

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Jurandy Antonio do Nascimento e aprovada pela Comissão Julgada em 14/02/2007 J. Roldoff Orientador

Jurandy Antonio do Nascimento

## IEEE 802.15.4 - Redes de Sensores Sem Fio como Infra-estrutura para Comunicação entre Veículos e Sistemas de Controle

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Engenharia de Computação.  
Aprovação em 14/02/2007.

Orientador: Prof. Dr. José Raimundo de Oliveira

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. José Raimundo de Oliveira – UNICAMP
- Prof. Dr. Carlos Alberto dos Reis Filho - UNICAMP
- Prof. Dr. José Antenor Pomílio - UNICAMP
- Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho - UFES

Campinas, SP  
2007

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
CÍRCULO DE LANTAS  
DESENVOLVIMENTO DE COLEÇÃO

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

N17i Nascimento, Jurandy Antonio do  
IEEE 802.15.4 – redes de sensores sem fio como infraestrutura para comunicação entre veículos e sistemas de controle / Jurandy Antonio do Nascimento. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: José Raimundo de Oliveira  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Rodovias – Projetos. 2. Sistemas e recuperação de informação – Rodovias. 3. Sistemas de veículos autoguiados. 4. Veículos. I. Oliveira, José Raimundo de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: IEEE 802.15.4 - Wireless Sensor Network as Infrastructure for Inter-vehicle Communication and Control Systems

Palavras-chave em Inglês: Cooperative navigation, Cooperative perception, Traffic control, Navigation systems, Networks topologies, Vehicles, Wireless sensor networks

Área de concentração: Engenharia de Computação

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Carlos Alberto dos Reis Filho, José Antenor Pomílio e Teodiano Freire Bastos Filho

Data da defesa: 14/02/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

# Resumo

Devido ao crescente interesse em automação de rodovias e ao desenvolvimento e a viabilidade econômica de tecnologias de comunicação sem fio, surgiram nos últimos anos projetos para a comunicação entre veículos que possibilitam que dados de sensores locais, indicando situação de risco, sejam transmitidos para outros veículos de sua vizinhança para sinalizar a situação, ou mesmo para uma possível atuação no fluxo do tráfego local. É apresentada aqui uma infra-estrutura de comunicação sem fio que faz uso da especificação IEEE 802.15.4 para a comunicação entre veículos e que tem aplicações também em controle de sistemas, devido à sua característica versátil.

**Palavras-chave:** Navegação Cooperativa, Percepção Cooperativa, Controle de Tráfego, Sistemas de Navegação, Topologias de Redes, Veículos, Redes de Sensores sem Fio.

# Abstract

Due to the increasing interest on roads automation and to the development and the economic viability of wireless communication technologies, it has appeared in the last years projects to implement inter-vehicle communication links which makes possible that local sensors data, indicating risk situation, to be transmitted to others vehicles on its neighborhoods to signalize the situation or even to a possible actuation on the local traffic flow. It is presented here a wireless communication infrastructure that makes use of IEEE 802.15.4 specification for inter-vehicle communication and also for control systems applications due to its versatile characteristics.

**Keywords:** Cooperative Navigation, Cooperative Perception, Traffic Control, Navigation Systems, Networks Topologies, Vehicles, Wireless Sensor Networks.

# Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Raimundo de Oliveira, pela amizade, pelo incentivo, e por sua orientação.

Aos colegas do grupo de trabalho, Ana Beatriz, André Delai, Carlos Ruesta, Maurício e Tatiane.

Aos colegas do LCA, pela companhia, Adler, Dennis, Filipe, Gabriel, Jeremias, Patrícia, William, Pablo e todos com quem convivi.

A todos os professores da FEEC.

A toda minha família por todo apoio que tive.

*A minha esposa Mirian,  
Aos meus filhos Ana Clara e Francisco  
Aos meus pais, irmãos e sobrinhos.*

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>Glossário</b>	<b>x</b>
<b>Trabalhos Publicados Pelo Autor</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação: Aplicações	1
1.1.1 Navegação Cooperativa	2
1.1.2 Percepção Cooperativa	2
1.1.3 Redes Autônomas de Comunicação entre Veículos para Direção a Assistida	3
1.1.4 Sistemas de Controle com Módulos Separados	3
1.1.5 Redes Computacionais com Topologia Dinâmica	3
1.2 Motivação: Áreas de Pesquisa	4
1.2.1 Redes de Sensores Sem Fio – RSSF	4
1.2.2 Auto Configuração de Redes Dinâmicas	5
1.2.3 Protocolos de Comunicação e Encaminhamento de Mensagens em RSSF	5
1.2.4 Sistemas de Controle com Latência de Comunicação	6
1.2.5 Segurança de Comunicação em Sistemas com Poucos Recursos	6
1.3 Objetivos	6
1.4 Organização	7
<b>2 Trabalhos Relacionados, Topologias, Tecnologias e Protocolos em RSSF</b>	<b>8</b>
2.1 Topologias de Redes Sem Fio	10
2.1.1 Topologia Estrela	11
2.1.2 Topologia Árvore	11
2.1.3 Topologia Malha	12
2.1.4 Topologia Árvore-Grupos	13
2.2 Tecnologias de Comunicação Sem Fio	14

2.2.1	IEEE 802.16 – WMAN.....	15
2.2.2	IEEE 802.11 – WLAN.....	15
2.2.3	IEEE 802.15.1 – WPAN.....	16
2.2.4	IEEE 802.15.4 – LR – WPAN.....	17
2.2.5	Comparação entre as Tecnologias.....	18
2.3	Protocolos para Encaminhamento de Mensagens em RSSF.....	19
2.3.1	Protocolos Pró-ativos.....	19
2.3.2	Protocolos Reativos.....	20
2.3.3	Protocolos Especializados.....	21
2.4	Resumo do Capítulo e Próximos Tópicos.....	22
<b>3</b>	<b>As Redes VSN e AADIN.....</b>	<b>23</b>
3.1	A Rede VSN.....	24
3.2	A Rede AADIN.....	25
3.2.1	Coordenador da Rede.....	25
3.2.2	Pontos de Acesso – PA.....	26
3.2.3	Veículos.....	26
3.3	Mensagens na Rede AADIN.....	27
3.3.1	Mensagens de Difusão – <i>broadcast</i> .....	27
3.3.2	Mensagens de Ponto de Acesso para Veículo.....	29
3.3.3	Mensagens de Veículo para Ponto de Acesso.....	30
3.3.4	Mensagens de Veículo para Veículo.....	30
3.4	O Funcionamento das Redes.....	31
3.4.1	Estrutura dos Superframes das Redes.....	32
3.4.2	Velocidade Máxima dos Veículos para Comunicação.....	37
3.4.3	Endereçamento dos Veículos.....	38
3.4.4	Posicionamento das Mensagens no Superframe.....	40
3.5	Resumo do Capítulo e Próximos Tópicos.....	40
<b>4</b>	<b>Encaminhamento de Mensagens na Rede AADIN.....</b>	<b>41</b>
4.1	O Protocolo BSSP.....	44
4.1.1	Informações de Contato com Veículos.....	45
4.1.2	O Algoritmo da Busca.....	47
4.2	O Algoritmo EGOP.....	49
4.3	Resumo do Capítulo e Próximos Tópicos.....	51
<b>5</b>	<b>Conclusão e Trabalhos Futuros.....</b>	<b>52</b>
5.1	Modelo de Mobilidade para a Rede AADIN.....	53
5.1.1	Modelo de Mobilidade para Vias Urbanas.....	55
5.1.2	Modelo de Mobilidade para Rodovias.....	55
5.2	Arquiteturas para Implementação.....	55
5.2.1	Arquitetura Computacional para os Veículos.....	56
5.2.2	Arquitetura Computacional para os PAs.....	57
5.3	Resumo do Capítulo e do Trabalho.....	58
	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>60</b>

<b>Apêndice A – Principais Características da Especificação IEEE 802.15.4.....</b>	<b>A-1</b>
A.1 A Camada Física – PHY .....	A-2
A.1.1 Canais de Frequência .....	A-2
A.2 A Camada de Acesso ao Meio – MAC .....	A-4
A.2.1 Modos de Acesso ao Meio .....	A-4
A.3 Características Gerais .....	A-5
A.4 Estrutura dos Frames.....	A-7
A.4.1 Estrutura dos Frames e Tipos de Frames .....	A-8
A.4.2 Frames de Marcadores .....	A-11
A.4.3 Frames de Dados .....	A-11
A.4.4 Frames de Reconhecimento - ACK.....	A-12
A.4.5 Frames de Comandos MAC.....	A-13

# Lista de Figuras

2.1. Descentralização do controle da comunicação entre veículos .....	9
2.2 Topologia Estrela .....	11
2.3 Topologia Árvore.....	12
2.4 Topologia Malha e Comunicação Multi hop de A para B .....	13
2.5 Topologia Árvore-Grupos.....	14
3.1 VSN – Vehicle Star Network.....	24
3.2 AADIN.....	25
3.3 Mensagem de Difusão - broadcast.....	28
3.4 Mensagem de PA para o veículo.....	29
3.5 Mensagem de veículo para PA.....	30
3.6 Mensagem de veículo para veículo.....	31
3.7 Estrutura do Superframe da rede AADIN.....	33
3.8 Estrutura do Superframe das reded VSNs.....	34
3.9 Estrutura temporal dos Superframes das redes VSN e AADIN.....	36
3.10 Comunicação entre veículos A e B.....	37
3.11 Endereçamento dos veículos na rede AADIN .....	39
4.1 Algoritmos BSSP para busca de Veículo na Rede AADIN.....	42
4.2 Entrega de mensagem de veículo para PA mais próximo.....	43
4.3 Registros de Contato com Veículos.....	46
4.4 Busca por Veículo – Formação do Universo de Busca.....	47
4.5 Busca por Veículo – Formação da Geração de Veículos.....	48
4.6 Grafo de comunicação entre nós que se altera no tempo.....	50
5.1 Matriz de probabilidade de transição de posição do veículo .....	54
5.2 Módulo Embarcado.....	56
5.3 Arquitetura Computacional para um PA.....	57
A.1 Camadas e implementações da especificação .....	A-1
A.2 IEEE 802.15.4 – Estrutura de canais.....	A-3
A.3 Estrutura de um Superframe no modo com marcadores .....	A-5
A.4 Estrutura dos frames.....	A-7
A.5 MPDU – MAC Packet Data Unit.....	A-8
A.6 Campo de controle do cabeçalho do frame.....	A-9

A.7 Frame de Marcadores.....	A-11
A.8 Frame de Dados.....	A-12
A.9 Frame de Reconhecimeto – ACK.....	A-12
A.10 Frame de comandos MAC.....	A-13

## **Lista de Tabelas**

2.1: Comparação entre Tecnologias sem Fio.....	18
--	----

# Glossário

AADIN	– Autonomous Assisted Driving Inter-vehicle Network
AODV	- Ad hoc On-demand Distance Vector
BI	– Beacon Interval
BPSK	– Binary Phase-Shift Keying
BSS	- Basic Service Sets
BSSP	- Bee System Search Paradigm
CAP	– Contention Access Period
CCA	– Clear Channel Assessment
CD	- Centro de Distribuição
CFP	– Contention Free Period
CRC	- Cyclic Redundancy Check
CSMA-CA	– Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	- Clear To Send
DSDV	– Destination Sequenced Distance Vector
DSR	– Dynamic Source Routing
DSSS	– Direct Sequence Spread Spectrum
ED	– Energy Detection
ERB	– Estação Rádio Base
EGOP	- Evolving Graphs on Optimized Plans
ESS	- Extended Service Sets
FFD	- Full Function Device
GA	- Genetic Algorithm

GPS	– General Position System
GTS	– Guaranteed Time Slots
IBSS	- Independent Basic Service Sets
IEEE	– Institute of Electric and Electronic Engineers
I/O	- Input / Output
ISM	– Industrial Scientific & Medical
IFAC	– International Federation of Automatic Control
LEACH	– Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LQI	– Link Quality Indication
LR-WPAN	– Low Rate Wireless Personal Area Network
O-QPSK	– Offset Quadrature Phase Shift Keying
PA	– Ponto de Acesso
PAN	- Personal Area Network
PC	- Personal Computer
PROC	– Proactive Routing with Coordination
QoS	– Quality of Service
RF	- Rádio Frequência
RFD	- Reduced Function Device
RSSF	– Redes de Sensores Sem Fio
RTS	- Request To Send
SD	– Superframe Duration
TBF	– Trajectory Based Forwarding
TORA	– Temporally Ordered Routing Algorithm
VSN	– Vehicle Star Network
WiMAX	– Worldwide Interoperability for Microwave Access
Wi-Fi	– Wireless Fidelity
WLAN	– Wireless Local Area Network
WMAN	– Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	– Wireless Personal Area Network

# Trabalhos Publicados Pelo Autor

- [1].J. A. Nascimento, J. R. Oliveira. “Cooperative Navigation and Inter-vehicle Communication using IEEE 802.15.4 and Zigbee”. *In the Proceedings of First IFAC Workshop on Multivehicle Systems. (MVS'06)*, Salvador, Bahia, Brasil, pg. 8-12, Outubro de 2006.

# Capítulo 1

## Introdução

O desenvolvimento de sistemas que monitoram e controlam veículos, bem como o desenvolvimento de sistemas de controle, tem das Redes de Sensores Sem Fio - RSSF [1] uma contribuição importante para a formação da infra-estrutura de comunicação entre as partes dos sistemas. Como sistemas veiculares, podem-se destacar automóveis, aeronaves, embarcações, satélites, robôs, etc. Sistemas de controle, em estudo, são os sistemas onde os sensores e os atuadores estão em ambientes em que não seja possível, ou não seja desejável, realizar as ligações através de fios, ou seja, a comunicação entre os módulos deve ser feita por ondas de rádio.

Tal infra-estrutura permite que as trocas de dados e informações sejam feitas diretamente entre as partes interessadas sem que seja necessária uma coordenação central de todas as atividades de comunicação, o que permite que o processamento de informações seja distribuído e que a capacidade de processamento do coordenador central da rede seja conseqüentemente reduzida ou direcionada para tarefas mais específicas de monitoramento e controle geral.

### 1.1 Motivação: Aplicações

Entre as aplicações para esta infra-estrutura estão:

- Navegação Cooperativa em um grupo de veículos,
- Percepção Cooperativa no cumprimento de tarefas por um grupo de veículos,
- Redes autônomas de comunicação entre veículos para a direção assistida,
- Sistemas de Controle ou robôs com módulos fisicamente separados,

- Redes computacionais com topologia dinâmica.

### **1.1.1 Navegação Cooperativa**

A Navegação Cooperativa possibilita a troca de dados de sinalização, de alarme e de controle entre veículos de uma mesma proximidade sem a necessidade de comunicação de cada um dos veículos com a estação base de controle, como o que acontece em uma rede com topologia do tipo estrela. Esta comunicação entre veículos, em topologia tipo malha, possibilita que dados de sensores de um determinado veículo, que sinalizam uma situação de emergência ou de risco para os demais veículos, sejam transmitidos para os veículos de sua vizinhança e destes veículos para outros veículos mais distantes, com o objetivo de se evitar um acidente ou de se alertar sobre a ocorrência de algum incidente, como por exemplo um obstáculo. Entre os exemplos para esta aplicação podem-se destacar o controle de portos e de estacionamentos, a automação de estradas e vias públicas e o deslocamento de robôs móveis [2].

### **1.1.2 Percepção Cooperativa**

A Percepção Cooperativa possibilita que tarefas sejam feitas por um grupo de veículos, robôs por exemplo, e que os dados dos sensores destes veículos sejam mutuamente trocados para o cumprimento desta tarefa como em [3]. As informações dos sensores de cada veículo são constantemente trocadas entre eles, formando uma rede de comunicação do tipo malha e estes dados interferem constantemente nas ações a serem tomadas pelos robôs. Entre os exemplos, um que pode ser destacado é o resgate de pessoas em situações de catástrofes, onde a busca, o reconhecimento e o salvamento de vítimas podem ser agilizados com o uso de robôs que troquem informações em tempo real.

A navegação e a percepção cooperativas formam um grupo de interesse onde várias aplicações são desenvolvidas com o objetivo de implementar sistemas de robôs que se coordenam e que reconheçam um ambiente e suas condições no cumprimento de tarefas.

### **1.1.3 Redes Autônomas de Comunicação entre Veículos para a Direção Assistida**

Redes Autônomas de Comunicação entre Veículos para a Direção Assistida é basicamente um sistema de Navegação Cooperativa, proposto em [4], e que é detalhadamente descrito nos próximos capítulos. A idéia básica é que informações importantes de cada veículo, tais como obtidas de sensores de impacto, de sensores de chuva, de sensores de alteração de luminosidade, sensores de deslizamento, etc, sejam transmitidas para veículos que se encontrem nas proximidades para alertar os motoristas sobre uma situação de risco ou mesmo para indicar uma alternativa de desvio para que se evite um acidente. Pode-se ainda usar este sistema para comunicação entre veículos que não estejam numa mesma proximidade ou entre veículos e a estação de controle em um lugar remoto, o que torna este sistema uma poderosa ferramenta para monitoramento de segurança de veículos e para logística de serviços de frotas, diferenciando assim de um simples sistema de navegação cooperativa.

### **1.1.4 Sistemas de Controle com Módulos Separados**

Sistemas de Controle ou Robôs com módulos fisicamente separados são sistemas onde o controlador do sistema recebe dados de sensores e atuadores que podem estar em ambientes separados e que a conexão entre as partes não possa ou não se queira realizar por intermédios de fios. Como exemplos para esta aplicação estão os controles de iluminação pública ou de edifícios, os sistemas de guindastes e pontes rolantes em armazéns e portos, e os sistemas de controle de temperatura em grandes ambientes.

### **1.1.5 Redes Computacionais com Topologia Dinâmica**

Redes computacionais com topologia dinâmica são redes com comunicação sem fio entre os nós, onde os nós se encontrem em constante movimento ou que estejam constantemente entrando ou saindo

da rede, fazendo com que a topologia de comunicação da rede esteja, também, constantemente se alterando. A princípio todos os exemplos acima são implementações destas redes dinâmicas, com mais ou menos mudanças, acarretando mais ou menos complexidade de implementação. Podem-se ter redes com nós em movimento sem que a topologia se altere, como por exemplo um controlador conectado a módulos em movimento em que a conexão é do tipo estrela, ou seja, todos os módulos se comunicam diretamente com o controlador, independente de sua posição, e existem casos em que os módulos são dispostos em posições fixas e mesmo assim a topologia da rede pode ser dinâmica, como por exemplo em iluminação de edifícios ou controle de parâmetros e condições ambientais, onde os nós podem se associar ou se dissociar da rede (por falta de energia, por exemplo) e a rede deve se adaptar automaticamente à nova situação apresentada.

## **1.2 Motivação: Áreas de Pesquisa**

Estas aplicações e o desenvolvimento de suas soluções servem de fomento para algumas áreas de pesquisas acadêmicas, tais como:

- Redes de Sensores Sem Fio – RSSF,
- Auto-configuração de redes dinâmicas: adaptação automática de topologia,
- Estratégias e protocolos para o encaminhamento de mensagens em sistemas dinâmicos,
- Sistemas de controle com latência de comunicação,
- Segurança de comunicação em sistemas com poucos recursos.

### **1.2.1 Redes de Sensores Sem Fio – RSSF**

As RSSF, que são as ferramentas básicas para este trabalho, têm uma diversidade muito grande de especificações, implementações e aplicações. Desde as primeiras pesquisas, como o projeto Mica Motes desenvolvido na Universidade de Berkeley [5] e [6], como o  $\mu$ AMPS desenvolvido pelo MIT [7]

e as primeiras aplicações, tal como o projeto de monitoramento ambiental Great Duck Island [8], surgiram inúmeras propostas e desenvolvimento de tecnologias para a conexão de nós em uma rede de comunicação sem fio, tendo como objetivo a transmissão de dados de sensores, culminando na especificação IEEE 802.15.4 [9] que trata das camadas físicas (rádio frequência e enlaces - PHY) e do controle de acesso ao meio de comunicação (MAC), que é resumidamente apresentada no Apêndice A, o qual também apresenta as principais características das camadas PHY e MAC.

### **1.2.2 Auto-Configuração de Redes Dinâmicas**

A adaptação automática de topologia em redes dinâmicas tem como objetivo garantir o acesso de dados a cada um dos nós que compõem a rede e que uma mensagem originada em um nó da rede chegue ao seu destino de uma maneira mais rápida e eficiente possível com um menor custo computacional. Esta área de pesquisa visa basicamente buscar estratégias de comunicação para manter uma topologia ativa que atenda todos os nós da rede.

### **1.2.3 Protocolos de Comunicação e Encaminhamento de Mensagens em RSSF**

Em função da aplicação das RSSF, os protocolos de comunicação se diferenciam de várias formas para atender diferentes necessidades, como por exemplo os protocolos pró-ativos que mantêm sempre um caminho feito para a transmissão dos dados e os protocolos reativos que, dependendo da necessidade de transmissão de uma informação, vai descobrir o melhor caminho ou o caminho possível para que os dados cheguem até o nó destinatário ou ao Ponto de Acesso – PA - da rede. Estas estratégias de entrega de mensagens se tornam mais complexas à medida que a topologia da rede se torna mutável, ou seja, dinâmica, e com isto se abre um campo para pesquisas em métodos para descobrir e manter rotas de entrega de mensagens e canais de comunicação entre pontos distantes e não diretamente interligados.

