mecanismo de priorização pelo protocolo SPP-MAC melhora a vazão efetiva agregada, como pode ser observado nas Figuras 7.18(a) e 7.19(a). Isto acontece porque quando são atribuídos diferentes níveis de prioridade para as diferentes

cargas de tráfego da rede (quanto maior é a carga de tráfego gerada maior é o nível de prioridade) uma quantidade maior de quadros de sinalização serão enviados para os nós sensores com as maiores cargas e, conseqüentemente, a quantidade de mensagens de sinalização respondidas aumenta, como mostra as Figuras 7.18(b) e 7.19(b), acarretando no aumento da quantidade de quadros de dados transmitidos pelos nós sensores, e, assim, aumentando a vazão efetiva agregada.

Observa-se nas Figuras 7.18(b) e 7.19(b) que quando o mecanismo de priorização é utilizado, a rede alcança a taxa de sinalização bem sucedida máxima, independentemente da quantidade de nós sensores em nos *clusters* de cobertura, mais rapidamente do que quando o mecanismo não é utilizado. Para 10 nós sensores por *cluster* de cobertura, a vazão efetiva agregada máxima obtida com a utilização do mecanismo, mostrado na Figura 7.19(a), é aproximadamente 30% maior do que a vazão efetiva agregada máxima obtida sem a utilização do mecanismo, mostrado na Figura 7.18(a), enquanto para 50 nós sensores a vazão efetiva agregada aumenta aproximadamente 8.5%.

Essa análise é importante para mostrar que o mecanismo de priorização desempenha um papel muito importante quando empregado em uma rede na qual os nós sensores tem diferentes cargas ou necessitam de diferentes oportunidades de transmissão. Uma desvantagem do mecanismo de priorização é o aumento do tempo de espera entre as sinalizações dos nós sensores com os menores níveis de prioridade, por isto, é necessário fazer um estudo para verificar quantos níveis de prioridade são necessários na rede.

## 7.7 Desempenho da rede em função do comprimento do MSDU

O objetivo desta simulação é avaliar o comportamento dos protocolos HMARS e SPP-MAC quando diferentes comprimento do MSDU são utilizados, ou seja, diferentes tamanhos para o MAC *payload* dos quadros de dados. Foi definida uma topologia contendo uma Estação Base de Controle e 20 *clusters* de cobertura, no qual cada *cluster* de cobertura está a uma distância de 5 Km um do outro com uma quantidade de nós sensores que variou de 10 em 10, no intervalo de 10 até 50. A carga utilizada foi de 2 quadros por segundo.

As Tabelas 7.5, 7.6 e 7.7 apresentam as métricas, obtidas para 8 comprimentos do MSDU (12, 24, 36, 48, 60, 72, 84 e 96 *bytes*) utilizando os protocolos HMARS e SPP-MAC. Nas Tabelas 7.5 e 7.7, apenas foram mostrados os resultados para a quantidade de 10 nós sensores por *cluster* de cobertura.

Analisando-se a Tabela 7.5, observa-se que a taxa de entrega aumenta com o aumento do comprimento do MSDU, mostrando que as colisões diminuem quando se aumenta o

comprimento do MSDU. Isto pode ser facilmente verificado através da análise da Tabela 7.6, que mostra o comportamento da taxa de entrega do protocolo HMARS para diferentes quantidades de nós sensores nos *clusters* de cobertura. Pode-se verificar que o comportamento do protocolo HMARS é diferente com o aumento do comprimento do MSDU, pois quadros de dados pequenos fazem o CSMA/CA do protocolo HMARS gerar vários falsos positivos, acarretando colisões.

Analisando-se as Tabelas 7.5 e 7.7, nota-se um aumento da vazão efetiva agregada com o aumento do comprimento do MSDU. Mesmo acarretando a queda da quantidade de quadros de dados transmitidos pelos nós sensores, já que é necessário um tempo maior para transmitir quadros de dados maiores, o aumento do comprimento do MSDU aumenta a vazão efetiva agregada, pois a diminuição da quantidade de quadros de dados enviados é proporcionalmente menor do que o aumento do comprimento do MSDU, e, por isto, a vazão efetiva agregada aumenta ao invés de diminuir.

Pode-se observar que o aumento do comprimento do MSDU aumenta o consumo de energia para o protocolo HMARS, no entanto, para o protocolo SPP-MAC o aumento do comprimento do MSDU acarreta o aumento do consumo de energia até um determinado valor, quando este consumo começa a diminuir. Isto acontece porque quando se aumenta o tamanho do MSDU, diminui-se a quantidade de quadros enviados e, o mais importante, diminui-se o tempo que o nó sensor gasta no estado *idle listening*, consumindo, assim, menos energia.

Tabela 7.5: Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, consumo médio de energia e consumo de energia por bit recebido para 8 tamanhos de MSDU para o protocolo HMARS.

MSDU (bytes)	Taxa de Entrega (%)	Vazão Efetiva Agregada (Kbps)	Consumo Médio de Energia (J)	Consumo de Energia por bit ( $\mu$ J)
12	93.085	8.345	0.297	14.274
24	94.147	16.715	0.353	8.464
36	94.553	24.948	0.395	6.334
48	94.840	32.966	0.442	5.368
60	95.109	40.837	0.479	4.693
72	95.378	48.361	0.522	4.324
84	95.372	55.451	0.555	4.007
96	95.445	62.091	0.590	3.804

Tabela 7.6: Taxa de entrega para 8 tamanhos de MSDU em função da quantidade de nós sensores para o protocolo HMARS.

MSDU (bytes)	10	20	30	40	50
12	93.085	91.744	90.627	89.502	88.351
24	94.147	93.558	92.651	91.571	90.483
36	94.553	93.968	92.981	91.816	90.780
48	94.840	94.334	93.309	92.085	90.959
60	95.109	94.459	93.325	92.290	91.143
72	95.378	94.669	93.560	92.441	91.235
84	95.372	94.703	93.556	92.421	91.338
96	95.445	94.639	93.447	92.269	91.092

Tabela 7.7: Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, consumo médio de energia e consumo de energia por bit recebido para 8 tamanhos de MSDU para o protocolo SPP-MAC.

MSDU (bytes)	Taxa de Entrega (%)	Vazão Efetiva Agregada (Kbps)	Consumo Médio de Energia (J)	Consumo de Energia por bit ( $\mu$ J)
12	100.000	37.016	21.553	232.913
24	100.000	70.658	22.976	130.071
36	100.000	96.985	23.728	97.863
48	100.000	115.629	23.857	82.530
60	100.000	129.741	23.809	73.407
72	100.000	141.090	23.746	67.323
84	100.000	150.467	23.690	62.978
96	100.000	158.347	23.642	59.723

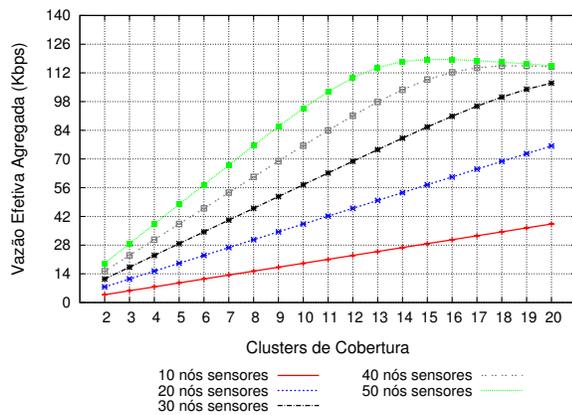
Pode-se verificar que o aumento do tamanho do MSDU diminui o consumo de energia por *bit* recebido, no entanto, o consumo de energia do protocolo SPP-MAC por *bit* recebido é muito maior que o do protocolo HMARS. Para um MSDU de 12 *bytes*, o consumo do protocolo SPP-MAC é aproximadamente 16 vezes maior que o consumo para o mesmo comprimento do MSDU do protocolo HMARS, e para um comprimento do MSDU de 96 *bytes*, o consumo do protocolo SPP-MAC é aproximadamente 19 vezes maior que o consumo para o mesmo comprimento do MSDU do protocolo HMARS.

## 7.8 Desempenho do protocolo SPP-MAC em função da utilização dos quadros de confirmação

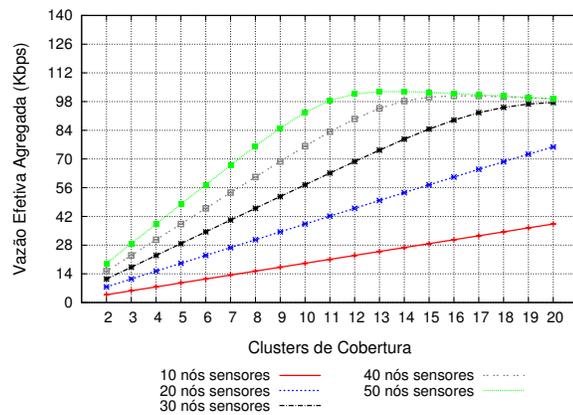
Para avaliar o comportamento do protocolo SPP-MAC quando a confirmação da recepção é utilizada, foi definida uma topologia contendo uma Estação Base de Controle e diversos *clusters* de cobertura, variando de 2 até 20. Cada *cluster* de cobertura foi colocado a uma distância de 5 Km um do outro e a quantidade de nós sensores em cada *cluster* de cobertura variou de 10 em 10, no intervalo de 10 até 50.

Os fluxos de dados são gerados nos nós sensores da rede, tendo como destino a estação base. As cargas de tráfego de quadros de dados utilizadas foram 0.5, 1, 2, 4 e 8 quadros por segundo e o MAC *payload* foi fixado em 48 *bytes*.

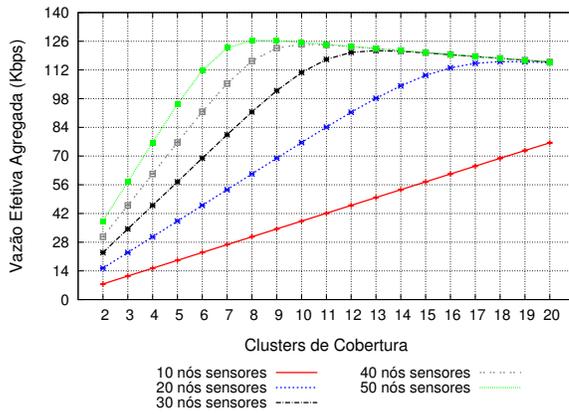
Como o protocolo HMARS não utiliza quadros de confirmação, ele não foi utilizado nestas simulações.



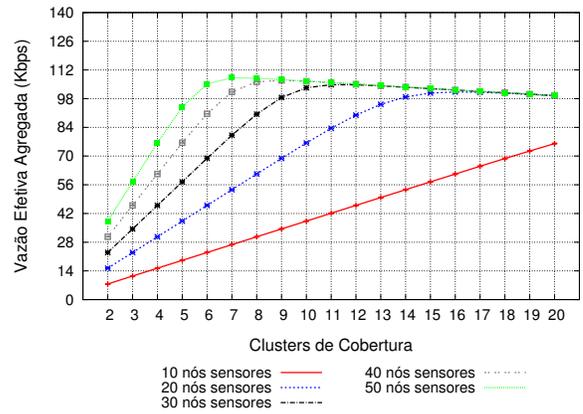
(a) sem confirmação - 0.5 quadro por segundo



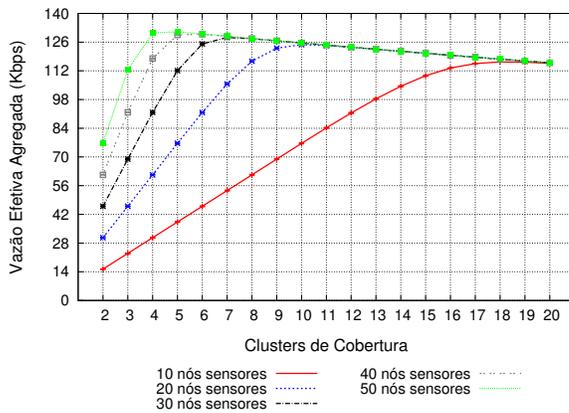
(b) com confirmação - 0.5 quadro por segundo



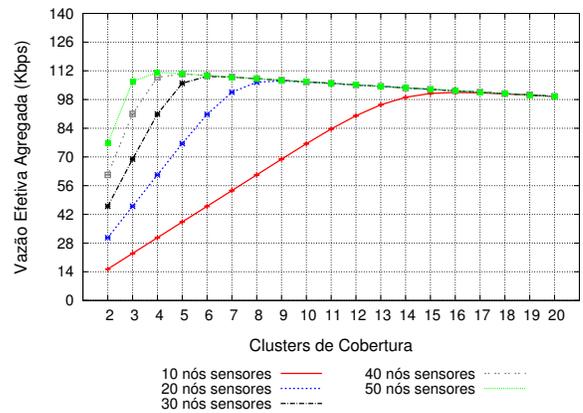
(c) sem confirmação - 1 quadro por segundo



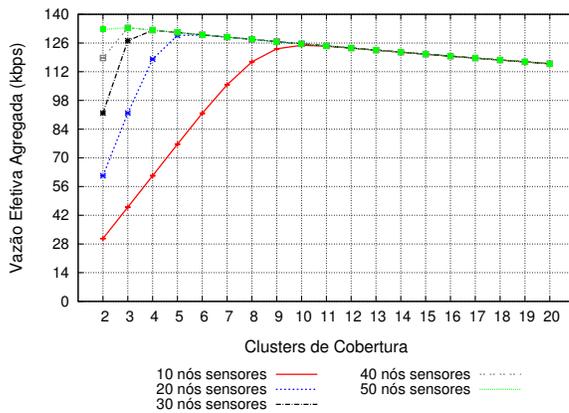
(d) com confirmação - 1 quadro por segundo



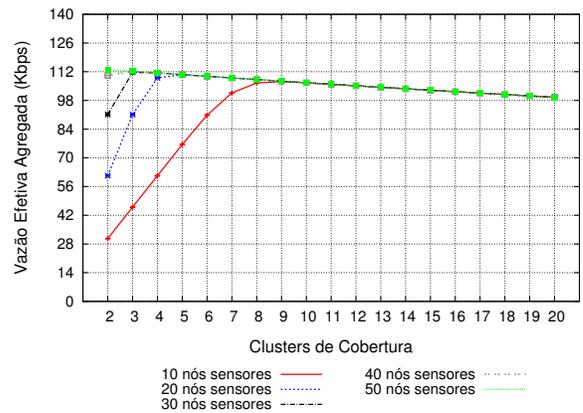
(e) sem confirmação - 2 quadros por segundo



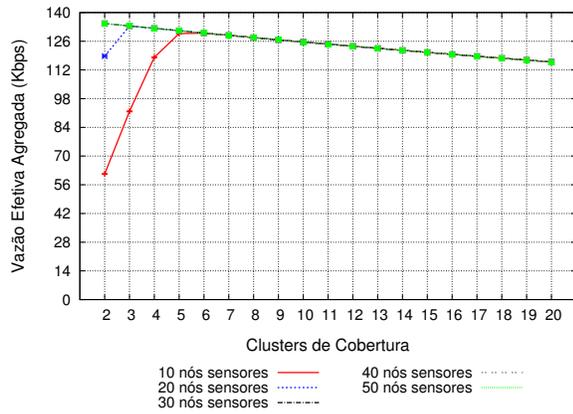
(f) com confirmação - 2 quadros por segundo



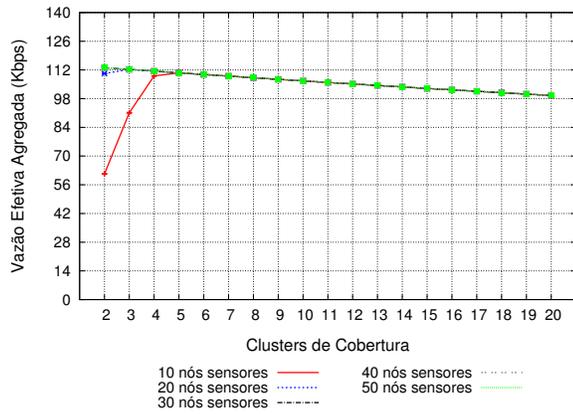
(g) sem confirmação - 4 quadros por segundo



(h) com confirmação - 4 quadros por segundo

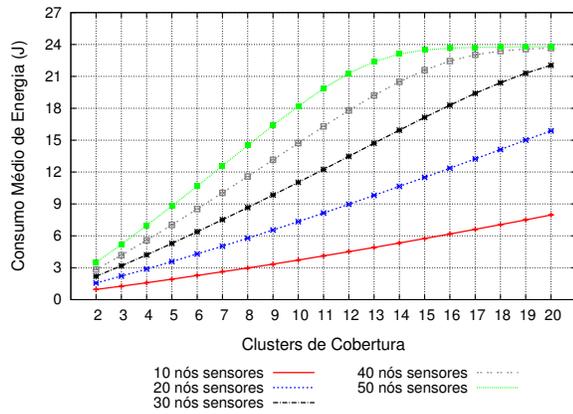


(i) sem confirmação - 8 quadros por segundo

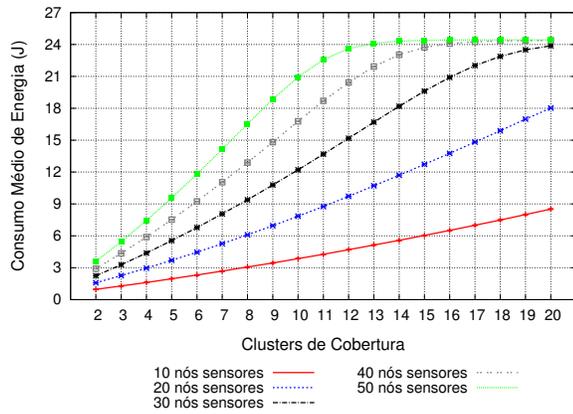


(j) com confirmação - 8 quadros por segundo

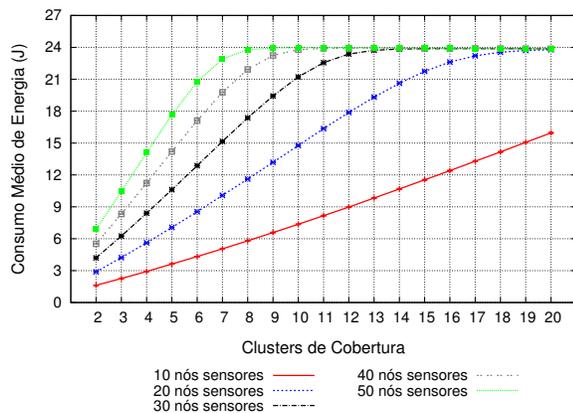
Figura 7.20: Vazão efetiva agregada do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede para diferentes cargas.



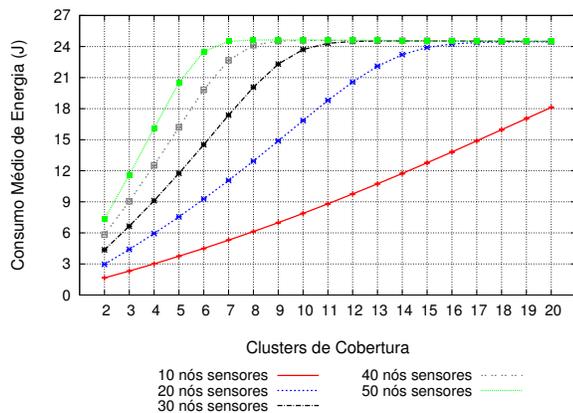
(a) sem confirmação - 0.5 quadro por segundo



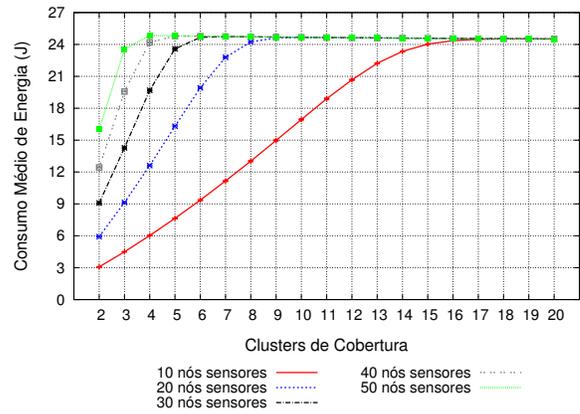
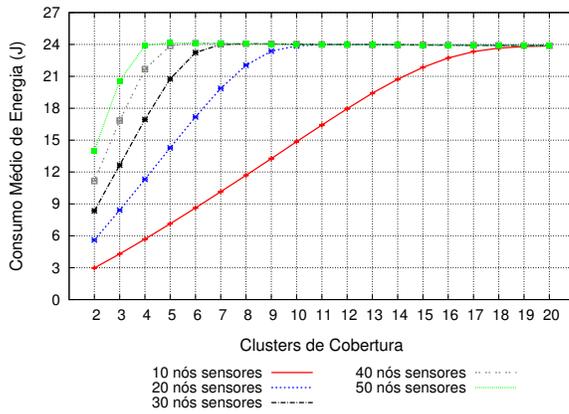
(b) com confirmação - 0.5 quadro por segundo