## **1.2.4 Sistemas de Controle com Latência de Comunicação**

Sistemas de controle com latência de comunicação têm como objetivo a pesquisa do impacto que o atraso da comunicação sem fio traz ao controle do sistema, bem como propor e formalizar as soluções para eliminar ou minimizar o impacto desta latência da comunicação sobre o controle do sistema.

## **1.2.5 Segurança de Comunicação em Sistemas com Poucos Recursos**

Segurança de comunicação em sistemas com poucos recursos tem como objetivo a pesquisa na área de segurança e de qualidade de dados e de serviços em sistemas que têm como características principais o baixo consumo de energia e o baixo ciclo de comunicação – *duty cycle* - em uma rede com topologia dinâmica e não previsível.

## **1.3 Objetivos**

O objetivo deste trabalho é especificar uma rede de sensores sem fio para a aplicação em comunicação entre veículos e em sistemas de controle, com taxa de comunicação de até 250 Kbps, utilizando a especificação de comunicação IEEE 802.15.4 para as camadas físicas (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC), e implementações Zigbee [10] para as camadas de rede (NWK) e de apoio à aplicação (APS). Diferente de soluções já apresentadas, onde o interesse é a comunicação em banda larga para a transmissão de grande quantidade de dados e para o acesso a Internet, aqui o objetivo é a comunicação de dados de sensores e atuadores no controle de sistemas, bem como na segurança e assistência à navegação de veículos em rodovias, ou robôs em tarefas conjuntas.

Certamente, a transmissão de dados em banda larga traz uma quantidade grande de serviços que podem ser explorados, principalmente em sistemas veiculares e até em monitoramento remoto de sistemas de controle, mas a comunicação com baixa taxa de transmissão, como proposto aqui,

possibilita a construção de sistemas com tecnologia de baixo custo, com baixo consumo de energia e largamente difundida entre os fabricantes de componentes.

## 1.4 Organização

Neste trabalho são apresentadas as topologias e as tecnologias de comunicação sem fio e é apresentada uma proposta para a construção de uma rede para comunicação entre veículos com o objetivo de possibilitar a direção assistida e, para isto, nos próximos capítulos são abordados:

No capítulo 2 são apresentadas as topologias, as tecnologias de comunicação sem fio, especificadas pelo IEEE [11] e os trabalhos de comunicação interveicular relacionados, bem como os protocolos para o encaminhamento de mensagens em RSSF.

No capítulo 3 é apresentada a proposta da rede de comunicação usando a tecnologia IEEE 802.15.4 para a aplicação em direção assistida e cooperativa bem como para o auxílio à automação de rodovias e vias públicas.

No capítulo 4 são apresentadas as necessidades de comunicação entre os veículos, para a rede proposta, e os desafios de comunicação em topologias dinâmicas. São apresentadas propostas para a comunicação entre os veículos e os pontos de acesso (*gateways*) do sistema.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as expectativas para trabalhos futuros, com sugestões de modelos de mobilidade para os veículos que podem ser usados na simulação da rede; e arquiteturas computacionais para as partes integrantes da rede de comunicação entre veículos.

## Capítulo 2

# Trabalhos Relacionados, Topologias, Tecnologias e Protocolos em RSSF

O desenvolvimento de produtos e o interesse em pesquisa para a comunicação entre veículos têm sido voltados para garantir a comunicação em banda larga, tendo como objetivo principal o acesso a Internet em veículos, como apresentado em [12], para o projeto FleetNet que teve o apoio do Ministério da Educação e Pesquisa do governo da Alemanha, onde os serviços em destaque necessitam de troca de grande quantidade de dados, tais como *chats*, ou páginas de conversação, jogos interativos e informações de navegabilidade, como abordados em [13], [14] e [15] que descrevem projetos que se iniciaram a partir do FleetNet e que incluíram comunicação de voz e transmissão de imagens. Institutos de pesquisas também mantêm laboratórios e áreas específicas para a pesquisa e para o desenvolvimento de tecnologias na área de comunicação entre veículos, como no projeto MVWT desenvolvido pelo California Institute of Technology [16]. Contudo, estas pesquisas são desenvolvidas utilizando equipamentos baseados em plataformas PC com aplicativos que se comunicam utilizando interfaces voltadas para a comunicação ponto a ponto em banda larga, como o Wi-Fi – IEEE 802.11 [17], ou utilizando hardware proprietário.

O foco destes trabalhos tem sido, além de permitir o acesso a dados e a informações em banda larga, possibilitar também a descentralização do controle de comunicação entre os veículos, ou nós, de uma rede de comunicação, como apresentado na figura 2.1. Este interesse vem da necessidade de troca rápida de informações entre os veículos em situações de emergência.

Em sistemas onde a comunicação é centralizada e gerenciada por um coordenador único, topologia tipo estrela, cada nó participante da rede executa a comunicação com o coordenador e, para transmitir uma mensagem aos veículos vizinhos o nó que origina a mensagem a envia para o

coordenador e este a retransmite para os nós destinatários. Nestas situações, além de se acarretar um atraso na troca de mensagens e na sobrecarga de processamento do coordenador, pode-se deparar, também, com uma deficiência do sistema se alguns veículos estiverem em áreas de sombra de comunicação com o coordenador central. Em sistemas de comunicação móvel, como é o caso da telefonia celular, é comum existirem áreas de sombra de comunicação em locais afastados dos centros urbanos, ou mesmo em locais com muitas edificações, e para a eliminação total destas áreas de sombra em todos os lugares em que o sistema se propõe a prestar o serviço, seria necessário um investimento muito grande em infra-estrutura para a instalação de estações rádio bases para garantir a cobertura de toda área de utilização do sistema.

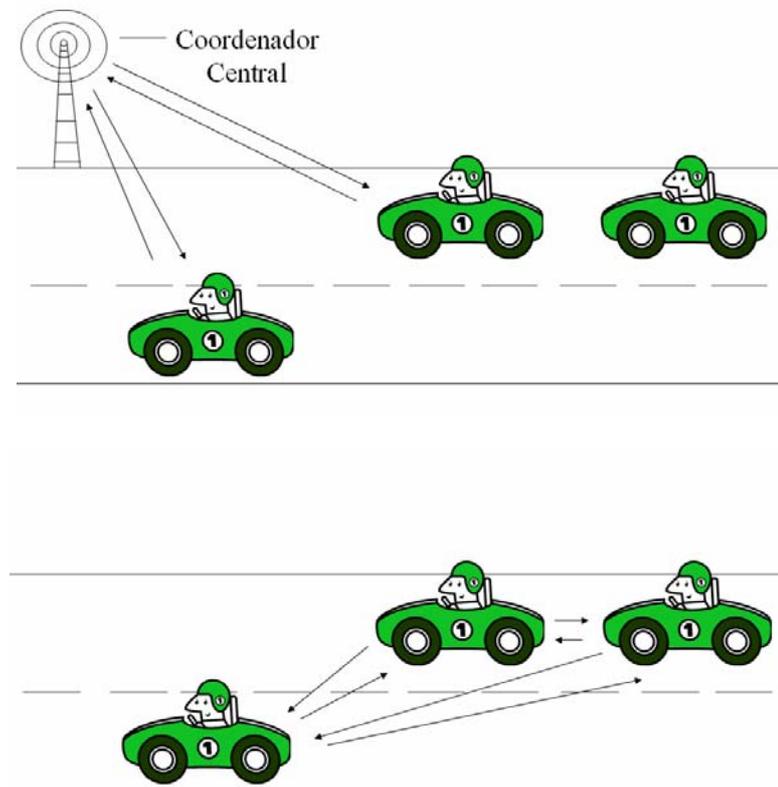


Fig. 2.1: Descentralização do controle da comunicação entre veículos.

A comunicação entre veículos e o desenvolvimento de sistemas de controle que utilizam a comunicação entre os módulos, de uma forma descentralizada e com baixa taxa de transmissão de dados, têm despertado interesse principalmente por existirem situações onde o ciclo de comunicação é

baixo e a quantidade de dados a serem transmitidos também é baixa. Nestes cenários, o surgimento de tecnologias como as que são usadas em Redes de Sensores Sem Fio – RSSF, com baixo custo de implementação e baixo consumo de energia, permite desenvolver sistemas complexos que abrangem uma vasta área de pesquisa, desde o desenvolvimento de plataformas de baixo custo até a elaboração de algoritmos de encaminhamento e entrega de mensagens entre os nós da rede, como também a elaboração de algoritmos de codificação das mensagens para a segurança dos dados transportados e para a garantia da qualidade de serviço.

Esta proposta visa, além de usar as RSSF para compor a infra-estrutura do sistema, fazer uso também de estações denominadas *gateways*, ou Pontos de Acesso – PA para a comunicação com o coordenador central do sistema em áreas distantes do coordenador. Ou seja, busca-se compor um sistema que utilize o benefício de todos os meios de comunicação para compor uma infra-estrutura eficiente e dinâmica, principalmente, e diferente dos sistemas dos trabalhos relacionados, busca-se formar a infra-estrutura de comunicação através de canais de baixa taxa de comunicação entre os veículos.

## 2.1 Topologias de Redes Sem Fio

As conexões entre os nós de uma rede de comunicação sem fio configuram a topologia da rede, ou seja, a forma em que a rede é organizada para interligar os nós para a comunicação. Existem alguns tipos[44] de topologia para a interconexão dos nós de uma rede, onde as mais aplicadas são:

- Topologia Estrela
- Topologia Árvore
- Topologia Malha
- Topologia Árvore – Grupos

Estas topologias determinam a forma de comunicação entre os nós e a forma de coordenação da comunicação na rede, como também influenciam diretamente na estratégia de configuração das rotas para o envio das mensagens pela rede.

### 2.1.1 Topologia Estrela

A Topologia Estrela (*Star Topology*) é a mais simples, onde cada nó se comunica direta e unicamente com o coordenador da rede e este mantém o controle sobre todo o fluxo de informações de/para os nós da rede, como apresentado na figura 2.2. Este tipo de conexão é largamente usado em redes de comunicação sem fio, onde os dados e o controle são centralizados em um coordenador e este distribui tarefas ou executa o link de comunicação entre nós. Como exemplos deste tipo de rede estão desde os computadores pessoais que se interligam a periféricos, através de *bluetooth* [18], até as redes de telefonia celular que mantêm a comunicação de todos os celulares de uma determinada área através da estação rádio base desta área. A comunicação entre dois celulares passa, não só pelo controle do coordenador central, como também seus sinais de dados, ou voz, também passam pelas estações locais.

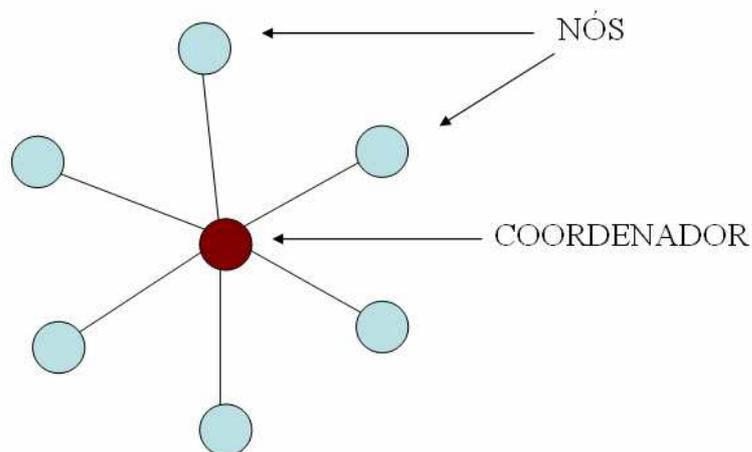


Fig. 2.2: Topologia Estrela.

### 2.1.2 Topologia Árvore

A Topologia Árvore (*Tree Topology*) permite que o coordenador da rede se comunique com nós roteadores e estes nós roteadores se comuniquem com nós de funções específicas, podendo formar assim grupos de nós (*clusters*) coordenados pelo roteador, como apresentado na figura 2.3.

Exemplos deste tipo de rede são as redes locais de computadores, através de interfaces Wi-Fi, onde o coordenador da rede se comunica com os computadores e estes podem ter conexões com periféricos exclusivamente ligados a eles, como impressoras, modems e unidades de armazenamento de massa. Quando um aplicativo em um determinado computador necessita imprimir algum arquivo, ele transmite este arquivo para o computador destino, através do controle do coordenador central e então o computador destino envia o arquivo para a impressora conectada a ele através de uma interface *bluetooth*, por exemplo.

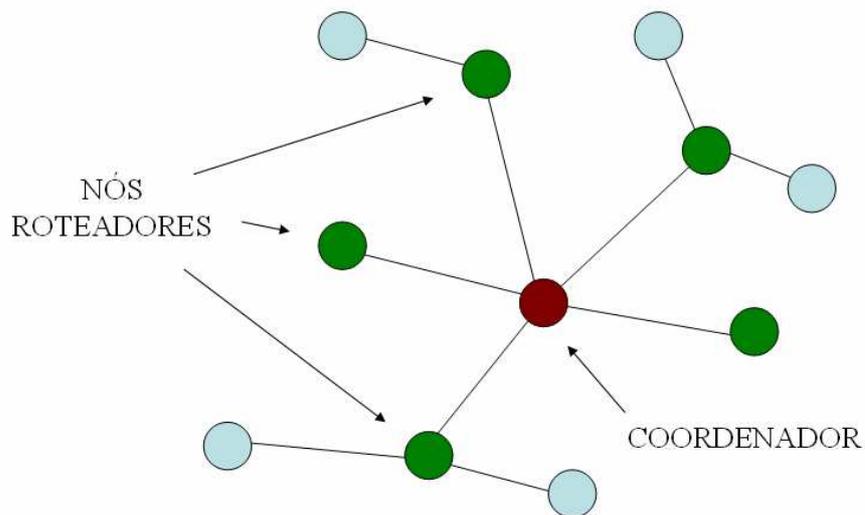


Fig. 2.3: Topologia Árvore.

### 2.1.3 Topologia Malha

A Topologia Malha (*Mesh Topology*) permite que cada nó se comunique, ponto a ponto, com os nós de sua vizinhança, como apresentado na figura 2.4.

Uma rede de comunicação sem fio “*Ad hoc*”[46] é uma rede de conectividade dinâmica onde cada nó é um roteador de dados que busca transmitir dados para outros nós. A determinação de quais nós transmitem dados é feita dinamicamente baseada na conectividade momentânea da rede.

Uma rede com comunicação “Multi hop Ad hoc” é uma rede onde um nó tem a capacidade de transmitir uma mensagem para um nó que não esteja em seu alcance, usando o elo de comunicação com os nós vizinhos e a capacidade destes nós de transmitirem para outros nós até que a mensagem chegue ao destino desejado.

Exemplos deste tipo de rede são as redes de monitoramento de parâmetros ambientais, onde os nós se interligam para transmitir os dados, de temperatura por exemplo, até o coordenador central da rede, ou até o Ponto de Acesso – PA da rede. A temperatura medida em um determinado ponto que está sendo monitorado passa por nós roteadores até alcançar a estação coordenadora, ou o PA. Estes nós roteadores mantêm as informações das conexões necessárias para a transmissão das mensagens até seus destinos.

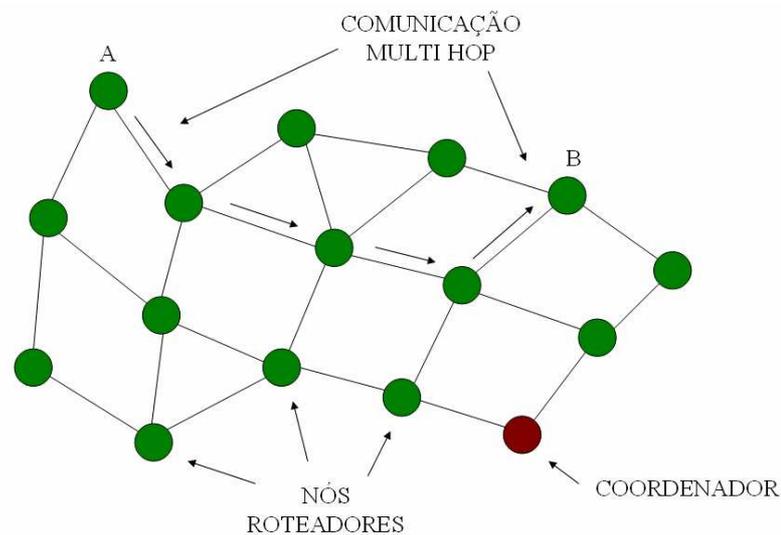


Fig. 2.4: Topologia Malha e Comunicação Multi hop de A para B.

#### 2.1.4 Topologia Árvore - Grupos

A Topologia Árvore - Grupos (*Tree Cluster Topology*) é uma composição da topologia do tipo árvore com sub-redes do tipo estrela, onde a comunicação entre os nós roteadores é executada como na topologia do tipo malha, como apresentado na figura 2.5. Nesta topologia, cada roteador pode ser o coordenador de uma pequena rede do tipo estrela, onde os nós subordinados a ele se comunicam

unicamente com este nó roteador e as mensagens podem trafegar pelos nós roteadores até chegar ao coordenador central ou até um outro nó roteador da rede.

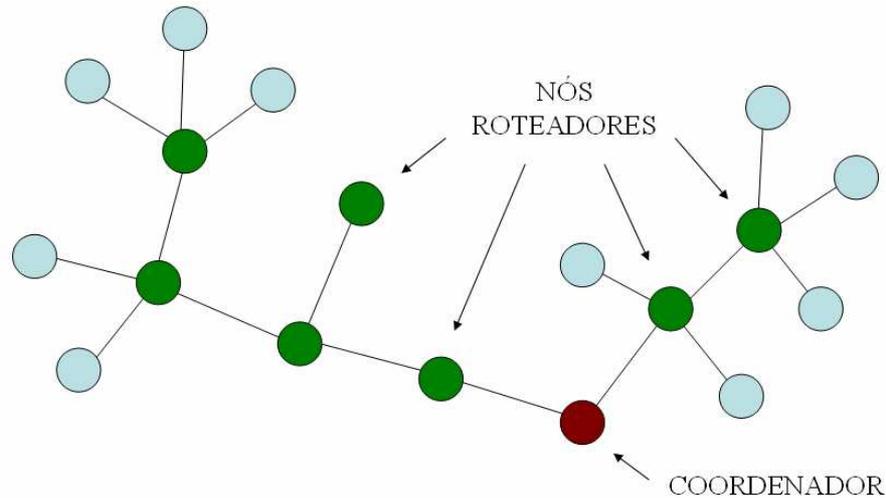


Fig. 2.5: Topologia Árvore – Grupos.

## 2.2 Tecnologias de Comunicação Sem Fio

Entre as tecnologias de comunicação sem fio, especificadas pelo IEEE, e que têm implementação comercial, destacam-se as seguintes:

- IEEE 802.16 – WMAN – Wireless Metropolitan Area Network
- IEEE 802.11 – WLAN - Wireless Local Area Network
- IEEE 802.15.1 – WPAN - Wireless Personal Area Network
- IEEE 802.15.4 – LR WPAN – Low Rate Wireless Personal Area Network

Estas especificações determinam as frequências de transmissão, as formas de modulação do sinal, os canais de comunicação e a forma de acesso ao meio para obter um canal de comunicação.

### **2.2.1 IEEE 802.16 - WMAN**

A tecnologia IEEE 802.16 – WMAN – Wireless Metropolitan Area Network [19], comercialmente conhecida como WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access, é especificada para prover acesso a uma rede de comunicação de dados em banda larga até a uma distância de 50 km da estação rádio base – ERB - da rede, e enlace de comunicação de até 70 Mbps. A comunicação é estabelecida entre os nós da rede e o controlador central em uma configuração ponto-multiponto, ou estrela, podendo também fornecer conexão em topologia malha, permitindo a comunicação nó-nó da rede. O objetivo principal desta tecnologia é prover acesso à rede para dispositivos móveis em uma área metropolitana, servindo como parte final (*last mile*) da infra-estrutura de conexão de banda larga.

Existem dois padrões: IEEE 802.16d para nós fixos e o IEEE 802.16e para nós móveis. No WiMAX fixo, o usuário tem acesso aos serviços apenas através de uma ERB, e opera na faixa de frequência não licenciada de 5.8 GHz e nas faixas licenciadas de 2,5, 3,5 e 10,5 GHz, com alcance de até 40 Km com visada direta, e até 10 Km para áreas densamente povoadas. No WiMAX móvel, o usuário tem acesso aos serviços, podendo comutar de uma ERB para outra, ou seja, pode estar em movimento em velocidade de até 100 km/h.

As desvantagens desta tecnologia para a especificação deste trabalho é o alto custo dos equipamentos, devido tanto à comunicação em banda larga como à potência de transmissão necessária para cobrir as distâncias de conexão especificadas, e à topologia de comunicação estrela, que faz com que a comunicação seja centralizada pelo coordenador da rede, no caso do IEEE 802.16d, enquanto que no caso do IEEE 802.16e a tecnologia ainda está na fase final de desenvolvimento, o que torna os equipamentos existentes de custo muito alto.

### **2.2.2 IEEE 802.11 - WLAN**

A tecnologia IEEE 802.11 – WLAN – Wireless Local Area Network, comercialmente conhecida como Wi-Fi – Wireless Fidelity, é especificada para prover acesso a uma rede de comunicação de

dados de banda larga em uma distância curta, e é geralmente usada como Ethernet [20] móvel para o acesso a uma rede local de computadores.