(c) sem confirmação - 1 quadro por segundo

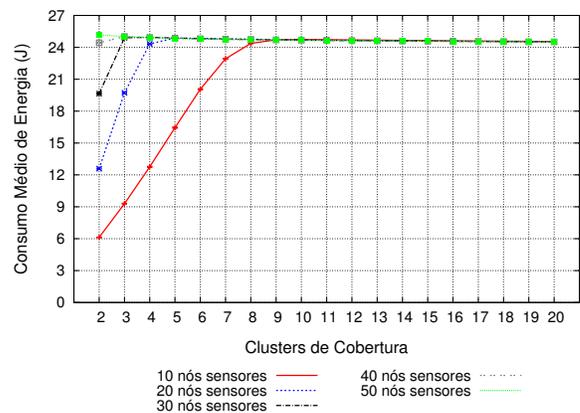
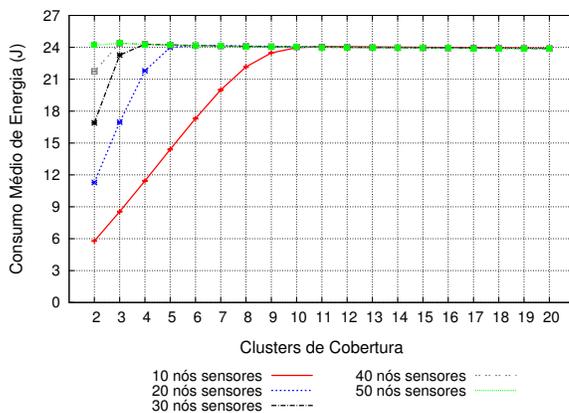


(d) com confirmação - 1 quadro por segundo



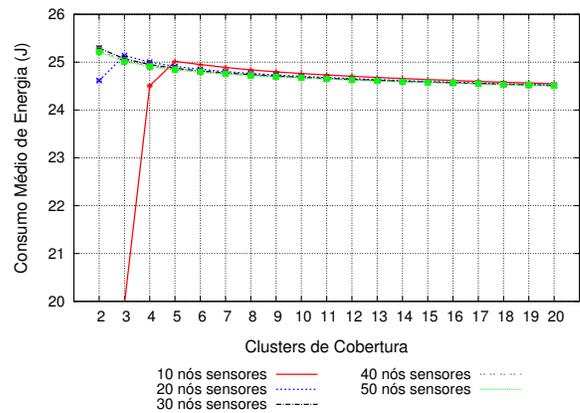
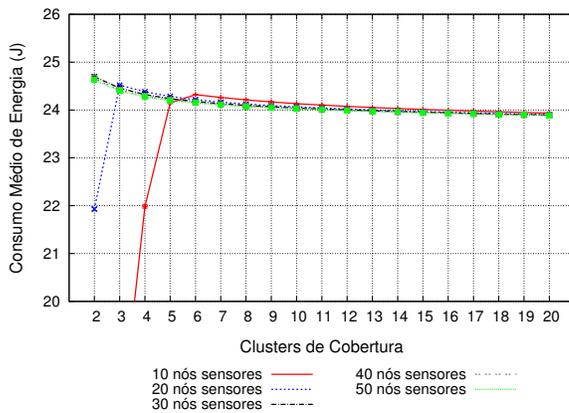
(e) sem confirmação - 2 quadros por segundo

(f) com confirmação - 2 quadros por segundo



(g) sem confirmação - 4 quadros por segundo

(h) com confirmação - 4 quadros por segundo



(i) sem confirmação - 8 quadros por segundo

(j) com confirmação - 8 quadros por segundo

Figura 7.21: Consumo médio de energia do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de *clusters* de cobertura na rede para diferentes cargas.

Analisando-se os gráficos das Figuras 7.20 e 7.21, verifica-se que a utilização do quadro

de confirmação faz com que a vazão efetiva agregada da rede diminua e o consumo médio de energia aumente. O motivo para isto é que quando se utiliza o quadro de confirmação, um tempo que seria utilizado para transmitir as sinalizações é utilizado para transmitir os quadros de confirmação, acarretando uma diminuição na quantidade de sinalizações e conseqüentemente diminuindo a quantidade de quadros de dados enviados. Mesmo a estação base não precisar esperar que o nó sensor receba o quadro de confirmação para transmitir o próximo quadro de sinalização, ela precisa esperar uma quantidade de tempo para que o quadro de confirmação seja transmitido e para a troca da operação do transceptor, assim, mesmo sendo pequena, esta espera quando realizada inúmeras vezes degrada a rede.

Nota-se que para cargas da rede (quantidade de *clusters* de cobertura, quantidade de nós sensores e tráfego) pequenas não há uma variação expressiva na vazão efetiva agregada para a utilização da confirmação da recepção em relação a não utilização da confirmação da recepção. No entanto, quando a carga da rede aumenta, uma diminuição expressiva da vazão efetiva agregada ocorre com a utilização da confirmação da recepção em relação a não utilização da confirmação da recepção. A vazão efetiva agregada máxima sem a utilização do quadro de confirmação é aproximadamente 134 Kbps - 2 *clusters* de cobertura, 50 nós sensores e 8 quadros por segundo - enquanto com a utilização do quadro de confirmação é aproximadamente 113 Kbps - 2 *clusters* de cobertura, 50 nós sensores e 8 quadros por segundo -, uma redução de 16%.

Além disso, o recebimento dos quadros de confirmação pelos nós sensores consome energia e intensifica o *overhearing*, pois todos os nós sensores que estiverem com o transceptor ativo também receberão os quadros de confirmação, e, mesmo com o mecanismo de verificação do endereço de destino, alguma quantidade de energia será consumida.

Pode-se observar pelos gráficos do consumo médio de energia, mostrados na Figura 7.21, que quando não é utilizado o quadro de confirmação o consumo máximo dos nós sensores é aproximadamente 23.78 Joules, enquanto que com a utilização do quadro de confirmação o consumo máximo dos nós sensores sobe para aproximadamente 24.50 Joules, um aumento de 3% no consumo de energia. Isto confirma que a utilização da confirmação de recepção consome mais energia e mostra que quanto maior a carga gerada pela rede maior será o consumo de energia dos nós sensores.

# Capítulo 8

## Avaliação experimental do desempenho do protocolo SPP-MAC

### 8.1 Introdução

Como apresentado no Capítulo 7, a simulação tem um papel muito importante no desenvolvimento de novos protocolos na área de redes de computadores pois permitem a rápida compreensão do desempenho destes protocolos. No entanto, elas não consideram as limitações físicas encontradas no ambiente real onde estes protocolos são utilizados, pois não consideram o hardware dos equipamentos e nem os efeitos imprevisíveis que possam ocorrer na transmissão de dados. Por isto, a realização de experimentos é algo muito importante na validação do protocolo.

Neste capítulo, apresenta-se a avaliação de desempenho do protocolo de controle de acesso ao meio proposto SPP-MAC. Todos os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos através de experimentos com redes de pequena escala, ou seja, implementações realizadas em laboratório, utilizando-se de artifícios para proporcionar uma implementação o mais realista possível. Foi considerado um cenário abrangendo somente o sistema de rede infraestruturada proposto no Capítulo 5. O objetivo é demonstrar o funcionamento do protocolo proposto SPP-MAC.

O restante deste capítulo está organizado como segue. Na Seção 8.2, descrevem-se os equipamentos utilizados nos experimentos. Na Seção 8.3, apresenta-se a implementação dos firmwares. Na Seção 8.4, apresentam-se as configurações e parâmetros utilizados nos experimentos. Nas Seções 8.5 e 8.6, encontram-se as descrições dos cenários utilizados nos experimentos, os gráficos comparativos e as análises dos resultados obtidos.

## 8.2 Equipamentos utilizados nos experimentos

Para atender as necessidades dos experimentos, foram utilizados dois módulos *Arduino* compatíveis, um para os nós sensores e outro para a estação base. Foram, utilizados, também, equipamentos de Rádio-sobre-Fibra, caixas blindadas, carretéis de fibra óptica, acopladores ópticos e circuladores de rádio frequência.

As caixas blindadas utilizadas têm como objetivo evitar que o sinal de rádio proveniente dos nós sensores alcance a estação base por algum caminho externo ao sistema que está sendo testado. Elas precisam ser utilizadas porque na bancada de experimentos os nós sensores e a estação base estão muito mais próximos do que estariam em um sistema fisicamente implantado. A atenuação das caixas blindadas é de 30 dBm aproximadamente.



Figura 8.1: RFBee.

O módulo utilizado como nós sensores da rede foi o *RFBee*, Figura 8.1, cujas características principais são:

- **Microcontrolador:** ATmega168
- **Transceptor:** CC1101
- **RAM:** 1 KB
- **Flash:** 16 KB
- **EEPROM:** 512 *bytes*
- **Frequência do processador:** 8 MHz
- **Sensibilidade do receptor:**  $-95$  dBm
- **Potências de transmissão:**  $-30$ ,  $-20$ ,  $-15$ ,  $-10$ ,  $0$ ,  $5$ ,  $7$  e  $10$  dBm

- **Frequência de trabalho:** 868 MHz e 915 MHz
- **Taxa de transmissão de dados:** de 4.8 Kbps a 500 Kbps



Figura 8.2: BE900.

O módulo utilizado como estação base foi o *BE900*, Figura 8.2, cujas características principais são:

- **Microcontrolador:** ATmega328
- **Transceptor:** CC1101
- **RAM:** 2 KB
- **Flash:** 32 KB
- **EEPROM:** 1 KB
- **Frequência do processador:** 8 MHz
- **Sensibilidade do receptor:**  $-95$  dBm
- **Potências de transmissão:**  $-30$ ,  $-20$ ,  $-15$ ,  $-10$ ,  $0$ ,  $5$ ,  $7$  e  $10$  dBm
- **Frequência de trabalho:** 868 MHz e 915 MHz
- **Taxa de transmissão de dados:** de 4.8 Kbps a 500 Kbps

As características principais do equipamento Rádio-sobre-Fibra, Figura 8.3, são:

- **Impedância de entrada e saída:**  $50\Omega$

- **Comprimento de onda ( $\lambda$ ):** 1310 nm
- **Potência óptica de saída:** 3 dBm
- **Ganho em Rádio Frequência sem perda óptica:** 0 dBm
- **Frequência de operação:** 28 MHz até 3000 MHz
- **Input Noise Floor (EIN):**  $-134$  dBm/Hz



Figura 8.3: Equipamento de Rádio-sobre-Fibra.

As características principais da fibra óptica são:

- **Tipo:** monomodo padrão SMF-28
- **Atenuação:** 0.25 dBm/Km
- **Dispersão óptica:** 0 ps/nm<sup>2</sup>.Km

### 8.3 Implementação dos Firmwares

Para a realização dos experimentos foi desenvolvida uma pilha de protocolos para identificação das funções a serem realizadas pela rede de sensores, como mostra a Figura 8.4. A definição das funções de cada camada seguiu as características conceituais semelhante ao que estabelece a pilha de protocolo *TCP/IP* [44], considerando uma pilha com 5 camadas. A construção de uma pilha de camadas específica para rede de sensores leva a definição de funções para atender as necessidades que se apresentaram para o projeto.

Para o desenvolvimento do código e compilação dos firmwares, foi utilizada a plataforma *Arduino*. Esta plataforma é bastante interessante dado sua flexibilidade e disponibilização

de códigos abertos, que permitiram o desenvolvimento de todos os algoritmos de transmissão e recepção.

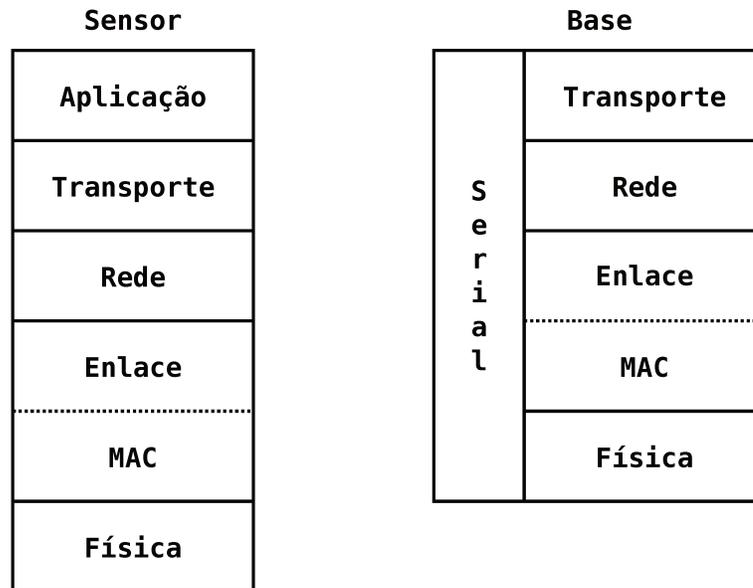


Figura 8.4: Pilha de camadas.

A seguir, está uma pequena descrição das funções de cada camada implementada nos firmwares:

- *Aplicação*: atende as necessidades do nó sensor quanto ao monitoramento de grandezas ou comandos de dispositivos. Nesta camada é realizado o controle dos sensores e dos atenuadores.
- *Transporte*: provê mecanismos que possibilitam a troca de dados fim-a-fim, ou seja, a camada de transporte não se comunica com máquinas intermediárias na rede, como pode ocorrer com as camadas inferiores.
- *Rede*: suas principais funções são o roteamento dos pacotes entre fonte e destino, mesmo que estes tenham que passar por diversos nós intermediários durante o percurso, o controle de congestionamento e a contabilização do número de pacotes ou bytes utilizados pelo usuário, para fins de tarifação.
- *MAC*: responsável pela estratégia de transmissão e recepção dos quadros, ou seja, é responsável em controlar a maneira como se faz o acesso ao meio de comunicação para a transmissão das informações.

- *Física*: responsável pelos processos de transmissão e recepção, como modulação, frequência, etc. É a camada que controla o transceptor.

Na implementação dos firmwares, as camadas de transporte e rede foram implementadas sem nenhuma funcionalidade. Elas apenas recebem os dados da camada acima e enviam para a camada abaixo e vice-versa. A camada Física foi implementada em cima do transceptor da empresa Texas Instruments modelo CC1101 [45]. As outras camadas foram implementadas no microcontrolador e a comunicação entre ele e o transceptor utiliza como interface o *Serial Peripheral Interface* (SPI).

## 8.4 Configuração dos Experimentos

Todos os experimentos foram replicados 10 vezes, os resultados apresentados possuem intervalos de confiança de 90% e a duração dos experimentos é 360 segundos.

As configurações utilizadas pelos dispositivos, tanto pelos nós sensores quanto pela estação base podem ser vistos na Tabela 8.1.

Tabela 8.1: Configuração da camada Física do dispositivos para os experimentos.

Parâmetro	Valor
Potência de transmissão	10 dBm
Sensibilidade de recepção	-95 dBm
Ganho da antena	0 dBi
Frequência	915 MHz
Taxa de transmissão	250 Kbps
Espaçamento entre os canais	200 KHz
Modulação	<i>GFSK</i>
Canal	20
Preamble (camada Física)	32 <i>bits</i>
Sync Word (camada Física)	32 <i>bits</i>

As principais métricas de desempenho consideradas durante a realização dos experimentos deste capítulo são a taxa de entrega dos quadros de dados, a vazão efetiva agregada

dos quadros de dados, a quantidade de quadros de dados perdidos e a taxa de sinalizações bem sucedida.

## 8.5 Desempenho da rede em função da quantidade de nós sensores e diferentes cargas sem utilização da confirmação de recepção

A proposta deste primeiro experimento é verificar o comportamento do protocolo SPP-MAC quando ocorrem mudanças na carga da rede, seja pelo aumento na quantidade de nós sensores na rede ou pela utilização de diferentes gerações de dados. Para isto, a topologia definida na Figura 8.5 foi montada.

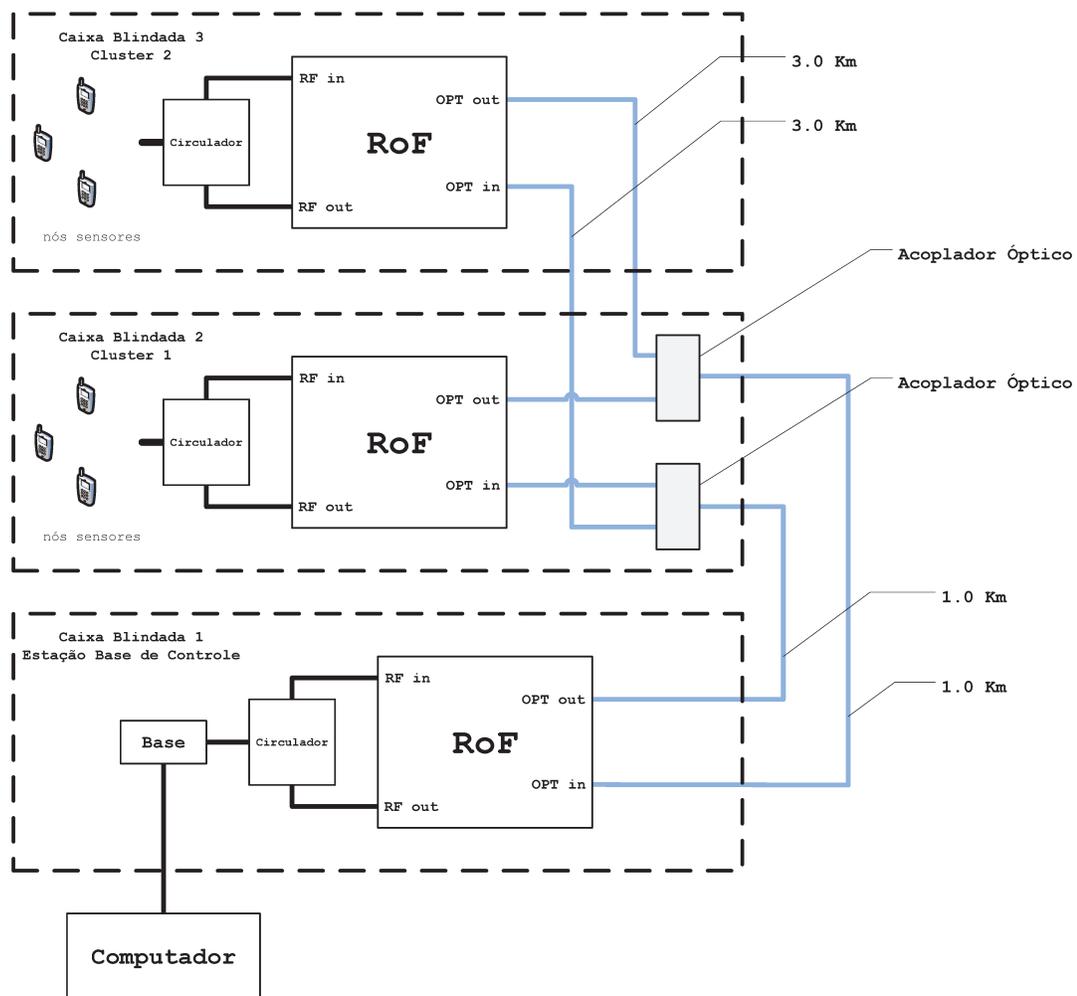


Figura 8.5: Esquemático da topologia dos experimentos.

Foram utilizadas três caixas blindadas, uma para a Estação Base de Controle e as outras para os dois *clusters* de cobertura utilizados. O comprimento do enlace de fibras ópticas utilizado entre a Estação Base de Controle e o primeiro *cluster* de cobertura é de 1.0 Km e o comprimento do enlace de fibras ópticas utilizado entre o primeiro *cluster* de cobertura e o segundo é de 3.0 Km, assim, o comprimento do enlace de fibras ópticas utilizado entre a Estação Base de Controle e o segundo *cluster* de cobertura é de 4.0 Km. Foram utilizados dois acopladores ópticos, três equipamentos de RoF e três circuladores.

Para variar a quantidade de nós sensores na rede, variou-se a quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura de 1 em 1, no intervalo de 1 até 6, pois, como a quantidade de caixas blindadas para os *clusters* de cobertura é limitada a apenas duas, não é possível variar a quantidade de *clusters* de cobertura. Por sua vez, a quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura não pode ser muito alta devido ao espaço reduzido no interior das caixas blindadas.

Nesse experimento, nenhum quadro de confirmação de recepção foi utilizado, o *payload* dos quadros de dados utilizado tem 48 *bytes* e as cargas utilizadas foram de 0.5, 1, 2 e 4 quadros por segundo. Devido as limitações naturais do hardware dos dispositivos utilizados, não foi possível utilizar cargas maiores.

Verifica-se que a taxa de entrega, como mostrado nas Figuras 8.6(a), 8.7(a), 8.8(a) e 8.9(a), é aproximadamente 100% independentemente da carga ou quantidade de nós sensores utilizadas. Como já foi mostrado, o protocolo SPP-MAC anula completamente as colisões por se tratar de um protocolo baseado em seleção, porém, como pode ser visto nas Figuras 8.6(d), 8.7(d), 8.8(d) e 8.9(d), algumas perdas de quadros ocorrem, não devido a colisões, mas sim devido a problemas físicos do canal.

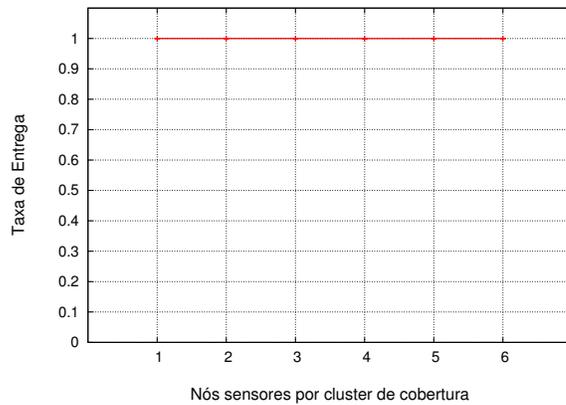
Independentemente da carga utilizada a vazão efetiva agregada aumenta com o aumento da quantidade de nós sensores na rede. Quando maior a quantidade de nós sensores na rede, mais nós sensores serão sinalizados pela estação base, aumentando, assim, a taxa de sinalização bem sucedida pois uma quantidade maior de quadros de sinalização serão respondidos com quadros de dados. Desta maneira, mais dados serão recebidos pela estação base. Portanto, existe uma relação direta entre a taxa de sinalização bem sucedida e a vazão efetiva agregada.