Esta especificação faz uso da faixa de frequência de 2,4 e 5,7 GHz de uso não licenciado, denominado como banda ISM - Industrial, Scientific & Medical, e tem como principais características a interligação de computadores em um ambiente interno com distância de comunicação de até 100 m. O número de nós da rede é limitado a 32 e a taxa de comunicação pode alcançar até 54 Mbps. As principais configurações de conexão a uma rede Wi-Fi são: Basic Service Sets – BSS, onde os nós da rede se comunicam entre si através de um ponto de acesso – PA, formando uma topologia estrela; Extended Service Sets – ESS, onde várias BSS se interligam através de um Centro de distribuição – CD, ou Distribution System; e Independent Basic Service Sets – IBSS, onde os nós se comunicam diretamente uns com os outros com conexão ponto a ponto.

Embora a taxa de comunicação seja elevada, esta tecnologia é muito limitada para esta aplicação, em função do número reduzido de nós que podem ser ligados na rede, o que compromete a construção de uma infra-estrutura que se propõe a interligar veículos.

### **2.2.3 IEEE 802.15.1 - WPAN**

A tecnologia IEEE 802.15.1 – WPAN – Wireless Personal Area Network, comercialmente conhecida como Bluetooth, é especificada para interconexão de periféricos a um computador ou interconexão de equipamentos. Mais precisamente, a idéia desta tecnologia é a substituição de cabos por uma conexão sem fio. Ela opera com 79 canais na faixa de 2,4 GHz (2,402 a 2,480 GHz) com alcance de até 100 m e com capacidade de transmissão de até 1 Mbps o que a torna eficaz para transmitir áudio digitalizado. A topologia da rede é do tipo estrela, denominada como piconet, e tem capacidade para interconectar até 7 nós ao coordenador.

Esta tecnologia se difundiu muito como conexão de voz em equipamentos de som e celulares e na conexão de periféricos a um computador pessoal, substituindo muitas vezes as conexões feitas pelas portas seriais.

## 2.2.4 IEEE 802.15.4 – LR - WPAN

A tecnologia IEEE 802.15.4 – LR WPAN – Low Rate Wireless Personal Area Network, comercialmente conhecida como ZigBee, é especificada para interconexão de rede de sensores sem fio, com aplicação voltada para o controle e monitoramento de sensores e atuadores de baixo custo. Ela está especificada para operar em três faixas diferentes de frequência: 868 MHz, com um canal, para uso na Europa, 915 MHz, com 10 canais, para uso nos Estados Unidos e Austrália, e 2.4 GHz, com 16 canais, para uso em todo o planeta, com taxas de transferências limitadas em 20 Kbps, 40 Kbps e 250 Kbps, respectivamente, em um alcance de até 100 m.

A rede interligada por esta especificação pode estar configurada tanto em topologia estrela como em topologias tipo árvore ou malha e tem capacidade para interligar até 65535 nós no modo reduzido de endereçamento, ou seja, tem capacidade de endereçamento de 16 bits, ou ainda no modo completo de endereçamento especificado pelo IEEE pode ter até 64 bits para o endereçamento de nós, o que faz com que a capacidade de endereçamento seja muito grande, permitindo que os aplicativos possam abranger uma área grande de cobertura e com um número grande de nós.

Outra característica desta tecnologia é a preocupação com o baixo consumo dos nós, pois para uma comunicação com baixa quantidade de dados e com acesso esporádico à rede, o nó pode permanecer boa parte do tempo com o rádio desligado, fazendo com que o consumo de energia seja muito baixo.

Cada nó da rede pode ser do tipo FFD – Full Function Device, com capacidade de ser o coordenador local de um grupo, *cluster*, ou o coordenador da rede e com capacidade de comunicação com qualquer tipo de nó da rede; ou pode ser do tipo RFD – Reduced Function Device, com capacidade de comunicação apenas com o nó do tipo FFD em única conexão, e tem como função básica ser o elemento de aplicação mais simples para terminar as pontas da rede com funções de sensor ou atuador.

## 2.2.5 Comparação entre as Tecnologias

A tabela 2.1 apresenta as principais características das tecnologias, de comunicação sem fio, mencionadas acima, tais como faixas de frequência e taxas de transferência de dados pelos dispositivos. A escolha da tecnologia especificada pelo IEEE 802.15.4 se deve às características de conexão da rede, ou seja, da versatilidade de topologias que se pode construir uma rede e também pela versatilidade que um nó tem para acessar a rede, permitindo que um acesso para transmissão de dados possa ser feito em até 15 ms, o que é muito importante em sistemas dinâmicos, como o proposto aqui.

IEEE	802.11a	802.11g	802.11b	802.15.1	802.15.4
Faixa Freq.	5.7GHz	2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz 915MHz 868MHz
Taxa Transm.	54Mbps	54Mbps	11Mbps	1Mbps	250Kbps 40Kbps 20Kbps
Tamanho Pilha	1MB			1MB	20KB
Tipo de Dados	Digital (áudio & vídeo)			Digital (áudio)	Digital
Num. de Nós	32			8	65535
Consumo	Alto			Médio	Muito baixo
Topologias	Estrela			Estrela	Estrela/Árvore/Malha
Aplicação	<b>Ethernet sem fio</b>			<b>Cabos</b>	Controle & Monitoramento

Tab. 2.1 – Comparação entre Tecnologias de Comunicação sem Fio.

A tecnologia IEEE 802.16 não foi colocada nesta tabela de comparação por ter sua aplicação voltada mais para o fornecimento de ponto final de conexão de serviço (*last mile*), o que não é aplicável ao caso proposto aqui e também por ter custo muito elevado de equipamentos, o que inviabilizaria uma possível implementação da rede. Existem outras tecnologias de comunicação sem fio que não foram abordadas aqui, como por exemplo o HomeRF [21], Nanonet [22], RF-232 [23], Spike [24] e WirelessUSB [25], por não serem padrões abertos ou por serem específicas para aplicações desenvolvidas pelas empresas que as criaram, com módulos proprietários.

## **2.3 Protocolos para Encaminhamento de Mensagens em RSSF**

Existem vários algoritmos e estratégias para o encaminhamento de mensagens em RSSF, dependendo do tipo da aplicação e da topologia em que está organizada a rede. Geralmente, os protocolos que foram desenvolvidos consideram a rede com topologia do tipo malha, ou seja, os nós são interligados, têm a capacidade de comunicação multi hop, e estão dispostos e fixos em uma área restrita, ou seja, os nós não se movimentam, o que caracteriza uma topologia estática. A maioria destes protocolos foi desenvolvida para redes Ad-hoc genéricas e adaptadas para RSSF sem, entretanto, considerar suas restrições e características. Os protocolos mais conhecidos são os protocolos pró-ativos e os protocolos reativos, descritos a seguir, embora já exista um grande número de protocolos em desenvolvimento e sugeridos, dependendo da aplicação que se faz da rede.

No capítulo 4 são descritos algoritmos, sugeridos neste trabalho, para o encaminhamento de mensagens para a rede proposta aqui - AADIN. Estes algoritmos levam em conta a dinâmica da rede e a distribuição de pontos de acesso espalhados e têm como objetivo fornecer a solução computacional mais eficiente para a comunicação, por um lado entre veículo e sistema, e por outro lado entre sistema e veículo.

### **2.3.1 Protocolos Pró-ativos**

Protocolos pró-ativos são protocolos de comunicação em redes no qual os dados devem ser constantemente transmitidos, como por exemplo em sistemas de leitura de fluxo de água em canais. Nestes protocolos são previstas rotinas de descobrimento de rotas como também são armazenadas tabelas de encaminhamento de mensagens e pacotes de sinalização para construção e manutenção de uma rota de dados.

Exemplos deste tipo de protocolo são:

### **DSDV – Destination Sequenced Distance Vector [26] e [27]**

Neste protocolo, cada nó roteador sinaliza periodicamente sua visão da topologia de interconexão dos nós, fazendo com que as rotas existentes na rede sejam atualizadas para garantir o melhor percurso possível para uma mensagem.

### **PROC – Proactive Routing with Coordination [28]**

Este protocolo cria periodicamente rotas dos nós da rede até um ponto de acesso em uma topologia tipo árvore, fazendo com que estas rotas utilizem o menor número possível de nós. Os nós que não fazem parte desta rota, devem se comunicar com algum nó da rota para elegê-lo como cabeça de um grupo, ou *cluster*. Assim, os nós que não fazem parte da rota principal podem reduzir ao máximo as funções de comunicação para economizar energia.

### **TinyBeacon [29]**

Utilizado como padrão na plataforma do projeto Mica Motes, este protocolo cria periodicamente, através de uma sinalização enviada pelo ponto de acesso, uma árvore de encaminhamento de mensagens de menor distância, em saltos, e com maior confiabilidade, calculada a partir dos pacotes corretos recebidos, desde o ponto de acesso até os extremos da rede. Estas rotas são usadas pelos nós até a definição da próxima árvore de encaminhamento de mensagens.

## **2.3.2 Protocolos Reativos**

Protocolos Reativos são protocolos de comunicação de dados no qual os dados somente são transmitidos quando há a necessidade de reportá-los, como nos casos de monitoramento de segurança em edifícios ou de condições ambientais de exceção como em alarmes de incêndio. Nestes casos, muitas vezes, a rota de entrega deve ser descoberta durante a transmissão da mensagem.

Exemplos deste tipo de protocolos são:

### **DSR – Dynamic Source Routing [30]**

Neste protocolo, cada mensagem transmitida na rede, carrega em seu cabeçalho a rota completa desde o nó remetente até o ponto de acesso ou até o nó destinatário da mensagem.

### **AODV- Ad hoc On-demand Distance Vector [31]**

Este protocolo é uma modificação do protocolo DSR, no qual as mensagens seguem para um nó destino através de informações contidas nos nós e que determinam a rota de entrega, denominado encaminhamento pulo a pulo, ou *hop by hop*.

### **TORA – Temporally Ordered Routing Algorithm [32]**

Este protocolo prevê rotas alternativas para o destino das mensagens, com o objetivo de minimizar os efeitos de mudanças da topologia com a entrada e saída de nós da rede.

## **2.3.3 Protocolos Especializados**

À medida que foram sendo desenvolvidas aplicações para as RSSF, foram desenvolvidos também protocolos de encaminhamento de mensagens mais adequados para estas aplicações, visando aumentar a eficiência da comunicação, como também diminuir o consumo de energia dos nós da rede.

Alguns exemplos destes desenvolvimentos são:

### **LEACH – Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy [33] e [34]**

Este algoritmo realiza periodicamente eleições para líderes de grupos, *clusters*, e uma vez eleitos os líderes os nós, se associam a eles e eles configuram o melhor caminho de acesso aos pontos de acesso do sistema. Desta forma, é configurada uma topologia árvore-grupos onde os nós ligados aos líderes dos grupos podem entrar em um estado de economia de energia e o líder fica encarregado de manter as rotas e de servir de elo de comunicação na rede.

### **TBF – Trajectory Based Forwarding [35] e [36]**

Neste tipo de algoritmo o encaminhamento de mensagens depende da localização física dos nós e quando uma mensagem é endereçada a um determinado nó, é calculada a função  $f(x)$  que descreve a rota do ponto inicial até o nó destinatário e então a mensagem é transmitida. Ao receber a mensagem, cada nó verifica se sua localização é um ponto que faz parte da função ou não e, se for, encaminha a mensagem adiante, e se não for não encaminha.

## **2.4 Resumo do Capítulo e Próximos Tópicos**

Neste capítulo foram citados os trabalhos relacionados ao projeto de comunicação entre veículos, como também foram apresentadas as topologias que podem ser formadas por uma rede de comunicação sem fio e as tecnologias de comunicação sem fio, especificadas pelo IEEE. Finalmente foram apresentados alguns protocolos para o encaminhamento de mensagens em RSSF.

No próximo capítulo é feita a proposta formal para uma rede de comunicação entre veículos, abordando os componentes da rede, os tipos de mensagens que trafegam na rede, o detalhamento do funcionamento da rede e suas implicações.

## Capítulo 3

### As Redes VSN e AADIN

A especificação apresentada aqui tem como objetivo criar uma infra-estrutura de comunicação sem fio para ser usada em automação de rodovias e vias públicas em geral e serve tanto para a conexão entre sensores de um veículo, com um coordenador local ao veículo, em uma rede de topologia do tipo estrela, denominada VSN – Vehicle Star Network, como também usar este coordenador local como roteador de uma rede de comunicação entre veículos, denominada AADIN – *Autonomous Assisted Driving Inter-vehicle Network*, cuja topologia é do tipo árvore-grupos com comportamento dinâmico, ou seja, os nós da rede, além de serem de número indeterminado podem, também, estar constantemente se movimentando.

A rede de comunicação entre veículos para a direção assistida, AADIN, proposta, tem as seguintes características: a tecnologia usada é a especificada pelo padrão IEEE 802.15.4, apresentada de forma resumida no Apêndice A, com “link” de comunicação na faixa de 2,4 GHz e topologia do tipo Árvore-Grupos, no qual cada grupo (*cluster*) da árvore constitui uma rede interna ao veículo, VSN, de topologia estrela, que conecta o coordenador local aos sensores e atuadores do veículo.

A topologia da rede AADIN é, na verdade, uma topologia de configuração dinâmica, pois cada nó, ou veículo, é considerado um nó roteador em movimento. Os veículos se comunicam entre si para formar a estrutura global da rede, e a comunicação entre os veículos é feita no tempo em que eles tiverem em uma área próxima o suficiente para que os rádios alcancem os sinais e apenas durante o intervalo de tempo em que houver esta proximidade. A distância admitida para a comunicação entre veículos é de 100m de visada direta. A comunicação do tipo Multi hop permite que uma mensagem originada em um veículo seja passada para outro veículo e deste para outros até que a mensagem

chegue ao destino, quer seja outro veículo, quer seja um ponto de acesso da rede – PA com o coordenador central.

### 3.1 A Rede VSN

A rede intra-veicular, denominada VSN, como apresentada na figura 3.1, tem um coordenador (FFD) central e vários sensores e atuadores (RFD) interligados ao coordenador em topologia estrela. Os sinais dos sensores, tais como temperatura e pressão dos pneus, sensor de deslizamento (ABS), sensor de impacto (ou de colisão), sensor de rotação do motor, sensor de velocidade do veículo, sensor de temperatura do motor e sensor de luminosidade, etc., são enviados ao coordenador em situações de exceção, ou seja, em alguma situação pré-estipulada como não normal, como por exemplo em detecção de freada brusca ou deslizamento. Estas informações podem também ser transmitidas pelos sensores quando solicitadas pelo coordenador, quando então são analisadas e retransmitidas para os veículos de sua proximidade se for reconhecida uma situações de emergência.

É conectado diretamente ao hardware do coordenador um GPS – *General Position System*[45], um dispositivo para posicionamento global, que tem como objetivo não só fornecer a informação da localização física do veículo como também, e principalmente, servir de referência de tempo para os marcadores, como será apresentado no item 3.4, o qual tem papel fundamental no funcionamento síncrono do sistema. A informação da localização física é usada para a busca dos pontos de acesso mais próximos em um cálculo apresentado no capítulo 4.

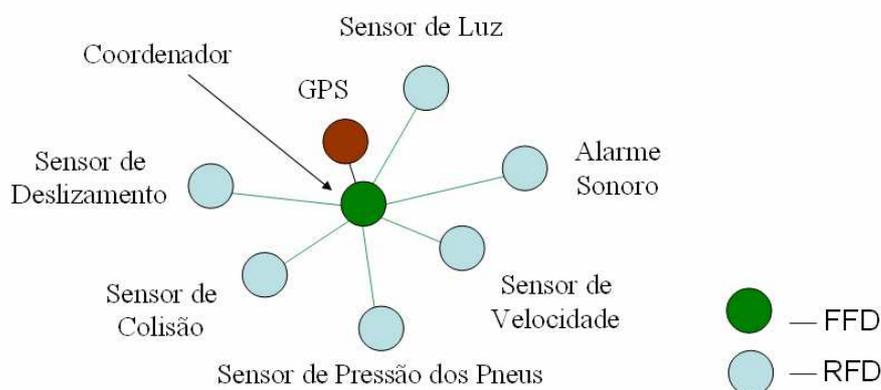


Fig 3.1: VSN – Vehicle Star Network.



posição física mais provável que um veículo se encontra na rede e, com isto, escolher o melhor ponto de acesso para o envio de mensagens endereçadas para este veículo. Cabe ao coordenador reconhecer os veículos presentes na rede, através das mensagens que circulam nos pontos de acesso e manter uma base de informação atualizada para executar uma pesquisa de localização de veículo.

O coordenador da rede pode estar fisicamente instalado em um determinado ponto de acesso da rede.

### **3.2.2 Pontos de Acesso - PA**

Os pontos de acesso (*gateways*) são pontos de comunicação da rede que são instalados em posições fixas, nas vias e rodovias, e que têm como função principal executar o elo de comunicação entre os veículos e o coordenador da rede. Os pontos de acesso podem também executar a função de referência física para os veículos em uma implementação simplificada da rede AADIN, fornecendo sua posição global como informação que é usada pelos veículos para o encaminhamento de mensagens pela rede, como descrito no capítulo 4.

### **3.2.3 Veículos**

Os veículos constituem os nós da rede AADIN e suas principais características como dispositivos FFD são:

- Movimentam-se pelas vias em velocidades nos limites: 0 a 120 km/h;
- Comunicam-se com os veículos de sua proximidade com alcance de: 50 a 100m;
- Comunicam-se com os Pontos de Acesso da rede;
- Transmitem mensagens de alerta em situações de emergência;
- Retransmitem mensagens de alerta por até uma distância de 15 km ou por até 30 min da origem da mensagem;

- Têm identificador único baseado na especificação de endereço de 64 bits do IEEE para a rede;
- Têm capacidade de retransmitir uma mensagem endereçada a outro veículo ou endereçada ao coordenador da rede, caracterizando uma comunicação Multi hop Ad hoc.
- Têm capacidade de sincronismo com o marcador “virtual” do coordenador central através do sinal de tempo de referência obtido do GPS, (ver seção 3.4.1);
- Têm capacidade de gerar o marcador local para a rede VSN que sincroniza os sensores.
- Coordenam as redes VSN reconhecendo os nós sensores, dispositivos RFD, analisando seus dados e reconhecendo uma situação de emergências através dos dados destes sensores.

### **3.3 Mensagens na Rede AADIN**

Na rede AADIN podem circular os seguintes tipos de mensagens:

- Mensagens de Difusão - *broadcast*
- Mensagens de Ponto de Acesso para Veículo
- Mensagens de Veículo para Ponto de Acesso
- Mensagens de Veículo para Veículo

#### **3.3.1 Mensagens de Difusão - *broadcast***

Em situações de emergência um veículo deve enviar para a sua vizinhança uma mensagem endereçada a todos os veículos da proximidade e esta mensagem deve ser retransmitida para outros veículos que não estiverem em conexão direta com o veículo transmissor pelos veículos que receberam

a mensagem, como apresentado na figura 3.3. Este tipo de mensagem visa transmitir um sinal de alerta para uma situação de emergência, e deve indicar a situação nos demais veículos com sinalizações sonoras ou visuais.

As situações de emergência que podem gerar uma mensagem de difusão são:

- Colisão
- Deslizamento
- Falha mecânica (como pneu estourado)

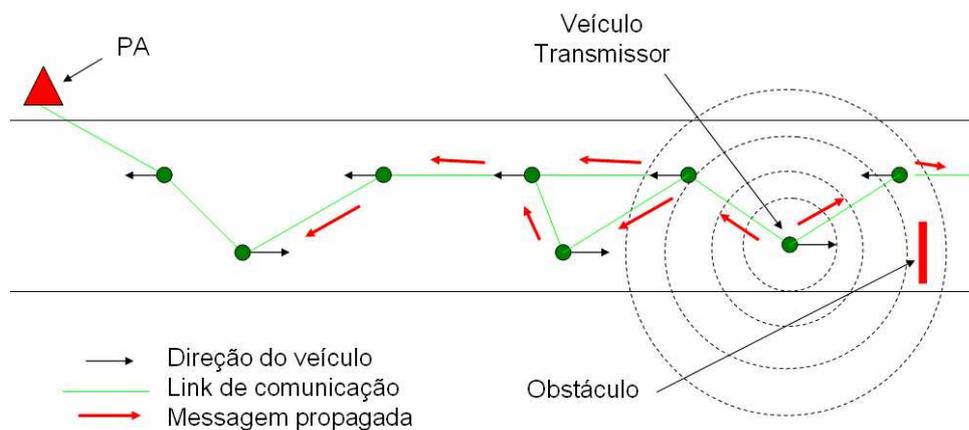


Fig 3.3: Mensagem de Difusão – *broadcast*.

Além das mensagens emitidas em situações de emergência, os veículos emitem também mensagens de difusão para a busca por outros veículos para a comunicação. Estas mensagens não são retransmitidas como as mensagens de situações de emergência e servem apenas para estabelecer o contato com outros veículos que estão na proximidade. Uma vez recebida uma mensagem de difusão para o estabelecimento de comunicação, o veículo receptor responde ao transmissor com uma mensagem endereçada e específica ao veículo que originou a comunicação, fechando assim um elo exclusivo de comunicação entre eles.

As mensagens de difusão usam endereçamento reduzido de 16 bits, como apresentado no item 3.4.3, e para uma mensagem de emergência o endereço de destinatário usado é FFFF (em

hexadecimal), tanto para a transmissão como para as demais retransmissões, e todos os veículos devem ter a recepção habilitada para este endereço. As mensagens de difusão para a busca por veículos para a comunicação usam também o endereçamento reduzido de 16 bits, entretanto, o endereço de destinatário usado para esta função deve ser AAAA (em hexadecimal) e neste caso, também, todos os veículos devem ter a recepção habilitada para este endereço.

### 3.3.2 Mensagens de Ponto de Acesso para Veículo

As mensagens que se originam em um PA são mensagens do coordenador da rede para os veículos ou para um determinado veículo que está próximo ao PA, e têm as seguintes funções:

- Enviar comando para um veículo;
- Solicitar informações do veículo (rota, contatos anteriores, estado de sensores, etc.);
- Comandar o veículo para transportar uma mensagem até outro veículo. Neste caso, o coordenador central da rede, após uma busca pela mais provável posição atual do veículo destinatário, escolhe o ponto de acesso mais próximo desta posição e transmite uma mensagem para os veículos em conexão com o PA para que estes a retransmitam para outros veículos até que a mensagem chegue ao veículo destinatário, como apresentado na figura 3.4.

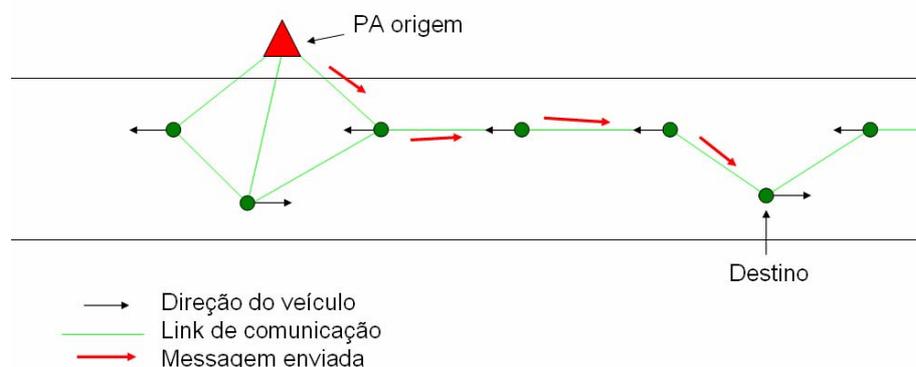


Fig 3.4: Mensagem de PA para o veículo.

### 3.3.3 Mensagens de Veículo para Ponto de Acesso

As mensagens de um veículo para um PA, como apresentado na figura 3.5 são mensagens endereçadas ao coordenador da rede e têm as seguintes funções:

- Resposta de comandos do coordenador (estado de sensores);
- Solicitação de serviços do coordenador (posição do próximo posto de abastecimento);
- Encaminhar uma mensagem para outro veículo. Neste caso, a mensagem, originada no veículo ou retransmitida por outro veículo, tem como destinatário um veículo que não se encontra na área próxima. Então a mensagem é entregue ao coordenador, através do PA, para que este calcule a posição mais provável do veículo destinatário e a retransmita por algum PA do sistema, estipulando o melhor caminho para que a mensagem chegue ao veículo destinatário.

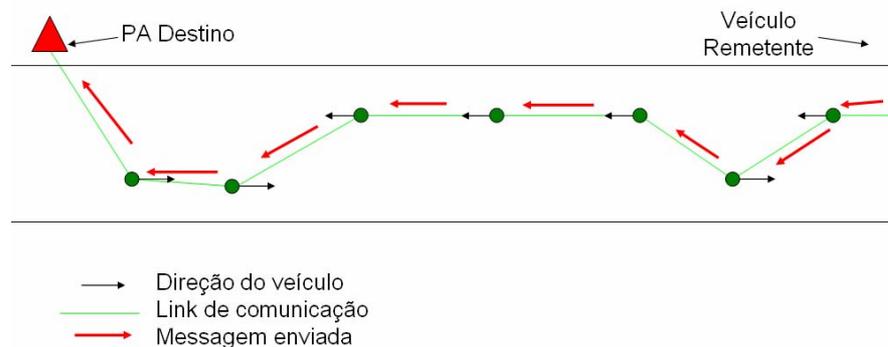


Fig 3.5: Mensagem de veículo para PA.

### 3.3.4 Mensagens de Veículo para Veículo

As mensagens de veículo para veículo são mensagens que podem se propagar pelos veículos próximos até chegar ao veículo destino, como apresentado na figura 3.6, ou ser transmitida para um

PA, quando o veículo destino não estiver na proximidade do veículo que originou a mensagem, sendo que o coordenador central determina a posição mais provável do veículo destino e a retransmite por um outro PA para os veículos da área e estes a retransmitem até que a mensagem chegue ao veículo destino. As principais funções das mensagens de veículo para veículo são:

- Solicitação e resposta a reconhecimento de rotas (grafos de PAs da rota do veículo);
- Solicitação de encaminhamento de mensagens para um PA ou para outro veículo;
- Troca de informações de sensores (distância, velocidade, etc.).

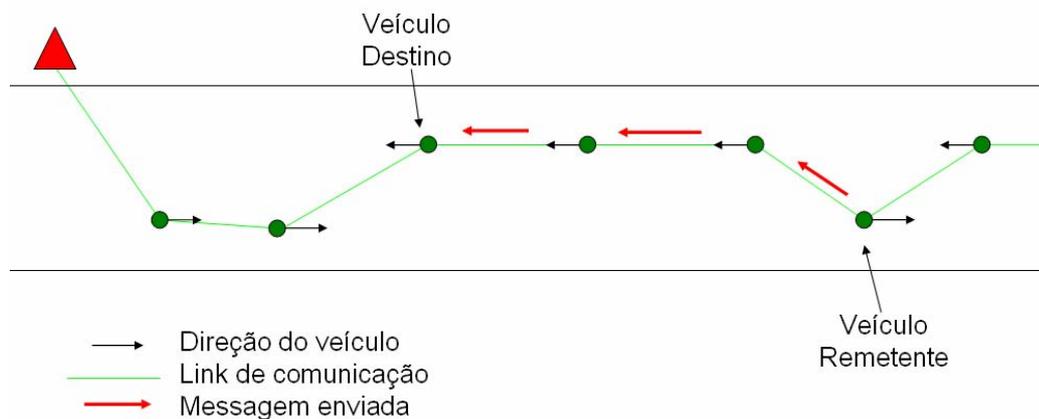


Fig 3.6: Mensagem de veículo para veículo.

### 3.4 O Funcionamento das Redes

A topologia de comunicação que oferece menor latência de comunicação entre os nós e o coordenador da rede é a topologia estrela e com porções de tempo reservadas para a comunicação com nós prioritários. É a topologia com menor latência de comunicação também pelo fato do coordenador estar em contato direto com os nós e não necessitar de comunicação entre os nós para alcançar qualquer nó. Para esta topologia a comunicação da rede pode ser sincronizada através de marcadores que são

sinais de rádio transmitidos pelo coordenador e que delimitam os superframes de comunicação de dados, que são estruturas de dados organizadas no tempo e que definem quando os canais de comunicação podem ser usados pelos nós da rede. Durante o tempo de superframe, dividido em 16 porções de tempo, podem ser alocadas porções fixas de tempo para comunicações de alta prioridade, denominadas GTS – Guaranteed Time Slots, como apresentado na figura A.3., e as demais porções de tempo podem ser acessadas pelos nós através da técnica CSMA-CA que verifica se a portadora do canal está livre antes de ocupá-lo, evitando, desta maneira, que ocorram colisões entre transmissões simultâneas de nós.

### 3.4.1 Estrutura dos Superframes das Redes

Uma vez que na rede AADIN, os nós não se encontram fisicamente próximos ao coordenador central ou mesmo próximos aos PAs, e a topologia da rede não é do tipo estrela, assim, uma forma de sincronizar todo o sistema e garantir que a comunicação entre os veículos e entre os veículos e os PAs, seja feita em porções fixas de tempo e com menor latência possível, é simular marcadores “virtuais” sincronizados com os marcadores do coordenador central, transmitidos pelos PAs. Este sincronismo é feito através de uma referência de tempo, comum a todos os integrantes da rede, que é gerada pelo sinal do GPS nos veículos e nos PAs. Esta referência de tempo, gerada pelo GPS, tem como fonte um relógio atômico com erro de até 0,1 ns por dia ou aproximadamente  $1 \times 10^{-15}$  por segundo. Para instrumentação trabalha-se com uma precisão de  $1 \times 10^{-12}$ , o que para esta aplicação é suficiente para que todos os componentes estejam sincronizados entre si e consigam acessar os canais de comunicação para a transmissão de dados numa mesma base de tempo.

Um marcador virtual é então gerado a cada 500 ms (BI – *Beacon Interval*) com o formato de superframe padronizado, como apresentado na figura 3.7.

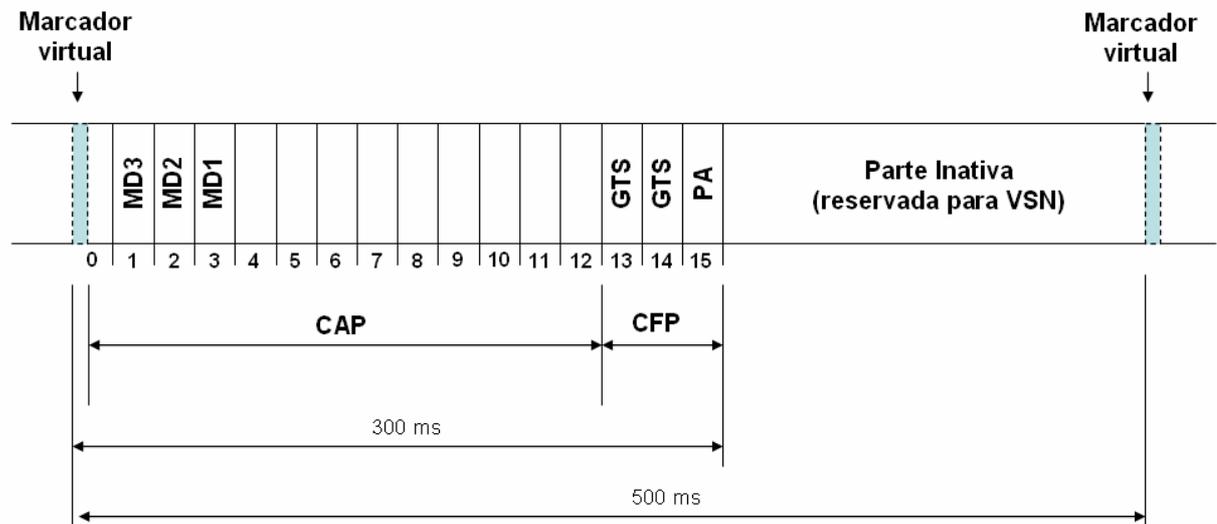


Fig. 3.7: Estrutura do Superframe da rede AADIN.

Onde,

SD – *Superframe Duration* = 300ms é o tempo ativo do Superframe, dividido em 16 porções iguais de tempo, e o restante do tempo até o próximo marcador (200ms) é o tempo inativo do Superframe da rede AADIN que é reservado para uso pelas redes VSNs e,

CFP - *Contention Free Period* é o tempo reservado para transmissões exclusivas de alta prioridade, denominadas de porções de tempo garantidas - GTS. Neste caso, não há disputa de acesso ao canal, pois durante este tempo o canal está reservado para quem tem alta prioridade. Nesta aplicação, foram deixados três períodos de tempo de alta prioridade para serem usados por veículos públicos de emergência, como por exemplo veículos de ambulância e de polícia e pelos PAs.

CAP – *Contention Access Period* é o tempo reservado para que os veículos acessem os canais de comunicação para a transmissão de dados. A primeira porção de tempo, ou slot 0, é reservada para os PAs, e as demais porções são usadas pelos veículos usando a estratégia CSMA-CA, na qual o veículo antes de ocupar a portadora para a transmissão verifica se ela está livre, ou seja, se não há nenhum outro veículo usando o canal naquele período de tempo, evitando assim possíveis colisões de sinais no canal de comunicação. Se o canal estiver sendo usado, o veículo não transmite e aguarda por um tempo aleatório para uma nova tentativa. Além da primeira porção de tempo reservada para os PAs, as três porções seguintes são reservadas para as mensagens de difusão (broadcast), transmitidas em situações de emergência e devem ser usadas da seguinte maneira:

- MD1: reservado para o primeiro transmissor da mensagem de difusão, ou seja, para o veículo que detectar a situação de emergência e originar a mensagem;
- MD2: reservado para os primeiros retransmissores da mensagem, ou seja, para todos os veículos que receberam a mensagem na porção MD1 e que irão retransmiti-la para outros veículos;
- MD3: reservado para os demais retransmissores, ou seja, para os veículos que receberam a mensagem na porção MD2 e que irão retransmiti-la para outros veículos.

Os retransmissores, ou seja, os veículos que ocupam as porções de tempo MD2 e MD3 para retransmitir uma mensagem recebida na porção MD1 calculam o tempo e a distância em que a mensagem original foi gerada e limitam a retransmissão dentro da faixa de 15 km e dentro do período de 30 minutos. O acesso aos canais de comunicação nestas porções de tempo MD1, MD2 e MD3 também segue a estratégia de verificação de uso de portadora para evitar colisões, visto que a mesma situação de emergência pode ter sido detectada por vários veículos e que tanto na transmissão como nas retransmissões, vários veículos podem estar tentando transmitir a mesma mensagem.

A parte inativa do Superframe da rede AADIN, correspondente ao período do final da última porção de tempo da parte ativa até o início do próximo marcador, é usada para os veículos gerarem os Superframes locais aos veículos, como apresentado na figura 3.8.

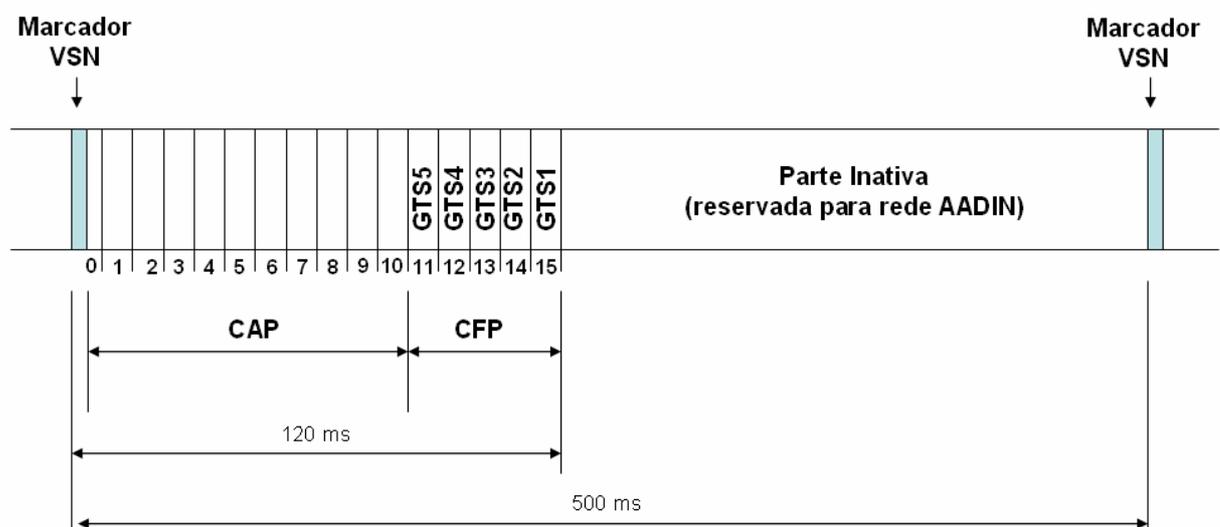


Fig. 3.8: Estrutura do Superframe das redes VSNs.

Onde,

Os marcadores são transmitidos pelo coordenador local das redes VSNs em um tempo que varia de 300 a 380 ms após o marcador virtual da rede AADIN. Este tempo de início do Superframe das redes VSNs em relação aos marcadores da rede AADIN é fixo para cada veículo e deve estar dentro deste intervalo de 80 ms para que os coordenadores de cada veículo e seus sensores transmitam de forma deslocada uns dos outros, o que faz com que haja a menor interferência possível entre veículos, mesmo tendo endereços de rede diferentes e mesmo tendo transmissores com potência reduzida para serem usados somente no alcance dos limites físicos dos veículos.

SD = 120 ms é a duração da parte ativa do Superframe VSN, dividida em 16 porções iguais de tempo, ou slots, que devem ser ocupados da seguinte maneira:

CFP: reservado para transmissões exclusivas de alta prioridade, GTS, onde não há disputa de acesso ao canal, pois o canal está reservado para os seguintes acessos:

- GTS1 – reservado para o próprio coordenador da rede VSN;
- GTS2 – reservado para o sensor de colisão;
- GTS3 – reservado para o sensor de deslizamento (freios ABS);
- GTS4 – reservado para o alarme do veículo e
- GTS5 – reservado para sinal de ignição.

CAP: com 11 porções de tempo, onde a primeira porção, slot 0, é reservada para o coordenador da rede VSN e as demais são destinadas para os sensores, atuadores e equipamentos instalados no veículo e que utilizam a estratégia CSMA-CA para acesso aos canais, com verificação da portadora para evitar colisão no acesso aos canais de comunicação.

O intervalo inativo do Superframe VSN, de 380 ms, é usado pelo coordenador local para comunicação entre veículos. Assim, a composição dos Superframes das redes AADIN e VSN fica estruturada como apresentado na figura 3.9.

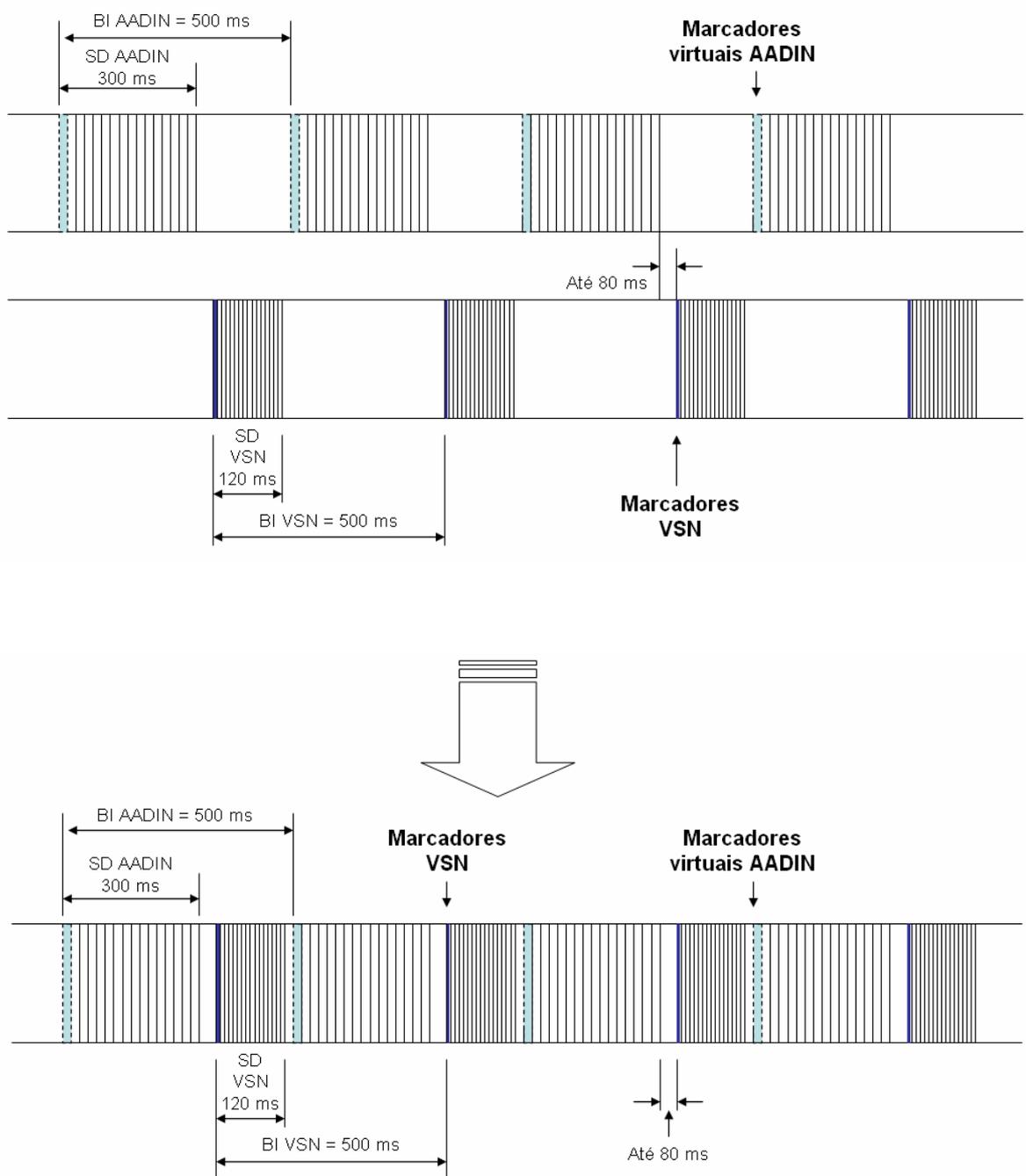


Fig. 3.9: Estrutura temporal dos Superframes das redes VSN e AADIN.

### 3.4.2 Velocidade Máxima dos Veículos para Comunicação

A velocidade máxima para que dois veículos que trafegam em sentidos opostos possam se comunicar, por pelo menos uma troca de mensagem, pode ser calculada através da seguinte seqüência de frames trocados entre os veículos A e B, como é apresentado na figura 3.10, levando-se em conta que os veículos se comunicam a uma distância máxima de 50m.

- 1:** A procura por veículos para comunicação;
- 2:** B se identifica para A;
- 3:** A transmite frame desejado e recebe confirmação de B.