Os experimentos mostram, também, que quanto maior a carga maior é a vazão efetiva agregada, já que uma quantidade maior de dados são gerados pelos nós sensores, levando a uma quantidade maior de quadros de sinalização respondidos, aumentando, assim, a vazão efetiva agregada.

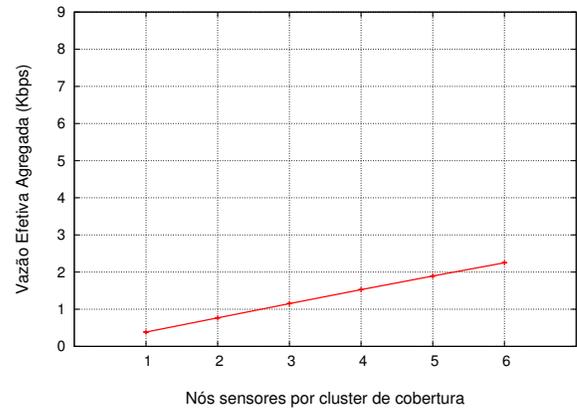
Pode-se observar que quando a taxa de sinalização bem sucedida atinge 100% a vazão efetiva agregada atinge o seu valor máximo e, a partir deste ponto ela permanece constante.

Como não há variação na quantidade de *clusters* de cobertura nos experimentos, o

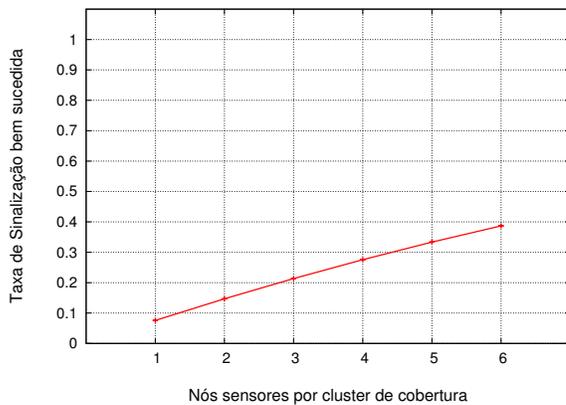
atraso de propagação no enlace óptico não varia, permanecendo fixo para a utilização dos dois *clusters* de cobertura. Desta maneira, a vazão efetiva agregada, depois de atingir seu valor máximo, não diminui como aconteceu nas simulações do Capítulo 7. Ela apenas permanece constante com o aumento da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura.



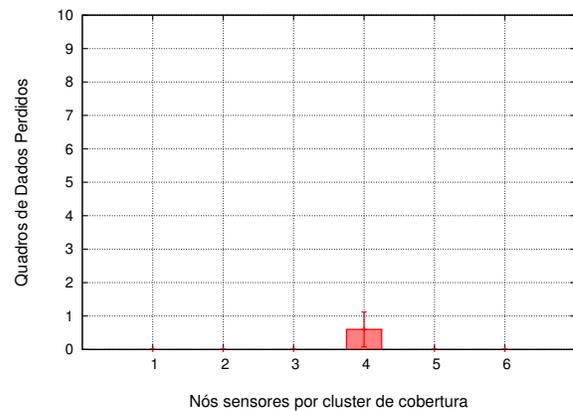
(a) Taxa de entrega



(b) Vazão efetiva agregada



(c) Taxa de sinalizações bem sucedidas



(d) Quadros de dados perdidos

Figura 8.6: Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura da rede para carga de 0.5 quadro por segundo sem utilizar confirmação de recebimento.

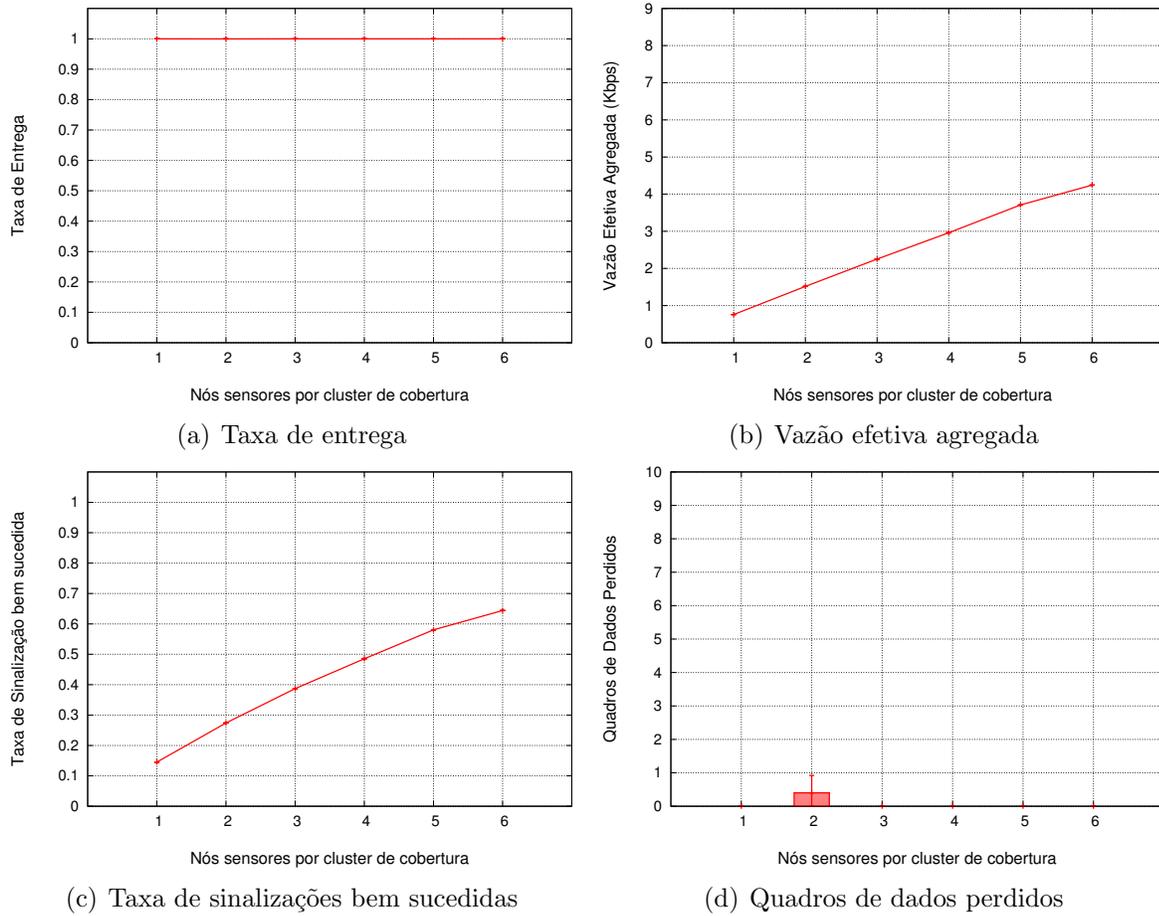
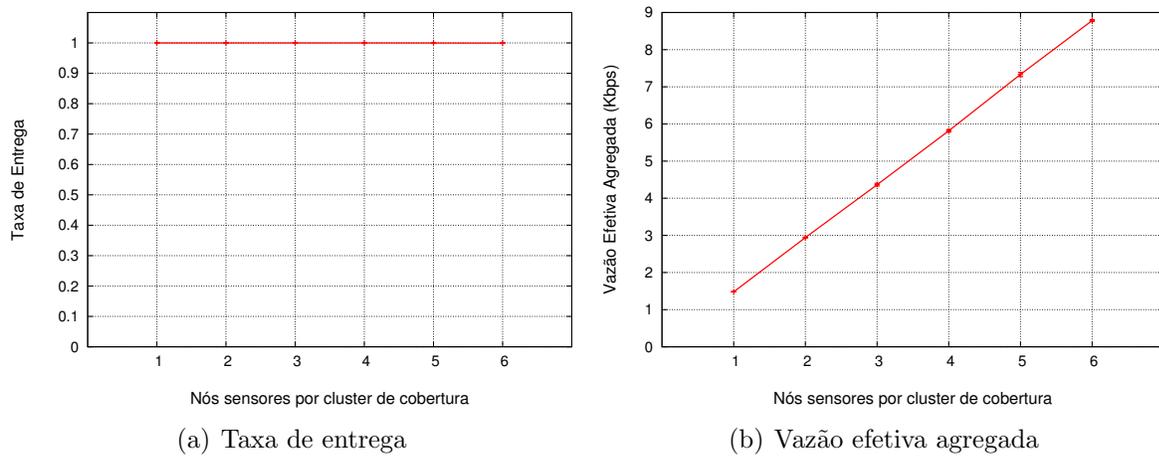
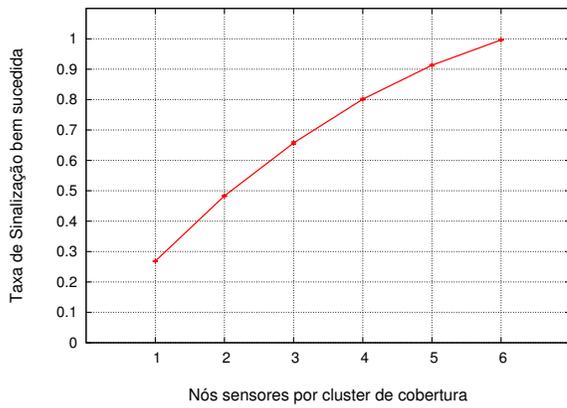
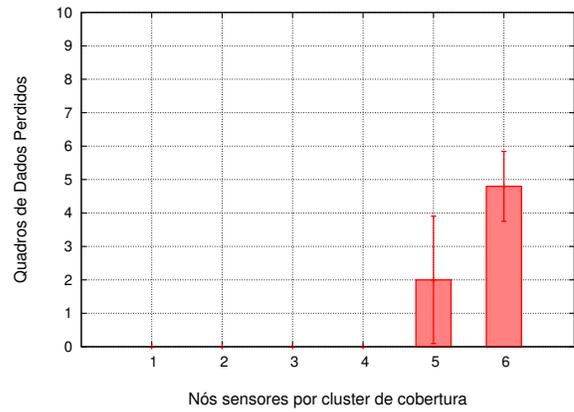


Figura 8.7: Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura da rede para carga de 1 quadro por segundo sem utilizar confirmação de recebimento.