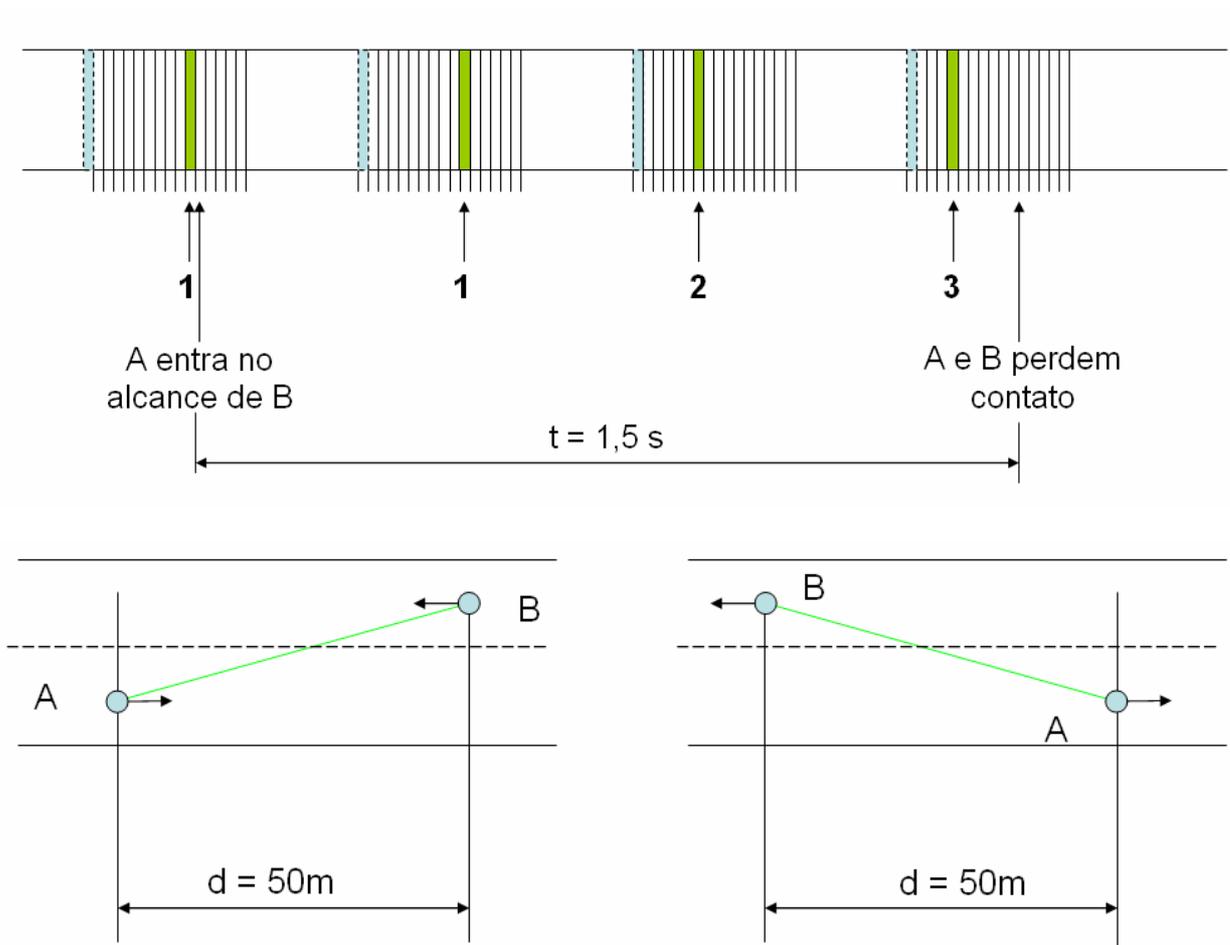


Fig. 3.10: Comunicação entre veículos A e B.

De acordo com a figura 3.10, A e B entram em distância para comunicação logo após A solicitar algum veículo para comunicação, caracterizando assim o pior caso, pois A tem que fazer a mesma tentativa no próximo Superframe. Assim que B recebe a mensagem de A ele transmite sua identificação, sinalizando que está em comunicação e aguarda receber informações. No próximo Superframe A transmite a mensagem para B e recebe reconhecimento de recebimento (ACK). Na caracterização do pior caso supõe-se que cada comunicação é feita na última porção CAP disponível no Superframe, o que força o outro veículo a transmitir o frame de resposta somente no próximo Superframe, ou seja, após pelo menos 500 ms.

Considerando-se que os veículos possuam rádios com alcance de 50 m sem obstáculos entre eles, então toda a troca de dados entre os veículos deve ocorrer durante o tempo em que os veículos percorrerem os 50 m, ou seja: para o tempo mínimo de comunicação de 1,5 s, os veículos têm de percorrer no máximo uma distância de 50 m, o que fornece a velocidade máxima que os veículos, em sentidos opostos, podem trafegar para que consigam se comunicar:  $50 \text{ m} / 1,5 \text{ s}$ , ou 33,33 m/s ou melhor:

$$V_{\max} = 120 \text{ km/h}$$

O que é bem razoável para as rodovias de um modo geral.

Para um ponto fixo, como por exemplo um PA, o veículo poderia trafegar até 240 Km/h para ser capaz de ter uma comunicação como apresentada acima.

A velocidade máxima para comunicação pode aumentar se a potência de transmissão dos rádios for aumentada, o que acarreta um aumento da distância de visada direta que os rádios podem alcançar. Por exemplo, se a distância de comunicação entre os rádios for aumentada para 100 m a velocidade limite dos veículos passaria a ser o dobro da calculada acima, ou seja, 240 Km/h.

### 3.4.3 Endereçamento dos Veículos

O endereço de cada veículo é único e é previamente definido pelo circuito – hardware. São utilizados os 64 bits de endereçamento permitidos pelo IEEE 802.15.4, contudo, os 16 bits mais significativos são utilizados para identificar a rede interna do veículo, ou seja, a VSN e os 48 bits

menos significativos são utilizados para compor o endereço do veículo na rede, como apresentado na figura 3.11.

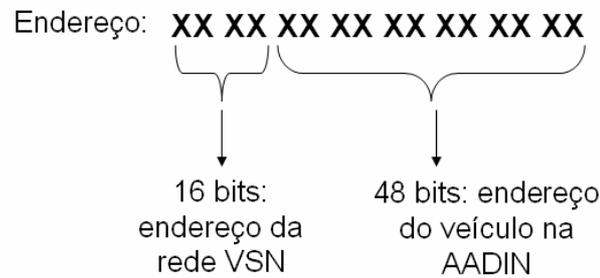


Fig 3.11: Endereçamento dos veículos na rede AADIN.

Os endereços das redes VSN estão limitados a 65535, o que poderia trazer um conflito entre dois veículos com o mesmo endereço de rede interna se eles estivessem próximos entre si. Entretanto, este conflito é minimizado pelo fato da potência do sinal da rede interna ser baixa, para atingir apenas os sensores e atuadores locais, e também pela baixa probabilidade de dois veículos com o mesmo endereço local se encontrarem em uma distância menor que 10m. Além disto, cada rede local ao veículo (VSN) transmite os marcadores locais em um tempo aleatório de 0 a 80 ms após o período ativo do Superframe da rede AADIN, o que torna mais remota a colisão de informações entre dois veículos.

Uma vez estabelecida a comunicação entre dois veículos, o endereçamento utilizado para a comunicação pode ser o endereçamento reduzido de 16 bits, o que diminui o tamanho dos frames transmitidos. Este endereçamento reduzido também é usado na transmissão de mensagens de difusão, como já citado no item 3.3.1. No sistema são reservados os endereços FFFF, AAAA e 5555 (em hexadecimal) para as mensagens de emergência, mensagens de busca por veículos para a comunicação e endereçamento dos pontos de acesso do sistema, respectivamente.

Mesmo considerando somente os 48 bits menos significativos para o endereçamento individual dos veículos, esta capacidade permite endereçar mais de 280 trilhões de veículos, o que é suficiente para considerar o sistema como ilimitado em termos de endereçamento.

### **3.4.4 Posicionamento das Mensagens no Superframe**

Uma estratégia de comunicação, para se ter uma melhor eficiência do sistema, é posicionar as mensagens de solicitação de serviço ou de comunicação o mais próximo possível do final do Superframe e posicionar as mensagens de resposta o mais próximo possível do início do Superframe, tentando fazer assim com que diminua ao máximo o tempo de resposta a uma solicitação.

Para as mensagens de difusão, para a busca por veículos para comunicação, esta estratégia garante que dois veículos, ao entrarem em uma distância de comunicação dos rádios e, uma vez que estão sincronizados pelos marcadores virtuais, conseguem aproveitar as últimas porções de tempo do Superframe para a transmissão da busca por veículos e iniciar, assim, a conexão entre eles. Uma vez recebida a mensagem de busca por veículo para comunicação, o veículo receptor utiliza as primeiras porções do próximo Superframe para transmitir a resposta e estabelecer a conexão no menor tempo possível.

Para a transmissão de mensagens de difusão de emergência, as porções de tempo são reservadas no início do Superframe, pois uma vez detectada uma situação de emergência, internamente ao veículo, este deve transmiti-la o mais rápido possível para os demais veículos, no início do próximo Superframe, e a retransmissão, pelos veículos da vizinhança, deverá também ser feita no início do Superframe para, assim, diminuir o tempo propagação da mensagem.

## **3.5 Resumo do Capítulo e Próximos Tópicos**

Neste capítulo foram apresentados os componentes das redes VSN e AADIN, os tipos de mensagens que circulam na rede AADIN e a estrutura dos Superframes das redes e do endereçamento dos veículos.

No próximo capítulo são apresentadas as soluções sugeridas para o encaminhamento de mensagens do sistema para o veículo e do veículo para o sistema.

## Capítulo 4

# Encaminhamento de Mensagens na Rede AADIN

Em Redes de Sensores Sem Fio um dos maiores desafios é a elaboração de algoritmos para o encaminhamento de mensagens e a garantia de entrega para seus destinatários. Uma das características das RSSF é a volatilidade das rotas, principalmente em comportamentos dinâmicos e, por esta razão, buscam-se criar e aperfeiçoar algoritmos para a elaboração de rotas e garantias de entrega de mensagens que façam com que as mensagens cheguem íntegras aos destinatários. A tecnologia IEEE 802.15.4 utilizada neste sistema, elaborada para atender os requisitos de baixo custo, baixo consumo e fornecer serviço de baixa latência de comunicação, apresenta garantias de segurança de dados, mas mesmo assim tem suas deficiências como, por exemplo, a fragilidade de segurança do frame de reconhecimento, como apresentado em [37]. Com isto, é dedicado aqui um estudo para elaboração de algoritmos de levantamento de rotas de entrega de mensagens que melhor se adeque a esta aplicação.

As mensagens transmitidas na rede AADIN têm várias funções e prioridades, e as que necessitam de algoritmos de entrega para descobrir e usar a melhor rota possível são as mensagens de veículo para PAs e dos PAs para veículos. As mensagens de veículo para veículo em uma área próxima podem usar os demais veículos da proximidade como elo de comunicação Multi hop e, para veículos em locais remotos, a entrega das mensagens pode fazer uso das duas formas básicas de encaminhamento de mensagens, ou seja, do veículo até um PA mais próximo e, através do sistema, de um determinado PA até o veículo destinatário. Tanto a característica dinâmica dos veículos na rede AADIN, como a localização fixa dos PAs e toda a complexidade intrínseca do sistema, fizeram com que estas duas estratégias propostas fossem diferentes: uma para a busca de caminho no sistema, através de um PA, até um veículo, e outra para o encaminhamento de mensagens dos veículos até um PA do sistema.

No primeiro caso, isto é, na comunicação originada no sistema, tendo como destino um veículo, o que se busca é encontrar a posição mais provável do veículo, em termos de coordenadas geográficas, para se determinar entre quais PAs o veículo pode se encontrar e, a partir desta informação, escolher um determinado PA, ou determinados PAs, para se transmitir a mensagem nas vias e, através da comunicação veículo-veículo, alcançar o veículo destinatário e fazer assim a entrega da mensagem. Este algoritmo é denominado BSSP – Bee System Search Paradigm[4], e se baseia em algoritmo genético para, primeiro fazer uma busca localizada na área dos PAs e usar o resultado destas buscas para se fazer uma busca global, para então determinar a área mais provável em que o veículo pode ser encontrado.

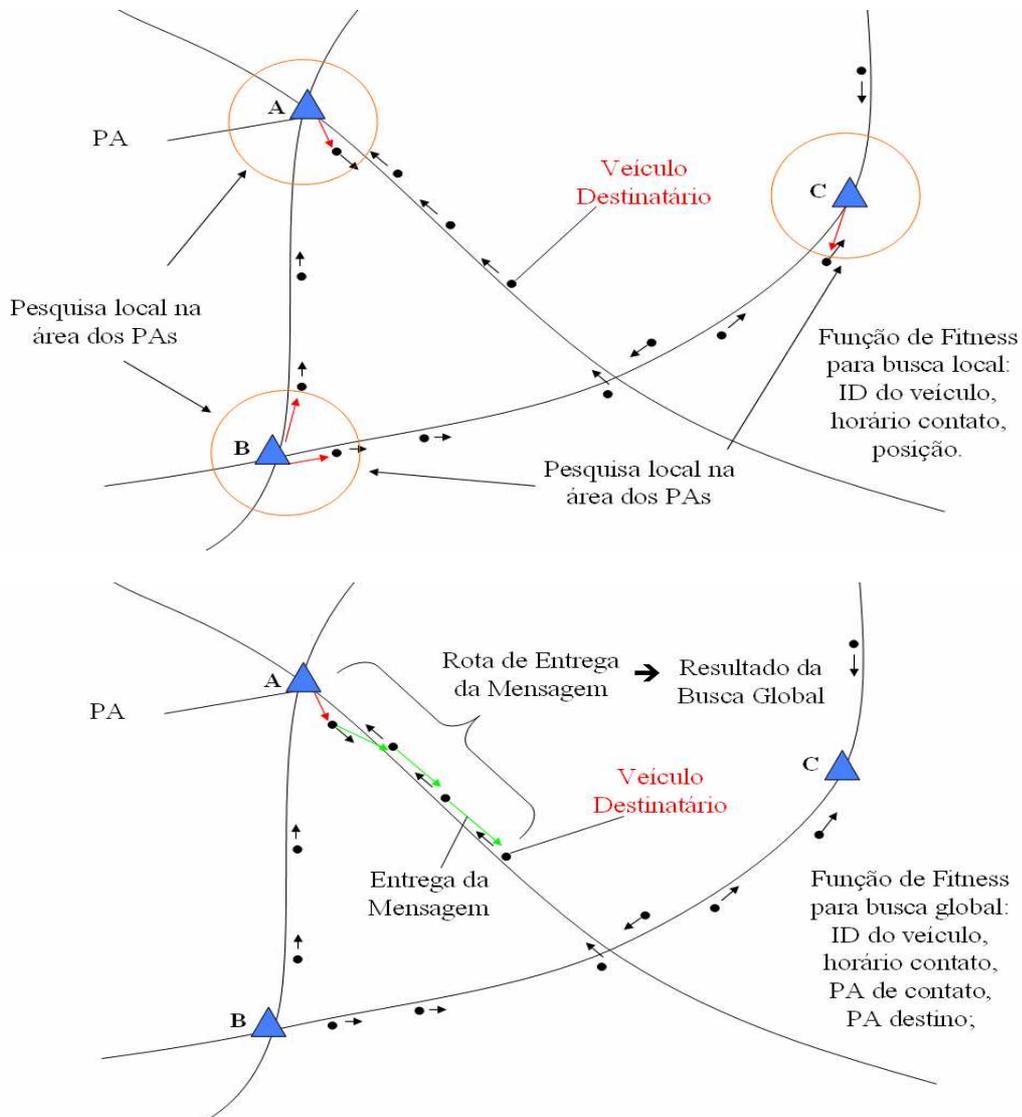


Fig 4.1: Algoritmo BSSP para busca de Veículo na Rede AADIN.

No segundo caso, isto é, na comunicação originada em um veículo e tendo como destino um PA, o que se busca é, entre os veículos da vizinhança, determinar qual é o veículo que terá contato com um PA em um tempo mais curto, e delegar a este veículo a entrega da mensagem para o sistema. Esta informação, que é buscada nos veículos da vizinhança, é calculada em cada veículo através da razão da distância até o próximo PA, no percurso programado, pela velocidade média do veículo e, uma vez constatado que o veículo em contato chegará a um PA em um tempo bem menor que o veículo que origina a mensagem, este transmite a mensagem para o veículo em contato, que será responsável por transportá-la até o próximo PA, como apresentado na figura 4.2.

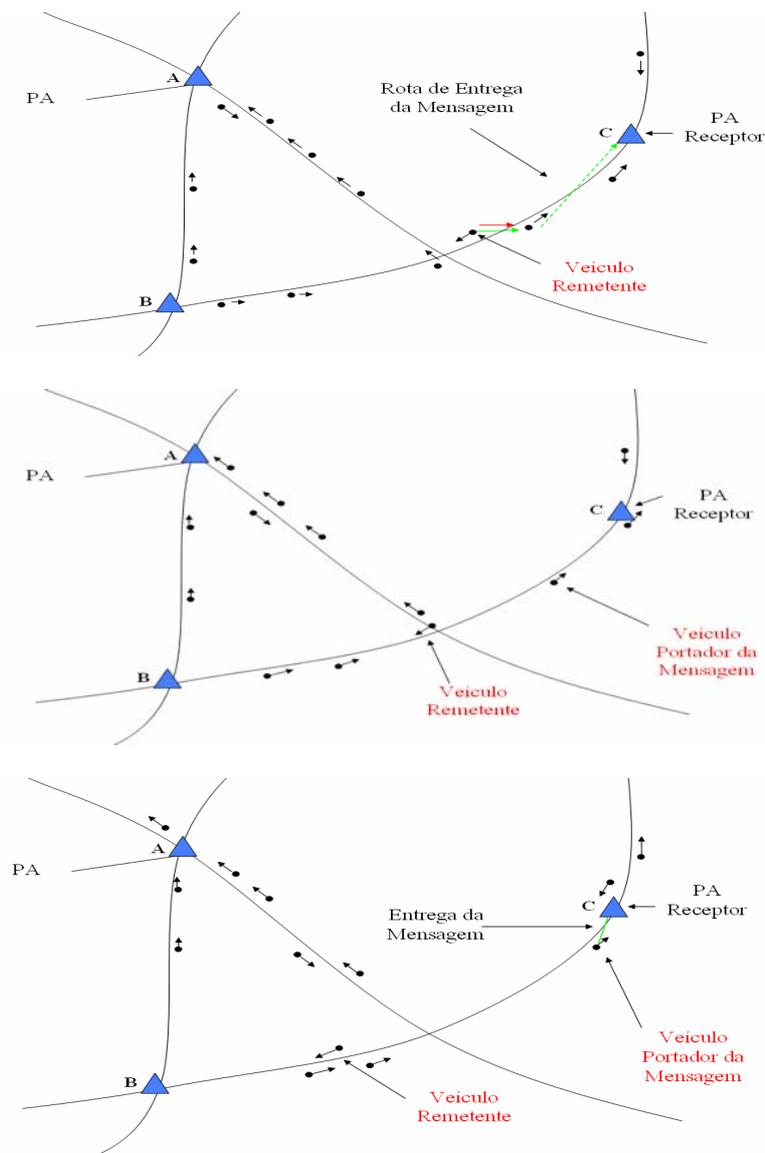


Fig 4.2: Entrega de mensagem de veículo para o PA mais próximo.

O percurso programado dos veículos é uma prestação de logística que, devido às informações que se têm com o contato dos veículos com os PAs, o sistema pode calcular através de um algoritmo e informar aos veículos a menor distância entre dois pontos, ou o caminho para o menor tempo de percurso entre estes pontos. Este algoritmo é denominado EGOP – Evolving Graphs on Optimized Plans[4] e se baseia na análise de grafos construídos com informações de contato dos veículos com os PAs, ou seja, é uma forma otimizada de mapeamento que os veículos têm de percursos com informações de melhor caminho e horário para se trafegar nas vias.

## **4.1 O Protocolo BSSP**

Em um algoritmo genético – GA, a busca pela melhor solução de um problema se baseia na simulação do processo de evolução natural das espécies que, a partir de uma população inicial de indivíduos (possíveis soluções) e de uma função de avaliação (“fitness”), para a solução do problema em questão, se aplicam combinações entre os indivíduos (“crossover”) e possíveis e pequenas mutações nos indivíduos gerados, e se desenvolvem, assim, gerações de indivíduos que são analisados como possíveis soluções do problema até que se alcance o desempenho desejado para a função de avaliação ou até que se chegue ao número pré-estabelecido de gerações para a simulação, quando, então, é escolhido o melhor indivíduo determinado pela função de avaliação.

Uma variação deste algoritmo, e também baseado em processos naturais, é o proposto em [38] e denominado Bee System, que se baseia no comportamento das abelhas: primeiro uma abelha encontra alimento e então ela notifica as demais, na colméia, através de uma dança, a direção e a distância do alimento. No sistema Bee System cada cromossomo tenta encontrar uma solução com melhor avaliação e, quando uma solução é considerada superior, os outros cromossomos tentam encontrar uma solução em torno daquela usando outras populações. Então o procedimento é repetido até que se encontre a melhor solução.

Para esta aplicação, o algoritmo elaborado para a comunicação entre o sistema, através de um PA e um veículo, é uma simplificação do Bee System, como foi proposto em [38], e foi denominado Bee System Search Paradigm – BSSP[4]. O que torna este sistema de busca atrativo para a aplicação é

como as buscas, por informações sobre o veículo, podem ser concentradas nos PAs, e as informações com os melhores resultados destas buscas podem ser compartilhados com outros PAs para uma nova iteração, tornando assim, a busca pela posição provável do veículo rápida. Uma vez estipulada a posição mais provável do veículo, pode ser escolhido um PA ou podem ser escolhidos alguns PAs para que a mensagem seja transmitida para os veículos que trafegam em determinada direção, nas vias e, através de saltos entre veículos, a mensagem seja entregue para o veículo destinatário. O próprio sistema inibe que múltiplas mensagens sobrecarreguem os veículos através da comparação do identificador do destinatário e do número de seqüência da mensagem. O sistema também pode reconhecer, em um determinado PA, se um veículo ainda mantém a mensagem endereçada a outro veículo que lhe foi entregue ao passar anteriormente por um outro PA ou se ela foi entregue com sucesso.

#### **4.1.1 Informações de Contato com Veículos**

Quando um veículo se comunica com um PA ou quando um veículo se comunica com outro veículo, este contato é registrado e armazenado tanto nos veículos como nos PAs. Nos veículos, as informações de contato com outros veículos são reduzidas, por restrições de armazenamento de dados, e são mantidas nos veículos até que seja feito um contato com um PA, quando então estas informações são transferidas para o PA, onde são incluídas em um banco de dados local que servirá para buscas futuras.

As informações que um veículo armazena no contato com outros veículos são:

- Identificador reduzido do veículo (16 bits) contatado - Id,
- Horário de contato (16 bits), armazenando informações de hora e minuto de contato das últimas 24 horas – HM e,
- Posição de Contato (24 bits), com informações de latitude e longitude onde o contato foi realizado - LL. Esta informação é obtida do GPS conectado ao coordenador local do veículo.

O número de informações de contato armazenado em um veículo é limitado ao espaço de memória reservada para esta função na aplicação local e também é limitado aos contatos realizados nas últimas 24 horas.

Ao se ter contato com um PA, o veículo transmite os dados, armazenados localmente, de contatos com veículos, e limpa a área de armazenamento. Por sua vez, o PA armazena para o veículo que descarregou as informações os seguintes dados:

- Identificador completo do veículo contatado (64 bits) - ID,
- Data e hora do contato (32 bits) - DH,
- Velocidade média de percurso do veículo (8 bits) - VM e
- Direção do Veículo (8 bits) - DV.

Associada a estas informações, do veículo contatado pelo PA, são armazenadas todas as informações de contato que este veículo teve e que transmitiu para o PA, formando assim um banco de dados com registros dos veículos que passaram pelo PA e com quem estes veículos mantiveram contato anteriormente, conforme esquematizado na figura 4.3.

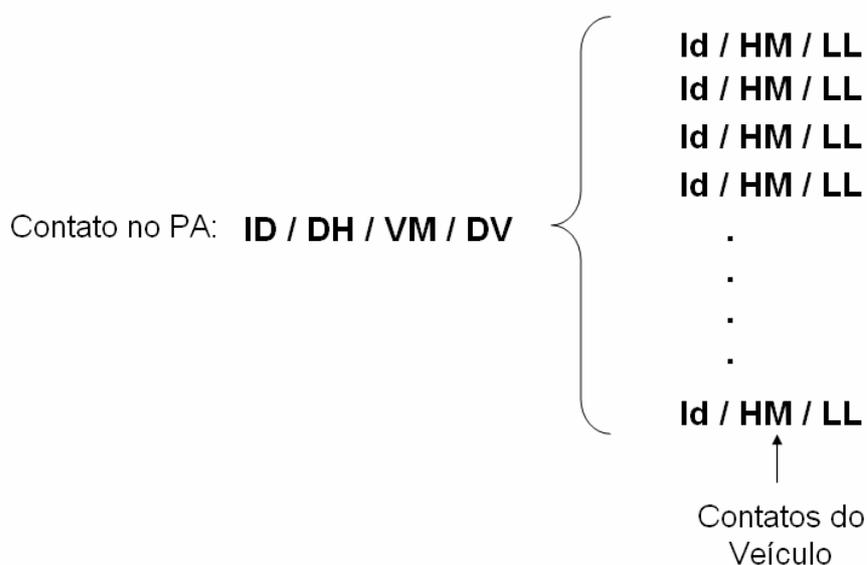


Fig 4.3: Registros de Contato com Veículos.

### 4.1.2 O Algoritmo da Busca

O primeiro passo na busca por um veículo é a passagem, pelo coordenador central da rede para os PAs, do identificador completo do veículo procurado (**IDvp**) que a princípio é usado pelos PAs como a função de avaliação na busca pelo veículo e, com estas informações, é possível ter os últimos contatos que o sistema fez com o veículo, como apresentado na figura 4.4.

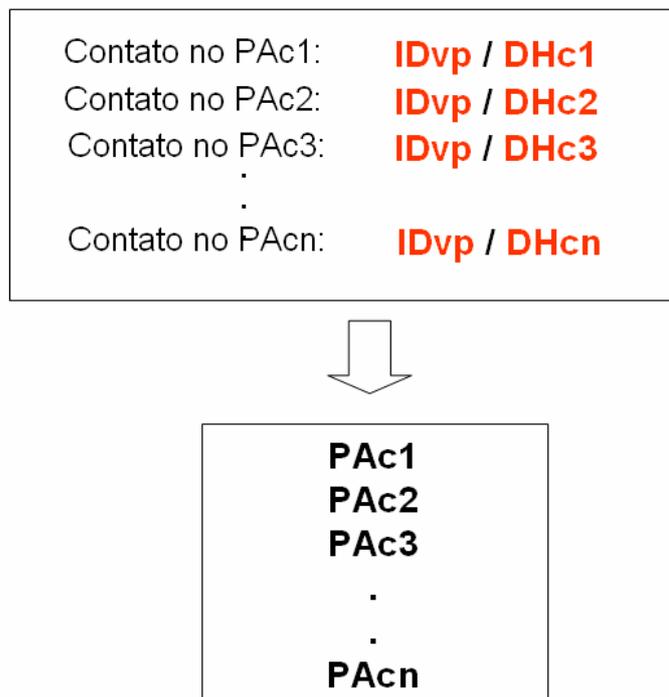


Fig 4.4: Busca por um Veículo – Formação do Universo de Busca.

A seguir é passado para um universo menor de PAs (somente para os PAs próximos aos PAs que fizeram contato com o veículo) o identificador reduzido do veículo procurado (**Idvp**) e o horário do último contato (**HM<sub>1</sub>**). Com estas informações os PAs realizam uma busca que usa como função de avaliação o identificador reduzido do veículo procurado e o horário limite a ser usado para restringir horários anteriores.

A busca então é feita em todos os veículos que passaram pelos PAs após este horário para verificar se estes veículos tiveram contato com o veículo procurado após o horário estipulado. A geração resultante desta busca é o conjunto de todos os veículos que passaram pelos PAs e que tiveram contato com o veículo procurado após o tempo do último contato do veículo com algum PA.

O crossover é feito com a inclusão de veículos que não estão na lista da geração e que aparecem mais vezes entre os contatados pelos veículos da lista da geração (ID3k e IDnj), além do veículo procurado. A mutação é feita com a inclusão de outros veículos que não estão na lista e que menos aparecem na lista da geração (ID2m) e também na inclusão de alguns PAs que estão fora da lista de busca e que estão na periferia do grupo de busca (PAo e PAp), como apresentado na figura 4.5.

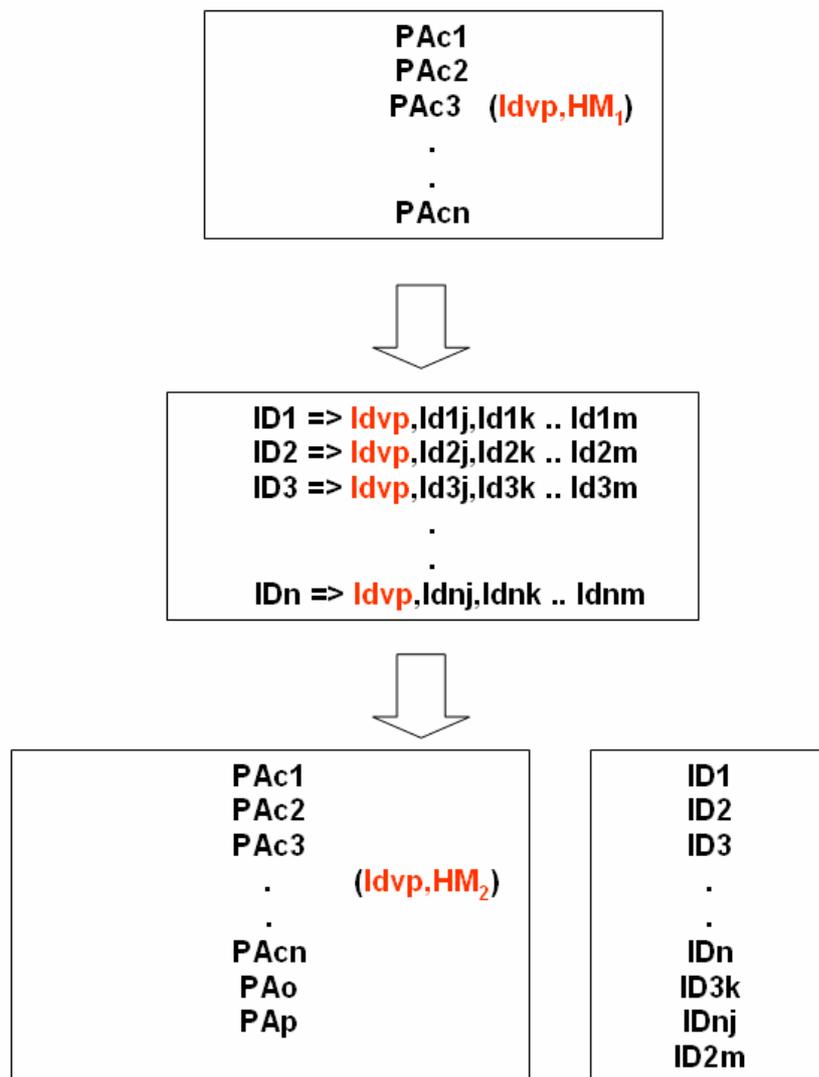


Fig 4.5: Busca por um Veículo – Formação da Geração de Veículos.

A próxima busca é feita no universo de PAs estipulado e com uma nova restrição de horário de contato. É feita, então, a inclusão de alguns veículos no universo de veículos com possíveis contatos

com o veículo procurado e para os novos PAs de busca, é feita a busca como na etapa anterior dos PAs já usados antes, ou seja, as únicas restrições são o horário limite (novo =  $HM_2$ ) e o identificador do veículo procurado (Idvp).

As buscas são encerradas com um limite no número de iterações ou com a repetição da geração anterior na busca atual, se ela for convergente. Como resultado destas buscas se tem os veículos que fizeram contato por último com o veículo procurado e a localização geográfica do contato e, através destas informações e mais a informação de velocidade média do veículo procurado obtido na primeira busca, pode-se estimar a localização do veículo procurado e também os PAs mais próximos ao veículo no horário atual. Assim, escolhe-se o PA, ou alguns PAs, para transmitir a mensagem para o veículo usando os veículos que estão passando pelo PA e que se dirigem na direção da posição estimada do veículo procurado. Ao receber a mensagem, o veículo procurado fica incumbido de reportar para o sistema assim que tiver contato com algum PA.

## **4.2 O Algoritmo EGOP**

A representação de RSSF dificilmente é feita através de modelos clássicos de grafos, pela própria dinâmica das redes, entretanto estas redes, sob certos aspectos, podem ser representadas por modelos de grafos evolutivos, ou seja, grafos que se alteram no decorrer do tempo, como apresentado em [39]. Estes aspectos são características de determinadas redes dinâmicas, onde se pode observar a repetição de rotas ou elos de comunicação entre os nós, como em sistemas de satélites de baixa órbita, nos quais os satélites se comunicam entre si e, periodicamente, têm contato sempre com os mesmos pontos de acesso, fixos do sistema, na terra. Ou seja, os percursos dos nós da rede são previsíveis e, através desta característica, se pode gerar um modelo para a comunicação entre os nós da rede, representado por grafos que se alteram durante o decorrer do tempo, como representado na figura 4.6.

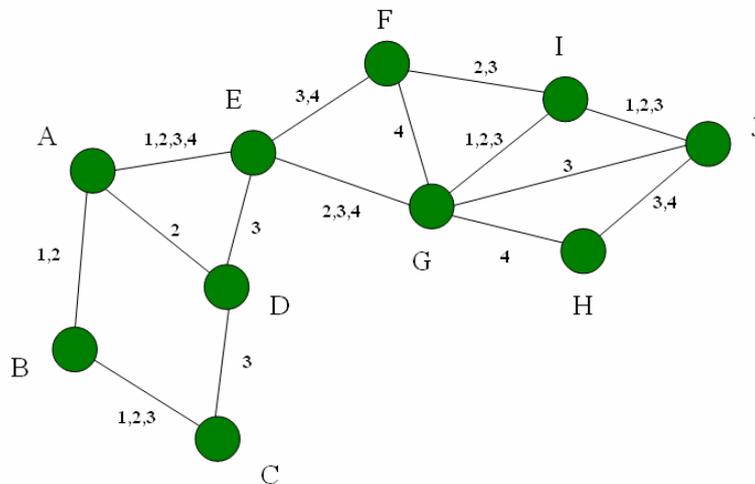


Fig. 4.6: Grafo de comunicação entre nós que se altera no tempo.

Assim, uma conexão, para a comunicação entre os pontos C e J da rede, por exemplo, poderia ser feita até a porção de tempo 2, representada no grafo acima, utilizando um percurso total de 7 nós (C-B-A-E-G-I-J) ou em um percurso menor de 5 nós (C-D-E-G-J) se a comunicação for atrasada até a porção de tempo 3. E, em razão desta característica, foram formalizadas três métricas para os modelos de grafos evolutivos, que são: a primeira rota disponível, a mais curta e a mais rápida, como formulado em [40].

Com base nas informações estatísticas de velocidade média e direção dos veículos existentes nos PAs do sistema, captadas de veículos que trafegam por eles, este modelo de grafos evolutivos pode ser usado nesta aplicação de RSSF, não para se estabelecer a comunicação entre os veículos, mas sim para se determinar a qualidade dos percursos entre os PAs durante períodos do dia. Desta maneira, podem ser estabelecidos os grafos de percursos com tráfego abaixo de determinado volume, por exemplo abaixo de 50 veículos por minuto, ou ainda, velocidade média acima de 40 Km/h, que as vias suportam durante determinados períodos do dia (por exemplo períodos de 3 horas de duração, em um total de 8 períodos durante o dia).

Na figura 4.6, o elo entre os nós poderia representar os períodos durante o dia em que a velocidade média das vias (entre os PAs) fosse acima de 40 km/h, por exemplo. Isto significa que entre os PAs A e E em todos os períodos, considerando que são 4 no exemplo, a velocidade da via é acima

de 40 km/h, entretanto, entre os PAs C e D e entre D e E somente no período 3 a velocidade média das vias é acima de 40 km/h; nos demais períodos o tráfego é mais pesado.

Este algoritmo, EGOP, pode ser utilizado como prestação de serviço de logística que o sistema pode fornecer para os veículos para que estes determinem o menor caminho ou o caminho mais rápido entre dois pontos extremados por dois PAs. Com esta prestação de serviço, um veículo pode consultar o sistema para determinar a rota mais rápida para percorrer os pontos e pode ter armazenado, internamente no veículo, os PAs que serão percorridos e o tempo estimado para se alcançar o próximo PA. Esta informação é justamente a informação que um veículo necessita para determinar, entre os veículos de sua vizinhança, qual alcançará um PA em menos tempo e, através de uma consulta simples com os veículos da vizinhança, escolher o veículo ao qual entregará a mensagem destinada a um PA do sistema e este será o condutor desta mensagem até o PA.

A consulta por informações a outros veículos deve ser simples, tanto pela capacidade computacional reduzida que os sistemas embarcados possuem como também pelo tempo reduzido que existe de contato entre os veículos.

Além de se determinar a caminho mais curto ou caminho que leva menos tempo para o percurso entre dois pontos, outra informação importante que se obtém do sistema são os horários mais viáveis para se trafegar em determinadas vias e, assim, se fazer uma programação de horários para utilização das vias.

### **4.3 Resumo do Capítulo e Próximos Tópicos**

Neste capítulo foram apresentadas estratégias e algoritmos que auxiliam na busca da melhor rota para o encaminhamento de mensagens para as formas básicas de comunicação: veículo-PA e PA-veículo.

No próximo capítulo é apresentada uma conclusão deste trabalho de especificação do sistema de comunicação entre veículos e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, que abrangem desde o modelamento da mobilidade dos veículos para simulações até a especificação de sistemas embarcados e arquiteturas dos PAs para uma implementação do sistema.

## Capítulo 5

### Conclusão e Trabalhos Futuros

O trabalho apresentado aqui é uma alternativa pioneira para a comunicação entre veículos, e que utiliza uma tecnologia de comunicação de baixa taxa de transferência para a conexão de comunicação. A prestação de serviço disponibilizada por esta comunicação prioriza a difusão de mensagens de sinalização em situações de emergência, que a princípio pode ser utilizada para uma sinalização sonora e visual nos veículos, na vizinhança do sinal gerado e, em sistemas mais complexos de automação de rodovias, pode também ser usada não somente para a sinalização, mas também para o controle dos veículos da vizinhança, atuando no comando de controle automático da velocidade e mesmo no comando de desvios de rotas dos veículos para outras vias, para garantir o fluxo e a segurança.

A intenção desta especificação de comunicação de baixa taxa de transferência é, além de possibilitar a construção de uma infra-estrutura com um custo menor, utilizar, como padrão, uma tecnologia aberta e que tem o apoio e interesse de vários fabricantes de componentes associados em uma aliança[10] para a implementação e fabricação dos módulos de rádio, e que fornecem suporte ao desenvolvimento de aplicações.

Além da infra-estrutura de comunicação, foram especificados algoritmos para a elaboração de rotas para a entrega de mensagens, específicos para esta aplicação, uma vez que o desenvolvimento de protocolos de encaminhamento de mensagens depende muito das características da aplicação que se faz das Redes de Sensores Sem Fio.

Também foi especificado um algoritmo para a elaboração de rotas de veículos nas vias, prestação baseada em algoritmos de busca do melhor caminho e que leva em conta por um lado o movimento dos veículos, ou seja, a velocidade e a direção dos veículos nas vias, e por outro lado a posição geográfica dos Pontos de Acesso do sistema e a perspectiva de passagem dos veículos por eles.

Como propostas para trabalhos futuros são apresentadas as seguintes sugestões: a construção de um modelo de mobilidade para os veículos na rede e a implementação de sistemas embarcados para a instalação em veículos, como também a arquitetura de equipamentos para a função de ponto de acesso do sistema. Estas propostas têm como objetivo fomentar trabalhos de iniciação científica na graduação e trabalhos de pós-graduação que abranjam todas as áreas de pesquisa envolvidas neste projeto, ou seja, áreas de telecomunicações, de sistemas embarcados e embutidos, de arquitetura de sistemas computacionais e de algoritmos computacionais para o encaminhamento de mensagens.

A construção de modelos de mobilidade tem como objetivo gerar ferramentas para a simulação do funcionamento da rede e verificação do desempenho da rede e das prestações como um todo, o que inclui a simulação e avaliação dos protocolos de comunicação propostos para o sistema. Os modelos de mobilidade visam representar computacionalmente o comportamento da movimentação dos veículos nas vias e, entre os modelos existentes, o modelo sugerido é o modelo Markoviano[42] de percurso aleatório, como apresentado no item 5.1.

A implementação de sistemas embarcados e arquiteturas computacionais dos PAs tem como objetivo ser o ponto de partida para a implementação dos nós da rede, a serem instalados em veículos e em pontos de acesso para testes e validação do sistema como um todo.

## **5.1 Modelo de Mobilidade para a Rede AADIN**

As vias da rede AADIN representam as vias urbanas e rodovias interurbanas onde se encontram cruzamentos e vias expressas. Neste contexto, um veículo pode apresentar estados, tais como: parado, em movimento na via, em conversão para outra via em cruzamentos e em alteração de velocidade de movimento em uma determinada via.

O modelo de mobilidade sugerido visa representar estes estados e é baseado em [41] e mais caracterizado em [42] para esta aplicação, com possibilidade de se estabelecer intervalos de pausas, acelerações e até paradas bruscas para simulação de acidente.

O movimento do veículo, conforme proposto por Chiang em [41] é modelado através de uma cadeia de Markov e possui três estados para representar as coordenadas x e y, onde o estado zero (0) representa a posição atual do veículo, o estado um (1) representa a posição anterior e o estado dois (2) representa a próxima posição do veículo em x e y e utiliza a matriz de probabilidade apresentada na figura 5.1 para determinar a posição do veículo no próximo instante de tempo.

$$P = \begin{pmatrix} P(0,0) & P(0,1) & P(0,2) \\ P(1,0) & P(1,1) & P(1,2) \\ P(2,0) & P(2,1) & P(2,2) \end{pmatrix}$$

Fig 5.1: Matriz de probabilidade de transição de posição do veículo.

Onde, se  $P(0,0) = 0$  indica que a probabilidade do veículo permanecer na mesma posição no próximo estado de tempo é zero, ou seja, o veículo nunca pára e  $P(0,0) = 1$  indica que o veículo está sempre parado.