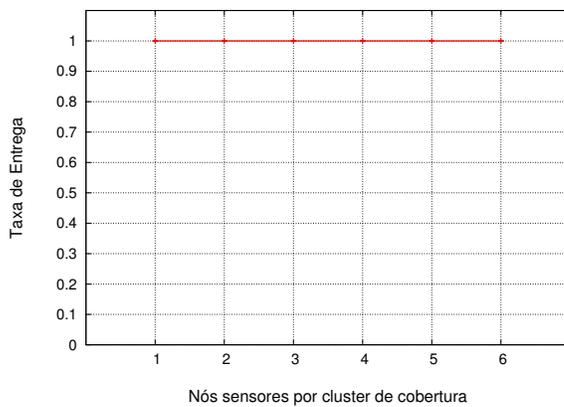


(c) Taxa de sinalizações bem sucedidas

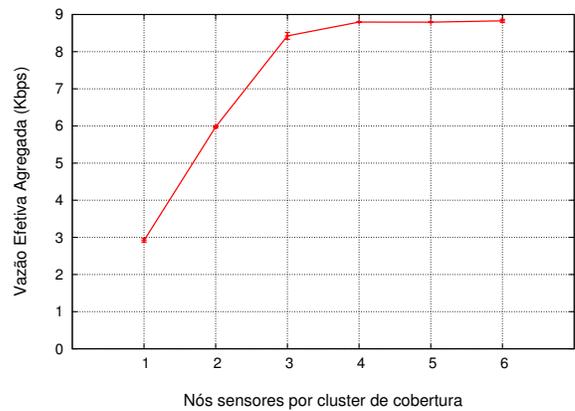


(d) Quadros de dados perdidos

Figura 8.8: Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura da rede para carga de 2 quadros por segundo sem utilizar confirmação de recebimento.



(a) Taxa de entrega



(b) Vazão efetiva agregada

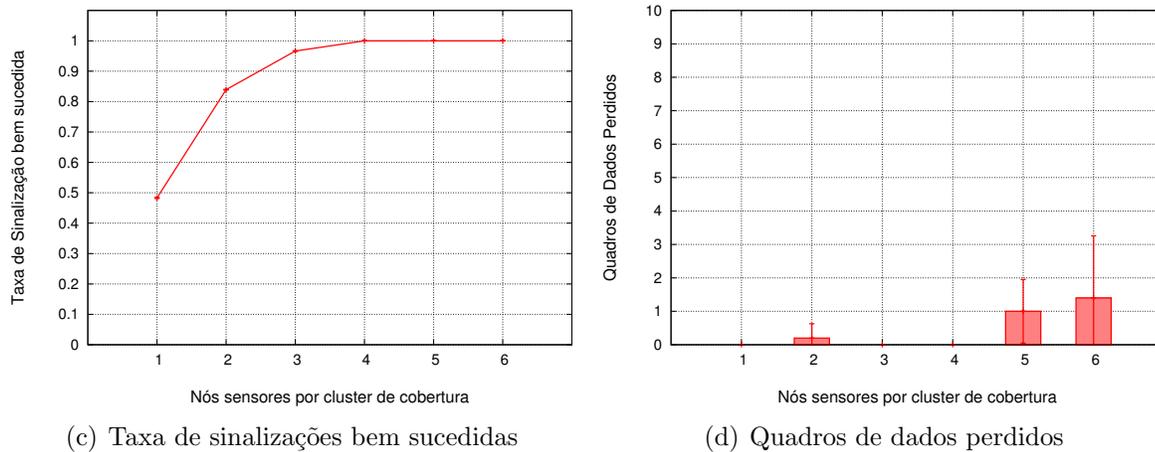


Figura 8.9: Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura da rede para carga de 4 quadros por segundo sem utilizar confirmação de recebimento.

## 8.6 Desempenho da rede em função da quantidade de nós sensores e diferentes cargas utilizando confirmação de recepção

A proposta deste segundo experimento é verificar o comportamento do protocolo SPP-MAC quando ocorrem mudanças na carga da rede, seja pelo aumento na quantidade de nós sensores na rede ou pela utilização de diferentes cargas, através da topologia definida na Figura 8.5 utilizando-se da confirmação de recepção.

Para variar a quantidade de nós sensores na rede, variou-se a quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura de 1 em 1, no intervalo de 1 até 6, pois, como a quantidade de caixas blindadas para os *clusters* de cobertura é limitada a apenas duas, não é possível variar a quantidade de *clusters* de cobertura. Por sua vez, a quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura não pode ser muito alta devido ao espaço reduzido no interior das caixas blindadas.

Nesse experimento, o quadro de confirmação de recepção foi utilizado, o *payload* dos quadros de dados utilizados tem 48 *bytes* e as cargas utilizadas foram de 0.5, 1, 2 e 4 quadros por segundo. Devido as limitações naturais do hardware dos dispositivos utilizados, não foi possível utilizar cargas maiores.

Nesse experimento pode-se verificar que quando a carga aumenta, a vazão efetiva agregada diminui para as maiores quantidades de nós sensores nos *clusters* de cobertura

com relação aos valores da vazão de quando não está sendo utilizada a confirmação de recepção. Isto acontece porque um período de tempo será utilizado para transmitir os quadros de confirmação, diminuindo, assim, a quantidade de quadros de sinalização transmitidos, e, como já se sabe, quanto menos quadros de sinalização são transmitidos menor é a vazão efetiva agregada.

Pode-se notar que a vazão diminui para as quantidades de nós sensores cuja a taxa de sinalização bem sucedida atingiu 100% sem a utilização da confirmação de recepção, ou seja, a vazão diminui somente quando a carga da rede já está saturada, ou seja, não há como aumentar a quantidade de quadros de dados transmitidos.

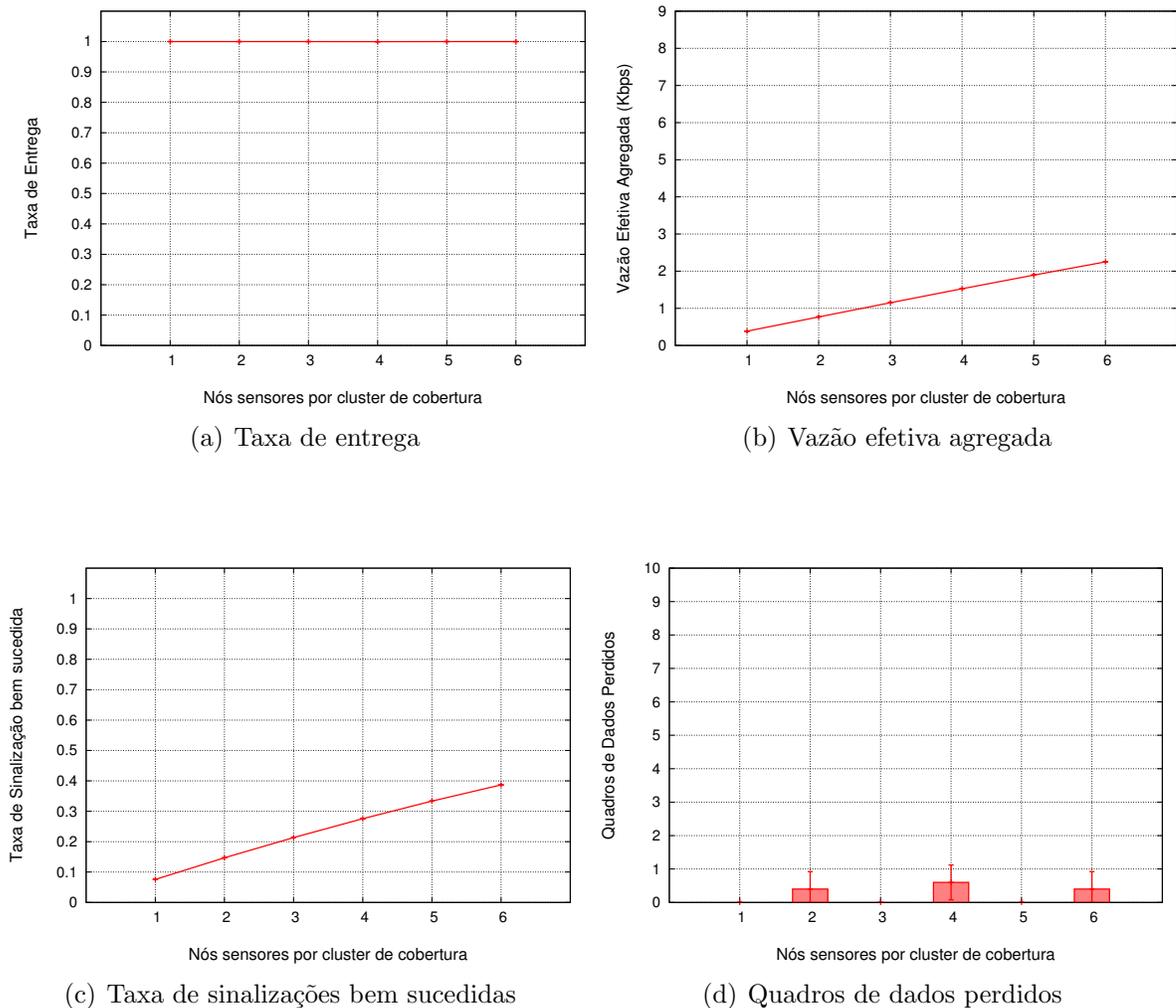


Figura 8.10: Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura da rede para carga de 0.5 quadro por segundo utilizando confirmação de recebimento.

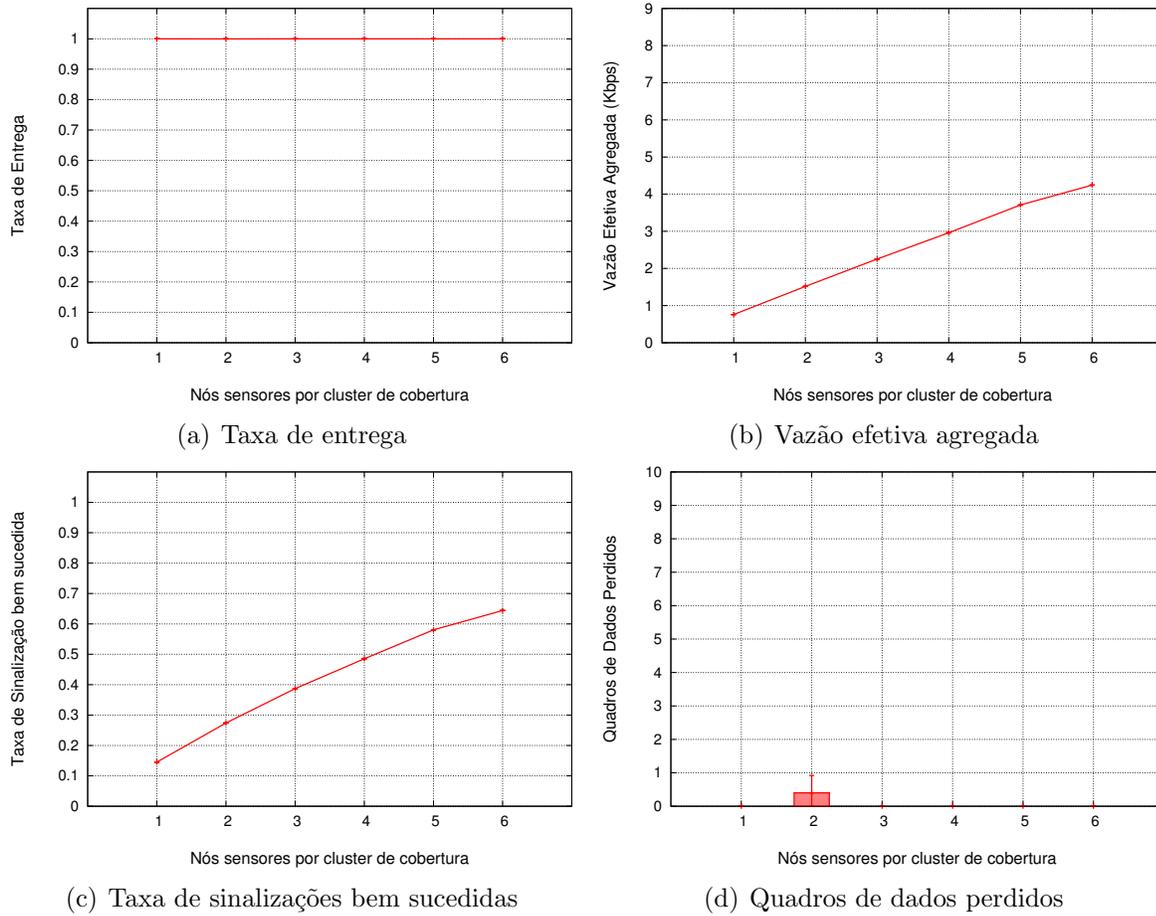
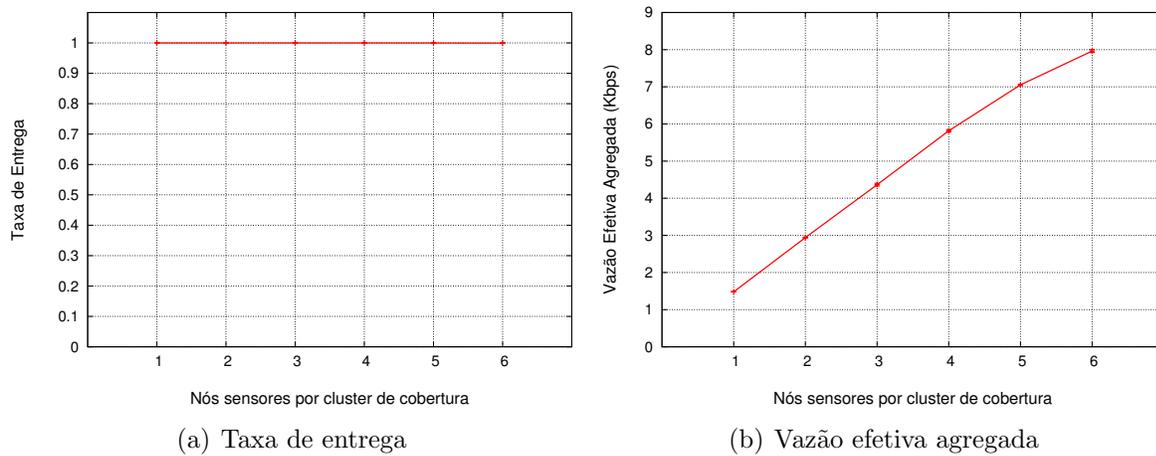
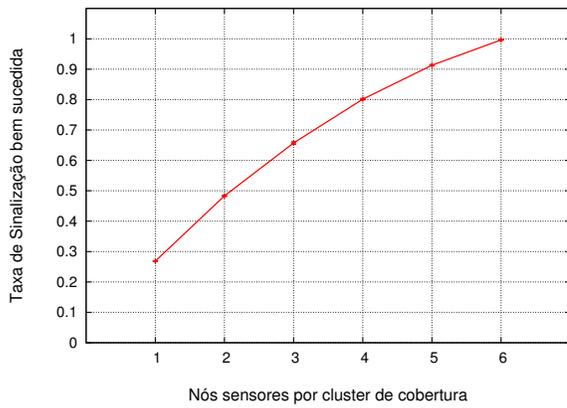
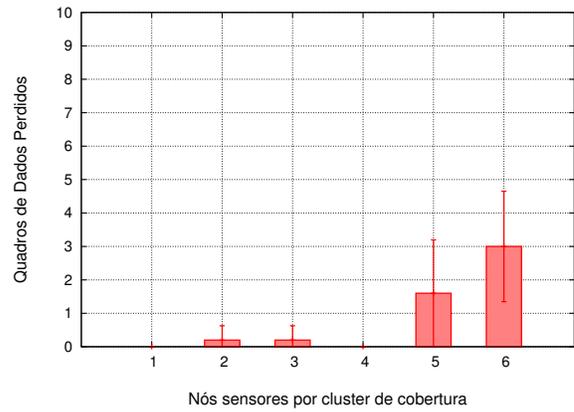


Figura 8.11: Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura da rede para carga de 1 quadro por segundo utilizando confirmação de recebimento.



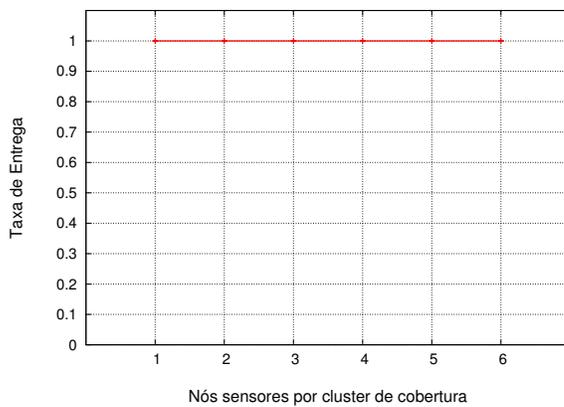


(c) Taxa de sinalizações bem sucedidas

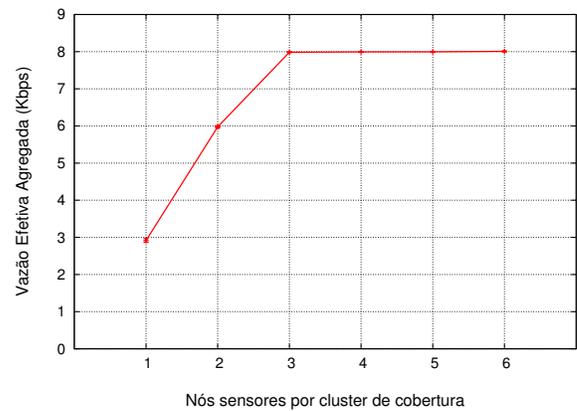


(d) Quadros de dados perdidos

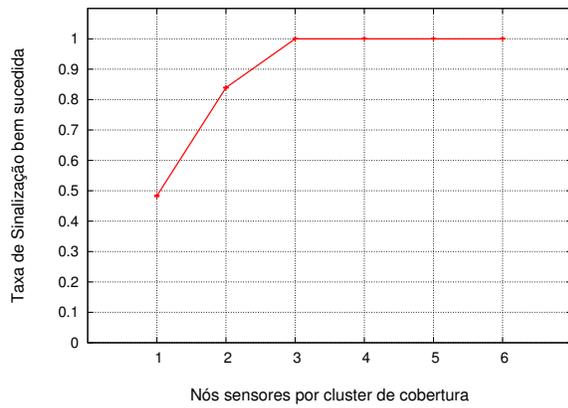
Figura 8.12: Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura da rede para carga de 2 quadros por segundo utilizando confirmação de recebimento.



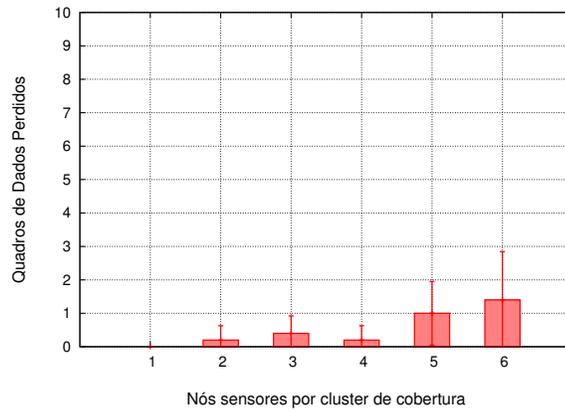
(a) Taxa de entrega



(b) Vazão efetiva agregada



(c) Taxa de sinalizações bem sucedidas



(d) Quadros de dados perdidos

Figura 8.13: Taxa de entrega, vazão efetiva agregada, taxa de sinalizações bem sucedida e quadros de dados perdidos do protocolo SPP-MAC em função da quantidade de nós sensores nos *clusters* de cobertura da rede para carga de 4 quadros por segundo utilizando confirmação de recebimento.

# Capítulo 9

## Conclusão

A infraestrutura de fibras ópticas no Brasil e no mundo está em grande parte ociosa. A utilização desta infraestrutura é desejável em função dos grandes recursos envolvidos na implantação destas redes. O emprego desta infraestrutura para outras aplicações, que aquelas tradicionalmente utilizadas, é fortemente desejável.

A utilização da tecnologia Rádio-sobre-Fibra em conjunto com redes de sensores sem fio pode ser uma alternativa interessante para a utilização de fibras ópticas apagadas. Entretanto, é necessário avaliar o impacto da utilização de RoF em conjunto com WSN.

Este trabalho analisou o impacto da utilização de um sistema de Rádio-sobre-Fibra como *backhaul* de uma rede de sensores sem fio no que diz respeito ao controle de acesso ao meio. A análise utilizou de simulação e experimentação para avaliar o desempenho da rede.

O foco deste trabalho foi o estudo do comportamento do controle de acesso ao meio da arquitetura integrada proposta (WSN-RoF) e o desenvolvimento de protocolos de controle de acesso ao meio para esta nova arquitetura. Não foram levados em consideração as limitações físicas da arquitetura.

Com o conhecimento adquirido, foram projetados dois protocolos de controle de acesso ao meio exclusivos para a arquitetura WSN-RoF denominados **S**cheduling of **P**olling **P**riority **M**edium **A**ccess **C**ontrol (SPP-MAC) e **H**ybrid **M**edium **A**ccess **C**ontrol for **H**ybrid **R**adio-over-Fiber Wireless **S**ensor **N**etwork **A**rchitecture (HMARS). Estes protocolos foram desenvolvidos exclusivamente para serem utilizados na arquitetura integrada proposta WSN-RoF, sendo ambos protocolos centralizados.