As alterações propostas em [42], para este modelo, visam aprimorá-lo para que ele se torne o sistema mais próximo do apresentado pelos movimentos dos veículos nas vias urbanas e rodovias existentes, incluindo as coordenadas x e y na mesma matriz de probabilidade, gerando assim uma representação mais realista do próximo estado do veículo.

### **5.1.1 Modelo de Mobilidade para Vias Urbanas**

Para as vias urbanas devem ser enfatizadas as características de mudança de direção e paradas em cruzamento, como também as constantes mudanças de velocidade dos veículos. Neste caso, devem ser destacadas as probabilidades de se permanecer na mesma posição por mais que um intervalo de tempo, e também deve ser enfatizada a probabilidade de se manter uma direção fixa (x) e se alterar a outra (y) para conseguir representar as constantes mudanças de direção.

### **5.1.2 Modelo de Mobilidade para Rodovias**

Para as rodovias devem ser enfatizadas as características de velocidade alta e constante por um período grande de tempo, raras alterações de direção e poucas paradas. Neste caso, deve ser minimizada a probabilidade de permanência na mesma posição (tanto x como y) e deve ser enfatizada a probabilidade de deslocamento em uma mesma direção sem alteração de velocidade.

## **5.2 Arquiteturas para Implementação**

A implementação de módulos computacionais de comunicação e controle pode ser dividida em duas partes: os módulos a serem embarcados nos veículos e os sistemas que formam os pontos de acesso do sistema. O centro de coordenação, ou coordenador, da rede pode estar implementado em um determinado PA da rede, diferenciando-se, destes, pelo acréscimo de programas e de banco de dados aos já existentes nos demais PAs.

## 5.2.1 Arquitetura Computacional para os Veículos

Os módulos a serem embarcados nos veículos podem ser compostos por um módulo rádio transmissor compatível com a especificação IEEE 802.15.4 e em conformidade com as especificações da Aliança Zigbee e por um módulo de processamento de dados, simples de 8 bits, com 32 Kbytes de memória de dados, 64 Kbytes de memória de programa e ligado a um aparelho GPS, como representado na figura 5.2.

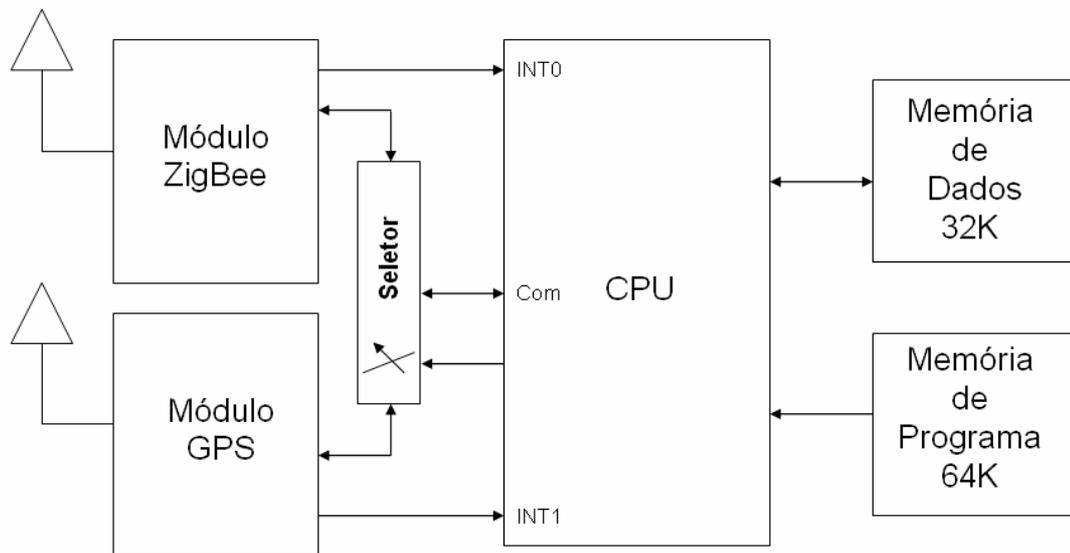


Fig. 5.2: Módulo Embarcado.

Para a aplicação apresentada neste trabalho, a memória de programa de 64Kbytes é suficiente para conter rotinas para coletar os dados dos sensores, analisá-los para poder gerar sinalizações locais de emergência, e manter o controle sobre as conexões de comunicação com outros veículos. A memória de dados de 32 Kbytes seria usada, em menor parte (8 Kbytes) para dados de variáveis e tabelas locais, de uso do programa, e em maior parte (24 Kbytes) para armazenar mensagens e registros de contatos com outros veículos, o que possibilita armazenar até 192 mensagens de 128 bytes cada. Assim, podem-se mapear, em memória, os I/O, ou seja, as portas de entrada e saída podem ser definidas como endereço alto de memória (acima de 7FFFH), o que simplifica o projeto.

Dois sinais importantes no sistema são tratados pelo processador através de interrupções: a base de tempo do GPS, que a princípio deve interromper a CPU a cada 500ms e o sinal do módulo ZigBee

que deve interromper a CPU sempre que tiver uma mensagem recebida ou assim que tiver uma tarefa, que foi solicitada pela CPU, realizada.

Geralmente os microcontroladores têm apenas uma interface serial, e como a comunicação com o GPS para coleta de posição tem baixa prioridade, pode-se usar um seletor de sinais que conecte a interface serial da CPU com o módulo ZigBee e, sempre que se precisar alguma informação do GPS, a CPU comanda o seletor, através de linhas de I/O, e transfere as linhas da interface serial para o GPS.

## 5.2.2 Arquitetura Computacional para os PAs

Os sistemas implementados nos PAs podem usar a mesma arquitetura para o tratamento dos dados com o módulo Zigbee e com a função de interface com o PC, como apresentado na figura 5.3.

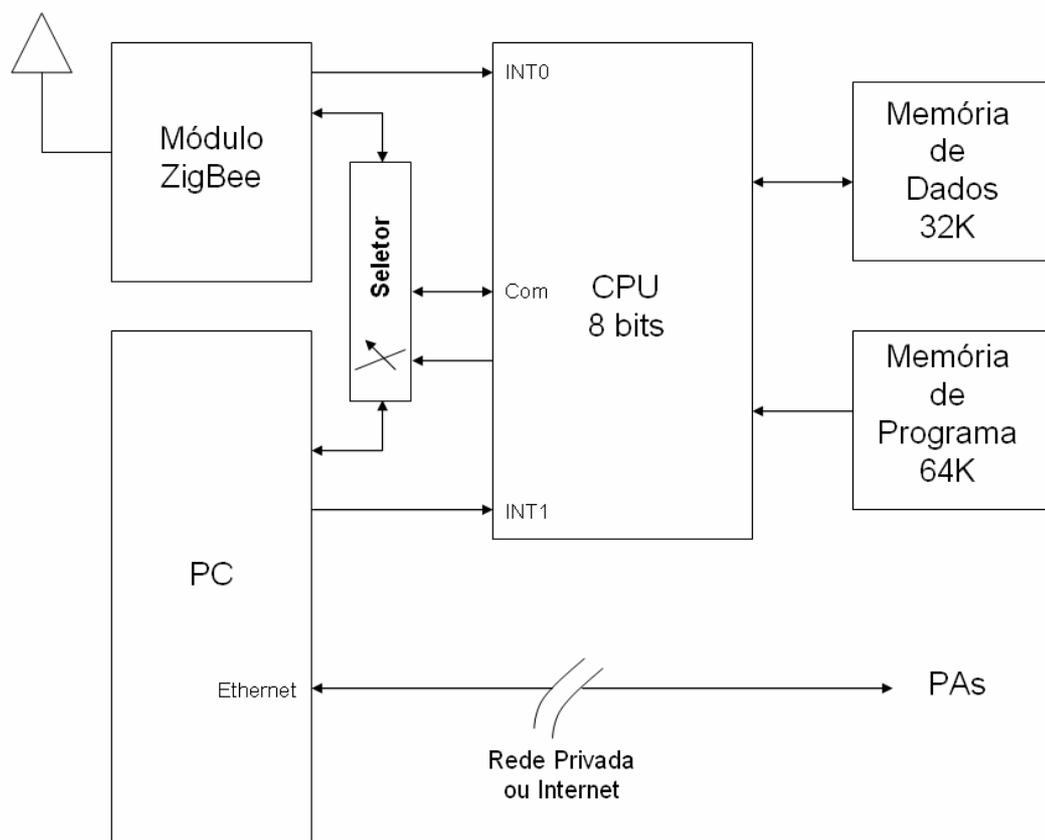


Fig. 5.3: Arquitetura Computacional para um PA.

Mantendo-se a mesma arquitetura usada para a placa do microcontrolador dos veículos, um Ponto de Acesso pode ser composto por um PC conectado, através da interface serial (ou USB), ao módulo microcontrolador que por sua vez é ligado ao módulo ZigBee. Como neste caso a comunicação do PC com o módulo do microcontrolador pode ser iniciada pelo PC, deve haver uma maneira de se solicitar a atenção do microcontrolador, quer seja através de uma interrupção, como apresentado na figura 5.3, quer seja através de um sinal de solicitação de serviço – RTS que o microcontrolador verifique periodicamente e, na ocorrência do sinal, prepare o seletor e habilite o PC a se comunicar, respondendo com o sinal de pronto para o serviço – CTS para o PC.

O PA deve se comunicar com os demais PAs, ou com o coordenador central da rede, através de uma rede privada ou através da Internet. O aplicativo de controle do PA deve manter as informações de contato dos veículos em um banco de dados local, e estas informações são usadas para a pesquisa por passagens de veículos procurados pelo PA e pesquisa de possíveis contatos que os veículos que passaram pelo PA tiveram com o veículo procurado.

O programa que controla o coordenador central da rede deve compreender as prestações a mais de centralização das pesquisas na rede, e de encaminhamento de mensagens endereçadas aos veículos, para os PAs, após as pesquisas. O coordenador pode ser instalado fisicamente em algum determinado PA e, para isto, deve ser levado em consideração, tanto a capacidade de processamento do PC, como a capacidade de armazenamento e a segurança de armazenamento de informações no PC.

### **5.3 Resumo do Capítulo e do Trabalho**

Neste capítulo foram apresentadas as conclusões finais do trabalho e as sugestões que podem contribuir para trabalhos futuros, tais como modelo de mobilidade para possíveis simulações do sistema em ambientes computacionais e estrutura de hardware para possíveis implementações físicas do sistema.

Estas sugestões, para trabalhos futuros, visam fornecer um ponto de partida para trabalhos de iniciação científica que podem ser desenvolvidos durante a graduação de engenharia elétrica,

engenharia de computação e ciência da computação, bem como trabalhos de pós-graduação nestas mesmas áreas citadas.

Este trabalho se desenvolveu com a apresentação inicial dos trabalhos relacionados e com uma apresentação resumida das topologias de conexão em rede e das tecnologias, de comunicação sem fio, especificadas pelo IEEE. A seguir foram apresentadas as redes de comunicação interna ao veículo, VSN; e entre veículos, AADIN. Na seqüência enfatizaram-se os processos de troca de mensagens e as estratégias de encaminhamento de mensagens na rede AADIN. Por fim, neste capítulo, foram apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

# Referências Bibliográficas

- [1]. A. Loureiro, L. Ruiz, J. M. Nogueira, R. Mini, *Mini-curso: Redes de Sensores sem Fio*, Jornada de Atualização em Informática – XXII Simpósio Brasileiro de Computação, Florianópolis, Brasil 2002.
- [2]. K. Singh, K. Fujimur, “A Navigation Strategy for Cooperative Multiple Mobile Robots”, *Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '93, IROS '93*. Vol 1 Pages 283-288, Yokohama, Japan, 1993.
- [3]. A. Kasinski, P. Skrzypczynski, “Perception Network for the Team of Indoor Mobile Robots: Concept, Architecture, Implementation”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence 14, 2001*, Pages 125-137.
- [4]. J. A. Nascimento, J. R. Oliveira. “Cooperative Navigation and Inter-vehicle Communication using IEEE 802.15.4 and Zigbee”. *First IFAC Workshop on Multivehicle Systems. (MVS'06)*, Salvador, Bahia, Brasil, pg. 8-12, Outubro 2006.
- [5]. J. Hill, et al. “System Architecture Directions for Networked Sensors”, *ACM Operating Systems Review*. V.34, n.5, Dec 2000, pp.93-104;
- [6]. Crossbow. *Wireless Sensor Networks*. Página na Internet com especificações e informações do fabricante dos módulos Mica Motes, acessada em dezembro de 2006: [http://www.xbow.com/products/wireless\\_sensor\\_networks.htm](http://www.xbow.com/products/wireless_sensor_networks.htm)
- [7]. MIT projeto  $\mu$ AMPS. Página na Internet sobre o projeto  $\mu$ AMPS do Instituto MIT, acessada em dezembro de 2006: <http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/icsystems/uamps/>
- [8]. A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson, “Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring”, *ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02)*, Atlanta, EUA 2002.
- [9]. IEEE 802.15 WPAN Task Group 4 (TG4). Página na Internet com informações do grupo de trabalho e da especificação IEEE 802.15.4, acessada em dezembro de 2006: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>

- [10]. ZigBee Alliance. Página na Internet sobre a aliança de empresas para a implementação industrial de componentes que atendem a especificação IEEE 802.15.4, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.zigbee.org>
- [11]. IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers. Página na Internet do instituto IEEE de engenharia elétrica e eletrônica, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.ieee.org>
- [12]. L. Wischhof, A. Ebner, H. Rohling, M. Lott, R. Halfmann, “SOTIS – A Self-Organizing Traffic Information system”, *57<sup>th</sup> IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference*. VTC 2003 - Spring, Jeju, South Korea, April 2003.
- [13]. FleetNet – Inter-vehicle Communication. Página na Internet do projeto FleetNet para a comunicação interveicular, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.et2.tu-harbur.de/fleetnet/index.html>
- [14]. NOW – Network-on-Wheels. Página na Internet sobre o projeto NOW originado do projeto FleetNet na Alemanha, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.network-on-wheels.de>
- [15]. Car 2 Car – Communication Consortium. Página na Internet do consórcio de empresas para implementação de redes interveiculares, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.car-2-car.org>
- [16]. California Institute of Technology – The Caltech Multi-vehicle Wireless Testbed – MVWT. Página na Internet do projeto MVWT desenvolvido no California Institute of Technology, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.cds.caltech.edu/~mvwt/>
- [17]. Specification & Tutorial of IEEE Standard 802.11g. Páginas na Internet com especificação e tutoriais do Wi-Fi, acessadas em dezembro de 2006:  
<http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>  
<http://focus.ti.com/lit/ml/sply012/sply012.pdf>  
[http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/secoes/sec\\_802\\_11g.html](http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/secoes/sec_802_11g.html)
- [18]. Specification & Tutorial of the Bluetooth System. Páginas na Internet com especificação e tutoriais do Bluetooth, acessadas em dezembro de 2006:  
<https://www.bluetooth.org/spec>  
<http://www.thewirelessdirectory.com/Bluetooth-Overview/Bluetooth-Specification.htm>  
<http://www.palowireless.com/infotooth/tutorial.asp>
- [19]. Specification & Tutorial of IEEE Standard 802.16. Páginas na Internet com especificação e tutoriais do WiMax, acessadas em dezembro de 2006:  
[http://grouper.ieee.org/groups/802/16/docs/02/C80216-02\\_05.pdf](http://grouper.ieee.org/groups/802/16/docs/02/C80216-02_05.pdf)  
<http://standards.ieee.org/getieee802/802.16.html>  
<http://www.istf.com.br/vb/archive/index.php?t-8545.html>

- [20]. Descrição de Ethernet. Página na Internet com descrição do padrão Ethernet, acessada em dezembro de 2006:  
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Ethernet>
- [21]. Página na Internet com informações do fabricante sobre o produto e o projeto HomeRF, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.homerf.org>
- [22]. Página na Internet com informações do fabricante sobre o produto e o projeto NanoNet, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.nanotron.com>
- [23]. Página na Internet com informações do fabricante sobre o produto e o projeto RF-232, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.aerocomm.com>
- [24]. Página na Internet com informações do fabricante sobre o produto e o projeto Spike, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.elevenengineering.com>
- [25]. Página na Internet com informações do fabricante sobre o produto e o projeto WirelessUSB, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.cypress.com>
- [26]. S. Murthy, J. J. Gracia-Luna-Aceves, “A Routing Protocol for Packet Radio Networks”, *International Conference on Mobile Computing and Networking*, Proceedings of 1<sup>st</sup> annual International conference on Mobile computing and networking, Pages 86-95, Berkley, CA, USA, 1995.
- [27]. C. E. Perkins, P. Bhagwat, “Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers”, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol 24, Issue 4, Pages 234-244, USA, 1994.
- [28]. D. F. Macedo, L. A. Correia, A. L. Santos, A. F. Loureiro, J. M. S. Nogueira, “Um Protocolo de Roteamento para Redes de Sensores Sem Fio”, *23º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores – SBRC*, Fortaleza, Brasil, 2005.
- [29]. P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer, D. Culler, “TinyOS: An operating system for wireless sensor networks”, *In W. Weber, J. Rabaey and E. Aarts, editors, Ambient Intelligence*. Springer-Verlag, 2004.
- [30]. D. B. Johnson, D. A. Maltz, J. Broch, “DSR: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless Ad Hoc networks”, 1999.
- [31]. C. E. Perkins, E. Belding-Royer, S.R. Das, “Ad Hoc on-demand distance vector routing”, *RFC 3561*, 2003.

- [32]. V. D. Park, M. S. Corson, “A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks”, *University of Maryland, College Park, MD USA*, 1997.
- [33]. W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, “An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol 1, N° 4, 2002.
- [34]. W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks”, *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Hawaii International Conference on System Sciences*, Vol 8, Hawaii 2002.
- [35]. D. Niculescu, B. Nath, “Trajectory based forwarding and its applications”. *Technical Report DCS-TR-488, Department of Computer Science. Rutgers University, USA* 2002.
- [36]. A. Tjang, “Trajectory based forwarding”. Disponível em página na Internet, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.cs.rutgers.edu/dataman/fouriernet/tbf.html>
- [37]. N. Sastry, D. Wagner. “Security Considerations for IEEE 802.15.4 Networks”. *Proceedings of the 2004 ACM workshop on Wireless security*. Session security analysis. Pages 32-42. ACM Press, USA, 2004.
- [38]. Sato T., M. Hagiwara. “Bee System: finding solution by a concentrated search”. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation*. Volume 4. Pages 3954-3959. IEEE, USA, 1997.
- [39]. J. Monteiro, A. Goldman, A. Ferreira. “Performance Evaluation of Dynamic Networks using an Evolving Graph Combinatorial Model”. *In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob'06)*, pages 173-180, Montreal, CA, Jun 2006.
- [40]. B. Bui-Xuan, A. Ferreira, e A. Jarry. “Computing shortest, fastest, and foremost journeys in dynamic networks”. *International Journal of Foundations of Computer Science*, vol. 14, n° 2, pag. 267-285, April 2005. Disponível na página da Internet, acessada em dezembro de 2006:  
<http://www.inria.fr/rrrt/rr-4589.html>
- [41]. C. Chiang, “Wireless Networks Multicasting”. *PhD thesis, Department of Computer Science. Universidade da Califórnia, Los Angeles, USA*, 1998.
- [42]. C.A.V.Campos, L.F.M. Moraes. “Modelos Markovianos de Mobilidade Individual para Redes Ad hoc”. *XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*.
- [43]. IEEE Standards – 802.15.4, “Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)”, *IEEE Computer Society. The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc.* 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA. 1<sup>st</sup> October 2003, 8<sup>th</sup> September 2006.

- [44]. W.C.Craig, “Zigbee: Wireless Control That Simply Works”, ZMD America Inc. Página na Internet acessada em março de 2007:  
[http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop\\_download.asp?contentID=5438](http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?contentID=5438)
- [45]. A. Leick , “*GPS Satellite Surveying*”. New York: Wiley & Sons.1995, Livro, 560 pp.
- [46]. Descrição de Rede Sem Fio Ad Hoc. Página na Internet com descrição, acessada em março de 2007:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_ad-hoc\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_ad-hoc_network)

# Apêndice A

## Principais Características da Especificação IEEE 802.15.4

São apresentados aqui os principais destaques, elaborados pelo autor, da especificação técnica para o padrão IEEE 802.15.4 que englobam a camada física (PHY) e a camada de controle de acesso ao meio (MAC), retirados dos documentos da especificação técnica feita pelo IEEE em 2003 e 2006 [43]. As camadas superiores, como a camada de rede (NTW) e camada de suporte à aplicação (APS) são de responsabilidades dos fabricantes de componentes que estão associados na aliança de empresas ZigBee [10], conforme mostra a figura A.1 e não são apresentados neste documento.