Foram realizadas simulações a fim de se avaliar o desempenho dos protocolos de controle de acesso ao meio em termos da vazão agregada, consumo de energia e taxa de entrega para diferentes cenários e diferentes configurações. Os resultados obtidos confirmam o bom desempenho de ambos os protocolos propostos para os quais foram desenvolvidos, sendo que para alguns cenários um supera o outro.

Ao se avaliar o desempenho da rede sobre influência da quantidade de nós sensores e cargas de tráfego, verifica-se que a vazão agregada do protocolos SPP-MAC tende a um patamar máximo. Este patamar é alcançado quando a taxa de quadros de sinalização respondidos atinge 100%, ou seja, todas as sinalizações enviadas foram respondidas por quadro de dados. É possível notar que no protocolo HMARS o número de colisões aumenta com o aumento da quantidade de nós sensores nos clusters de cobertura. Em relação ao consumo de energia, o HMARS consome menos energia por não utilizar sinalização e permitir que os nós sensores fiquem mais tempo com o transceptor desligado do que ligados.

Quando se avalia o desempenho da rede sobre influência do comprimento do enlace óptico, a vazão agregada obtida pelo protocolo SPP-MAC experimentou uma degradação de aproximadamente 87% enquanto a vazão agregada obtida pelo protocolo HMARS experimentou uma degradação de aproximadamente 2%. Isto mostra que o protocolo SPP-MAC sofre mais com o aumento do comprimento do enlace óptico, algo esperado para um protocolo baseado em seleção.

Na avaliação da característica principal do protocolo SPP-MAC, foi utilizado um cenário no qual diferentes cargas foram geradas. Desta maneira, foi possível verificar o comportamento do protocolo SPP-MAC utilizando o mecanismo de priorização. Os resultados mostram que quando o mecanismo de priorização é utilizado, a vazão agregada obtida é maior do que quando o mecanismo não é utilizado.

Experimentações também foram feitas com o protocolo SPP-MAC, devido a maior simplicidade da implementação da codificação. Com os resultados obtidos, verificou-se que as simulações ficaram bem próximas da realidade.

Dessa forma, as principais contribuições deste trabalho foram: o detalhamento do estado da arte em protocolos de controle de acesso ao meio para redes de sensores sem fio, a introdução da arquitetura WSN-RoF e a proposta dos protocolos SPP-MAC e HMARS.

Para trabalhos futuros, sugere-se a modificação dos protocolos propostos ou o desenvolvimento de um novo protocolo que funcione em múltiplos saltos dentro dos clusters de cobertura, aumentando, assim, a área de cobertura dos clusters. Outra questão importante está em continuar os experimentos e tentar colocá-los no mundo real, utilizando redes de fibras ópticas já instaladas.

# Referências Bibliográficas

- [1] X. Wang and S. Zhang, “Research on efficient coverage problem of node in Wireless Sensor Networks.,” in *Second International Symposium on Electronic Commerce and Security*, vol. 2, pp. 532 – 536, 2009.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless Sensor Networks: A Survey.,” *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393 – 422, December 2002.
- [3] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, “Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks.,” in *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Mobi-Com ’99*, (New York, NY, USA), pp. 263 – 270, ACM, 1999.
- [4] G. J. Pottie and W. J. Kaiser, “Wireless integrated network sensors.,” *Commun. ACM*, vol. 43, pp. 51 – 58, May 2000.
- [5] A. Fanimokun and J. Frolik, “Effects of natural propagation environments on Wireless Sensor Network coverage area.,” in *Proceedings of the 35th Southeastern Symposium*, pp. 16 – 20, 2003.
- [6] H. Al-Raweshidy and S. Komaki, *Radio-over-Fiber Technologies for mobile communications networks*. 2002.
- [7] M. Hossen, B.-J. Jang, K.-D. Kim, and Y. Park, “Extension of Wireless Sensor Network by employing RoF-based 4G network.,” in *11th International Conference on Advanced Communication Technology*, vol. 01, pp. 275 – 278, february 2009.
- [8] A. J. Cooper, “Fibre/Radio for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network.,” *Electronics Letters*, vol. 26, pp. 2054 – 2056, November 1990.
- [9] G. Keiser, *Optical fiber communications*. McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2008.
- [10] A. C. V. Gummalla and J. O. Limb, “Wireless Medium Access Control protocols.,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 3, no. 2, pp. 2 – 15, 2000.

- [11] I. Rubin, “Access-control disciplines for multi-access communication channels: Reservation and TDMA schemes.,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 25, no. 5, pp. 516 – 536, 1979.
- [12] B. Vucetic and S. Glisic, *Spread Spectrum CDMA systems for Wireless Communications*. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., 1st ed., 1997.
- [13] N. Abramson, “Development of the ALOHANET.,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 31, no. 2, pp. 119 – 123, 1985.
- [14] L. Kleinrock, Fouad, and A. Tobagi, “Carrier Sense Multiple Access modes and their throughput-delay characteristics.,” *IEEE Trans. Comm*, vol. 23, pp. 1400 – 1416, 1983.
- [15] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An energy-efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks.,” in *Annual Joint Conference of the Computer and Communication Societies*, vol. 3, (New York, NY, USA), pp. 1567 – 1576, November 2002.
- [16] T. Van Dam and K. Langendoen, “An adaptive energy-efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks.,” in *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '03, (New York, NY, USA), pp. 171 – 180, ACM, 2003.
- [17] T. Zheng, S. Radhakrishnan, and V. Sarangan, “P-MAC: An adaptive energy-efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks.,” in *19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, April 2005.
- [18] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “An application-specific protocol architecture for Wireless Microsensor Networks.,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, no. 4, 2002.
- [19] W. R. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, “Adaptive protocols for information dissemination in Wireless Sensor Networks.,” in *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '99, (New York, NY, USA), pp. 174 – 185, ACM, 1999.
- [20] “802.15.4-2006 IEEE Standard for Information Technology.,” 2006.
- [21] P. Lin, C. Qiao, and X. Wang, “Medium Access Control with a dynamic duty-cycle for sensor networks.,” in *Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 3, pp. 1534 – 1539, March 2004.

- [22] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low-power media access for Wireless Sensor Networks.,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '04, (New York, NY, USA), pp. 95 – 107, ACM, 2004.
- [23] Y. Kim, H. Shin, and H. Cha, “Y-MAC: An energy-efficient multi-channel MAC protocol for dense Wireless Sensor Networks.,” in *International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 53 – 63, April 2008.
- [24] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G. Pottie, “Protocols for self-organization of a Wireless Sensor Network.,” *IEEE Personal Communications*, vol. 7, pp. 16 – 27, October 2000.
- [25] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. Raghavendra, “An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in Wireless Sensor Networks.,” in *18th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, p. 224, April 2004.
- [26] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. Garcia-Luna-Aceves, “Energy-efficient, collision-free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks.,” pp. 181 – 192, ACM Press, 2003.
- [27] W. Stallings, *Wireless Communications and Networks*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2nd ed., 2005.
- [28] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2nd ed., 2002.
- [29] P. Smyth, “Optical Radio: A review of a radical new technology for Wireless Access Infrastructure.,” *BT Technology Journal*, vol. 21, pp. 22 – 31, 2003. 10.1023/A:1025198729319.
- [30] B. L. Dang and I. Niemegeers, “Analysis of IEEE 802.11 in Radio-over-Fiber home networks.,” in *Proceedings of the The IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary*, LCN '05, (Washington, DC, USA), pp. 744 – 747, IEEE Computer Society, 2005.
- [31] B. L. Dang, R. Venkatesha Prasad, and I. Niemegeers, “On the MAC protocols for Radio-over-Fiber indoor networks.,” in *First International Conference on Communications and Electronics*, pp. 112 – 117, October 2006.
- [32] B. Kalantarisalet and K. Mitchell, “MAC constraints on the distribution of 802.11 using Optical Fibre.,” in *Eropean Conference on Wireless Technologies*, pp. 238 – 240, September 2006.

- [33] A. Das, M. M. amd A. Nkansah, and N. J. Gomes, “Effects on IEEE 802.11 MAC throughput in Wireless LAN over Fiber Systems.,” in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, pp. 3321 – 3328, November 2007.
- [34] B. Kalantari-Sabet, M. Mjeku, N. J. Gomes, and J. E. Mitchell, “Performance Impairments in Single-Mode Radio-over-Fiber Systems due to MAC constraints.,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, pp. 2540 – 2548, Aug 2008.
- [35] B. L. Dang, M. G. Larrode, R. V. Prasad, I. Niemegeers, and A. M. J. Koonen, “Radio-over-Fiber based architecture for seamless wireless indoor communication in the 60GHz band.,” *Comput. Commun.*, vol. 30, pp. 3598 – 3613, December 2007.
- [36] H. Kim, J. H. Cho, S. Kim, K.-U. Song, H. Lee, J. Lee, B. Kim, Y. Oh, J. Lee, and S. Hwang, “Radio-over-Fiber system for TDD-based OFDMA Wireless Communication Systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, pp. 3419 – 3427, November 2007.
- [37] H. B. Kim, M. Emmelmann, B. Rathke, and A. Wolisz, “A Radio-over-Fiber network architecture for road vehicle communication systems.,” in *Proceedings of Vehicular Technology Conference*, 2005.
- [38] H. B. Kim, H. Woesner, and A. Wolisz, “A Medium Access Control protocol for Radio-over-Fiber wireless LAN operating in the 60GHz band.,” in *5th European Personal Mobile Communications Conference*, pp. 204 – 208, April 2003.
- [39] P. H. Gomes, N. L. S. da Fonseca, and O. C. Branquinho, “Analysis of performance degradation in Radio-over-Fiber systems based on IEEE 802.16 protocol.,” in *IEEE Latin-American Conference on Communications*, pp. 1 – 6, September 2009.
- [40] J. Tang, X. Jin, Y. Zhang, X. Zhang, and W. Cai, “A Hybrid Radio-over-Fiber Wireless Sensor Network architecture.,” in *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pp. 2675 – 2678, september 2007.
- [41] R. M. Assumpcao, O. C. Branquinho, M. L. F. Abbade, D. G. Lona, and S. A. Cerqueira, “Impact evaluation of Radio-over-Fiber technology in Wireless Sensor Networks.,” in *International Microwave Optoelectronics Conference*, pp. 618 – 622, 2011.
- [42] H. Wu and Y. Pan, *Medium Access Control in Wireless Networks*, vol. 8. Nova Publishers, 2008.

- [43] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “Medium Access Control with coordinated adaptive sleeping for Wireless Sensor Networks.,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, no. 3, pp. 493 – 506, 2004.
- [44] A. Tanenbaum, *Redes de Computadores*. Campus, 2003.
- [45] T. Instruments, “CC1101 Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver (Rev. H),” 2012.