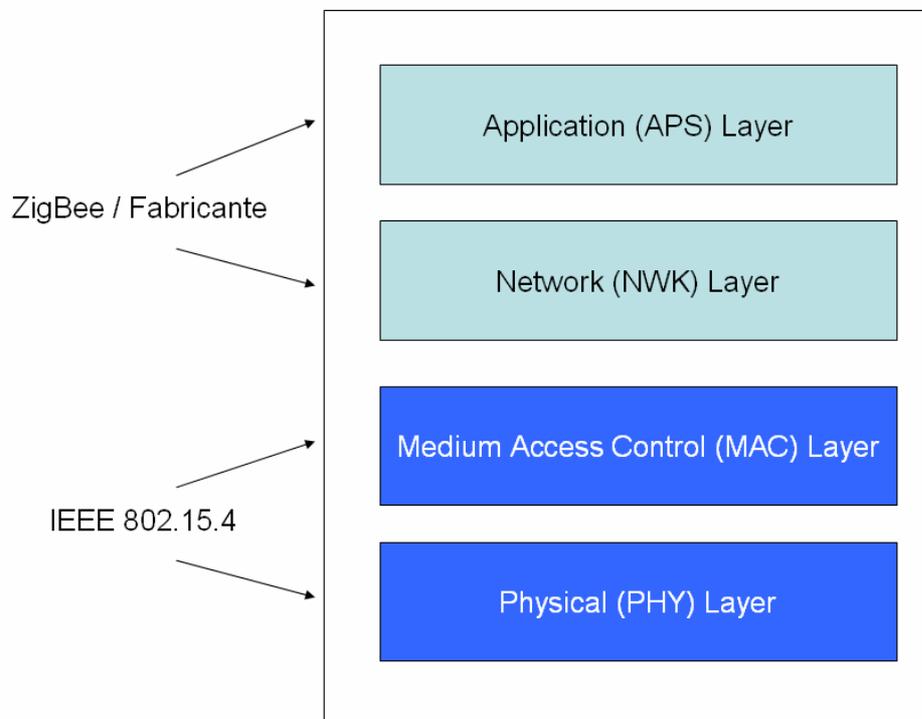


Fig. A.1 – Camadas de implementação da especificação.

## A.1 A Camada Física – PHY

A camada física, PHY, realiza a interface entre a camada MAC e o canal de rádio e fornece os serviços de dados e de gerenciamento para a camada MAC, sendo responsável pelas seguintes tarefas:

- Ativação e desativação do rádio: O rádio pode ser colocado em um dos três estados: transmitindo, recebendo, ou desligado, de acordo com a solicitação da camada MAC.
- Detecção de energia, ED – *Energy Detection*, no canal: é a estimativa de potência recebida em um canal em uso. Não é feito nenhum reconhecimento ou decodificação de sinal neste procedimento e o resultado pode ser usado pela camada de rede (NTW) no algoritmo de seleção de canal ou para indicar que o canal está livre para uso, CCA – *Clear Channel Assessment*.
- Indicação da qualidade de conexão, LQI – *Link Quality Indication*, para pacotes recebidos. A indicação é feita para cada pacote recebido. A camada PHY usa a informação de energia detectada (ED) e a relação sinal ruído para medir a qualidade de uma conexão pela qual foi recebido o pacote.
- Indicação de canal livre para uso – CCA, usado pelo método de acesso aos canais com verificação de portadora e com procedimento para evitar colisões, CSMA-CS – *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*, para acessar um canal. A camada física é responsável pela sinalização do CCA usando o detector de portadora e o sinal ED. Um canal é considerado ocupado se alguma energia acima de um limite pré-determinado for detectada pelo sinal ED ou se algum sinal for detectado com características de modulação e características de espalhamento da especificação IEEE 802.15.4.

### A.1.1 Canais de Frequência

A seleção da frequência de canal, pela especificação IEEE 802.15.4, pode ser feita através de um dos 16 canais na faixa de frequência de 2.4 GHz, ou 10 canais na faixa de 915 MHz ou 1 canal na faixa

868 MHz, como apresentado na figura A.2. A camada física é responsável pela sintonia do rádio em um dos canais especificado pela camada de acesso ao meio – MAC.

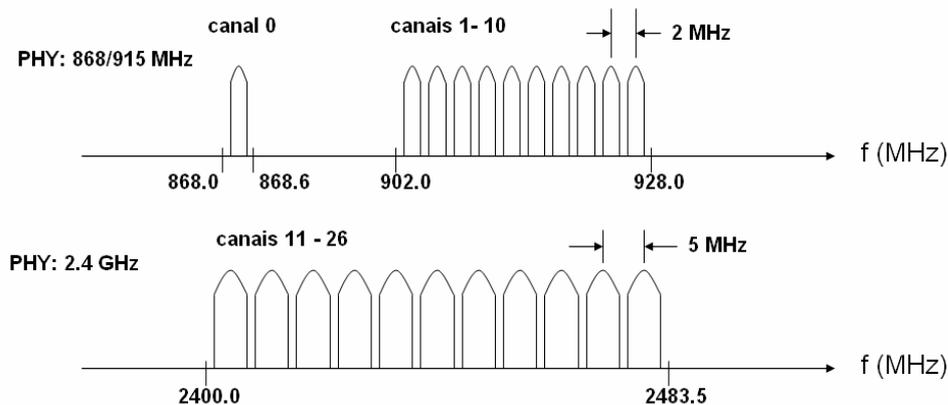


Fig A.2 – IEEE 802.15.4 - Estrutura de canais.

Onde cada canal corresponde a uma faixa de frequência, cujo valor central é:

Número do Canal	Frequência central do canal (MHz)
$k = 0$	868.3 MHz
$k = 1, 2, \dots, 10$	$906 + 2(k - 1)$
$k = 11, 12, \dots, 26$	$2405 + 5(k - 11)$

A transmissão e a recepção de dados é a função básica da camada física, que usa técnicas de modulação e espalhamento de sinal. Na faixa de 2.4 GHz é empregada a técnica de modulação 16-ário quase ortogonal, no qual cada quatro bits de informação são mapeados em uma seqüência pseudo-aleatória de 32 posições - PN. Nas seqüências PN, os dados consecutivos são concatenados e modulados na portadora usando a técnica O-QPSK – *Offset Quadrature Phase Shift Keying*. Nas faixas de 868 e 915 MHz, a camada física emprega para a modulação do sinal a técnica de seqüência direta de espalhamento de espectro, DSSS – *Direct Sequence Spread Spectrum*, em conjunto com o chaveamento binário de deslocamento de fase, BPSK – *Binary Phase Shift Keying*, onde cada quatro bits de dados são mapeados em uma seqüência de 15 posições.

## A.2 A Camada de Acesso ao Meio - MAC

A camada de acesso ao meio, MAC, realiza a interface entre a camada de rede (NTW) e a camada física - PHY e é responsável pelas seguintes tarefas:

- Gerar marcadores da rede, *beacons*, se o nó for o coordenador. O coordenador da rede pode determinar se a rede opera no modo de marcadores habilitados, onde uma estrutura de Superframe é usada, ou trabalha sem marcadores, onde o acesso não é padronizado pelo Superframe. No caso onde a rede opera com marcadores, os Superframes são delimitados pelos marcadores e divididos em porções de tempo iguais (padrão = 16), *time slots*, denominados *aNumSuperframeSlots*. Um coordenador transmite periodicamente os marcadores para sincronizar os nós ligados a ele.
- Sincronizar com os marcadores. Um nó ligado a um coordenador que opera em modo de marcadores habilitados deve buscar os marcadores para sincronizar com o coordenador.
- Reconhecer associação e dissociação de nós na rede, o que permite que uma rede seja criada ou alterada dinamicamente, ou seja, permite que a rede possa ter capacidade de auto-configuração e auto-adaptação.
- Empregar o mecanismo de acesso aos canais pela verificação de portadora com capacidade de evitar colisões – CSMA-CA.
- Prover uma conexão confiável entre dois nós, empregando alguns mecanismos, tais como acesso aos canais de transmissão pela técnica CSMA-CA, reconhecimento e retransmissão de frames e a verificação de erros no frame através de um algoritmo CRC.

### A.2.1 Modos de Acesso ao Meio

O coordenador da rede pode estipular a forma que os nós acessam os canais de frequência para se comunicar: o modo com marcadores e o modo sem marcadores. No modo com marcadores, é definida uma estrutura temporal, o Superframe, que define os instantes de tempo em que os nós podem acessar

os canais de comunicação usando a técnica CSMA-CA e os instantes em que determinados canais têm uso exclusivo das porções de tempo para se comunicar, sem que haja a necessidade de competir pelo canal. No modo sem marcadores, não existe a estrutura de Superframe e os nós devem sempre usar a técnica CSMA-CA para fazer uso dos canais de comunicação.

Para usar e manter o mecanismo de porções de tempo garantidas – GTS, quando a rede opera no modo com os marcadores habilitados, o coordenador estipula porções de tempo do superframe para um determinado nó. Todas as porções de tempo reservadas – GTS, correspondem aos períodos de tempo fixos reservados para comunicação exclusiva, denominado CFP – *Contention Free Period*, como mostrado na figura A.3.

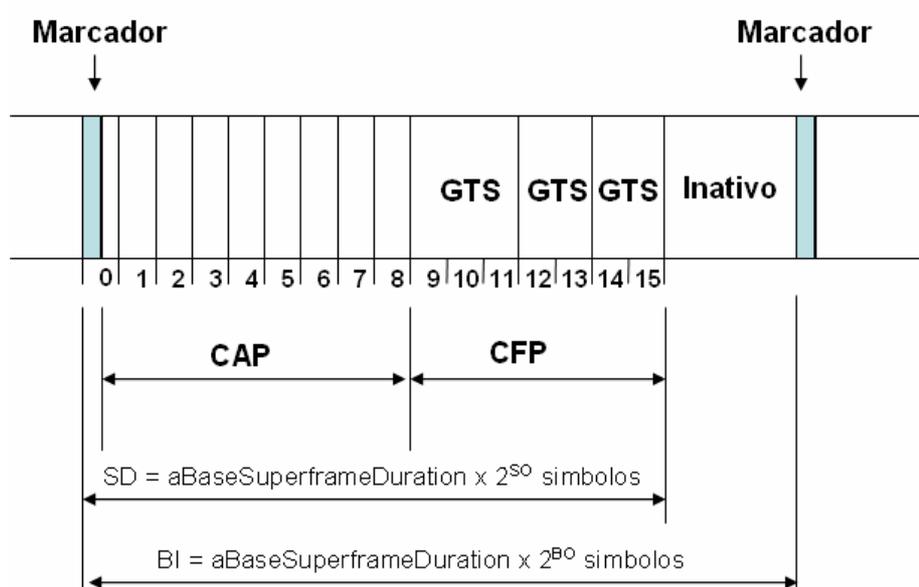


Fig.A.3: Estrutura de um Superframe no modo com marcadores.

### A.3 Características Gerais

O padrão fornece especificação detalhada dos seguintes itens: tipo de dispositivos, ou nós, estrutura do frame, estrutura do Superframe, modelo de transferência de dados, robustez, considerações de consumo de energia, e segurança de dados. Onde se podem destacar:

Dispositivos de dois tipos. Numa rede IEEE 802.15.4 são definidos dois tipos de dispositivos, ou nós, com função total, FFD – *Full Function Device* ou com funções reduzidas, RFD – *Reduced Function Device*. Os nós FFD podem se comunicar com nós FFD e com nós RFD, e podem operar em três modos diferentes:

- como coordenador da rede,
- como roteador, ou coordenador de um grupo e
- como um simples nó.

Os nós RFD podem se comunicar apenas com um nó FFD e são dedicados a aplicações extremamente simples, como sensores por exemplo.

O formato do Superframe é definido pelo coordenador da rede, e é constituído por uma parte ativa e uma parte inativa opcional, como apresentado na figura A.3, delimitado pelos marcadores. A duração do Superframe é denominada BI – *Beacon Interval*, e a duração da parte ativa do Superframe é denominada SD – *Superframe Duration* e são definidos como:

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \text{ simbolos}$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \text{ simbolos}$$

Onde,

$aBaseSuperframeDuration = 960$  simbolos

BO = ordem de marcador e

SO = ordem de Superframe

$0 \leq SO \leq BO \leq 14$

Os valores de ordem de marcador e ordem de Superframe são determinados pelo coordenador da rede. A parte ativa do Superframe é subdividida em  $aNumSuperframeSlots$  (valor default é 16) de durações iguais, e o marcador é transmitido na primeira porção, *slot*, de cada Superframe. A parte ativa

pode ser ainda subdividida em dois períodos: um período de acesso livre, CAP – Contention Access Period e um período opcional de acesso reservado, CFP – Contention Free Period, que pode acomodar até sete porções de tempo garantidas, GTS – Guaranteed Time Slots, e cada GTS pode ocupar mais do que uma porção de tempo, *time slot*. Entretanto, alguma porção do CAP deve permanecer para que outros nós tenham acesso à rede e para que os nós possam aderir à rede. O mecanismo CSMA-CA deve ser usado para se acessar os canais no período CAP e todas as transações devem ser concluídas antes do início do período de CFP. Também, todas as transações durante o GTS devem terminar antes do início do próximo GTS ou do final do período CFP.

## A.4 Estrutura dos Frames

Os frames, como representados na figura A.4, são originados na camada MAC, e são constituídos por um cabeçalho - MHR, por uma área útil para dados - *MAC payload* e por um rodapé – MFR que contém a seqüência de verificação do frame – FCS. Estes frames são transferidos para a camada física, onde formam a unidade de dados de serviço da camada física – PSDU e onde recebem as informações adicionais de tamanho do frame, delimitador de início de frame e uma seqüência de preâmbulo antes de serem transmitidos.

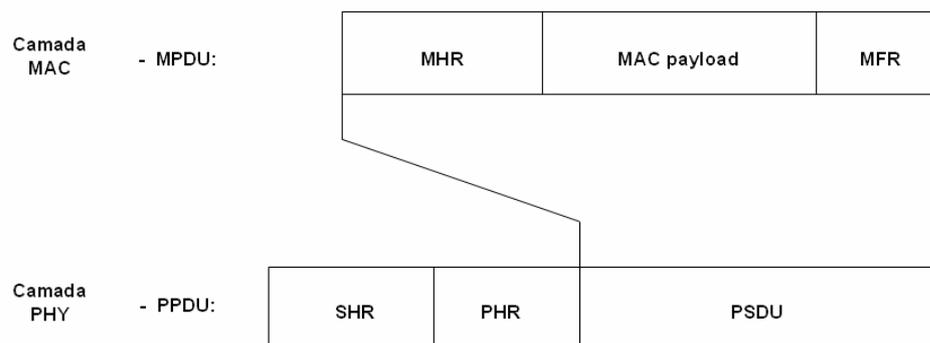


Fig. A.4 – Estrutura dos frames.

Onde,

MPDU: MAC Packet Data Unit = MHR + MAC Payload + MFR

MHR: MAC header

MAC payload: área disponível de dados do frame

MFR: MAC footer = FCS – Frame Check Sequence

e

PPDU: PHY Packet Data Unit = SHR + PHR + PSDU

SHR: Synchronization Header = Seqüência Preâmbulo + Delimitador Início de Frame

PHR: PHY Header = Tamanho do Frame

PSDU: PHY Service Data Unit.

#### A.4.1 Estrutura dos Frames e Tipos de Frames

O frame MPDU tem o formato apresentado na figura A.5:

Tamanho Octetos →	2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/10/14	variável	2
	Controle	Nº Sequencial	Id. PAN Destino	Endereço Destino	Id. PAN Remetente	Endereço Remetente	Informações Segurança	informações	FCS
	MHR							MAC payload	MFR

Fig A.5 – MPDU – MAC Packet Data Unit.

O campo de controle do frame traz informações distribuídas nos 16 bits como apresentado na figura A.6:

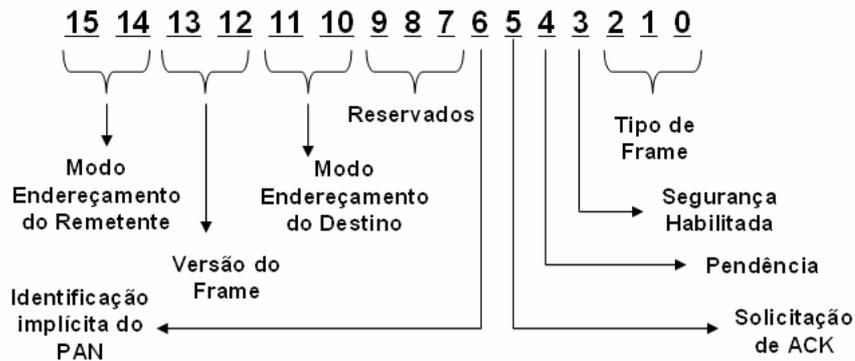


Fig. A.6: Campo de controle do cabeçalho do frame.

Onde,

- Tipo de Frame pode ser:
  - 0 0 0 – frame de marcador
  - 0 0 1 – frame de dados
  - 0 1 0 – frame de reconhecimento - ACK
  - 0 1 1 – frame de comandos MAC
  - 1 0 0 - reservado
  - 
  - 
  - 
  - 1 1 1 – reservado
- Segurança Habilitada: se diferente de zero indica que os dados a serem transmitidos devem estar protegidos e com isto o campo com as informações de segurança, no cabeçalho, deve estar presente.
- Pendência: se diferente de zero indica que existem mais dados a serem transmitidos além, dos que estão sendo transmitidos no frame atual.
- Solicitação de ACK: se diferente de zero indica que o destinatário deve enviar de volta um frame de reconhecimento de recebimento do frame atual.

- Identificação implícita do PAN: se diferente de zero indica que o frame contém apenas a identificação do PAN destino e assume que o endereço do remetente é o mesmo.
- Modo de endereçamento do destino e modo de endereçamento do remetente podem ser:
  - 0 0 – campos de endereço e de identificação do PAN não presentes
  - 0 1 - reservado
  - 1 0 – endereçamento curto de 16 bits
  - 1 1 – endereçamento completo de 64 bits.
- Versão do frame:
  - 0 0 – segue especificação de 2003
  - 0 1 – segue especificação de 2006

Além do campo de controle, o cabeçalho contém as seguintes informações:

Número seqüencial, denominado BSN (Beacon Sequence Number) para os frames de marcadores e DSN (Data Sequence Number) para os frames de dados e comandos do MAC.

Identificação do PAN destino identificação da PAN remetente: 16 bits indicando o endereço das redes.

Endereço do remetente e endereço do destino: 16 ou 64 bits indicando o endereço do nó.

Informações de segurança é um campo com tamanho variável que especifica o processo de segurança dos dados incluindo o nível de proteção e qual chave de segurança deve ser usada.

O padrão define quatro estruturas diferentes de frames:

- Frame de marcador, usado pelo coordenador para transmitir os marcadores
- Frame de dados, usado para todas as transferências de dados
- Frame de reconhecimento, usado para confirmar uma recepção de frame bem sucedida
- Frame de comandos MAC, usado para o controle de transferências pela camada MAC.

### A.4.2 Frames de Marcadores

Os frames de marcador, para a camada física de 2.4 GHz, têm o formato apresentado na figura A.7:

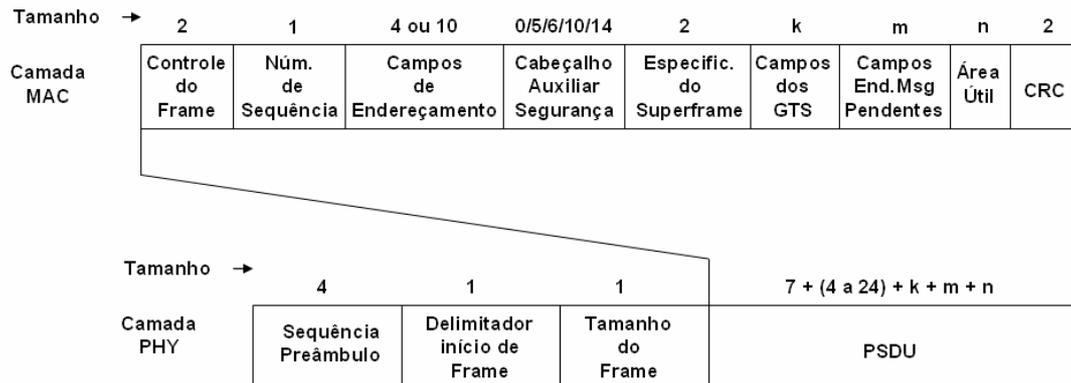


Fig. A.7 – Frame de Marcadores.

Onde,

$$\text{MAC Payload} = \text{Espec. Superframe} + \text{Campos GTS} + \text{Campos Pendentes} + \text{Área Útil}$$

### A.4.3 Frames de Dados

Os frames de dados, para a camada física de 2.4 GHz, têm o formato apresentado na figura A.8:

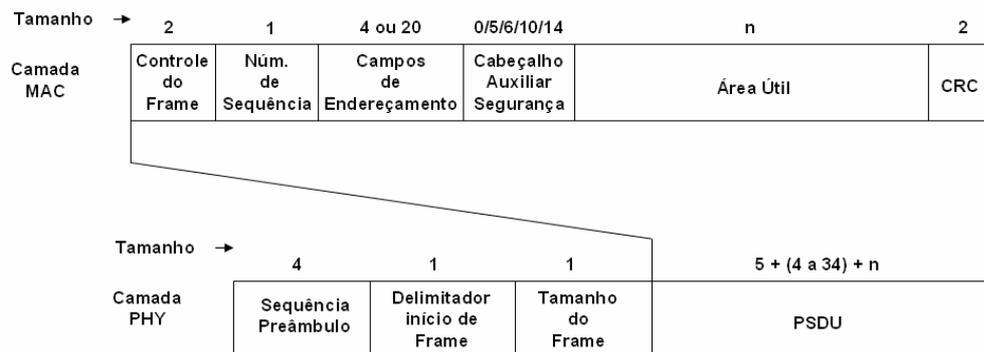


Fig. A.8 – Frame de Dados.

Neste caso,

MAC Payload = Área Útil de dados.

#### A.4.4 Frames de Reconhecimento - ACK

Os frames de reconhecimento, para a camada física de 2.4 GHz, têm o formato apresentado na figura A.9:

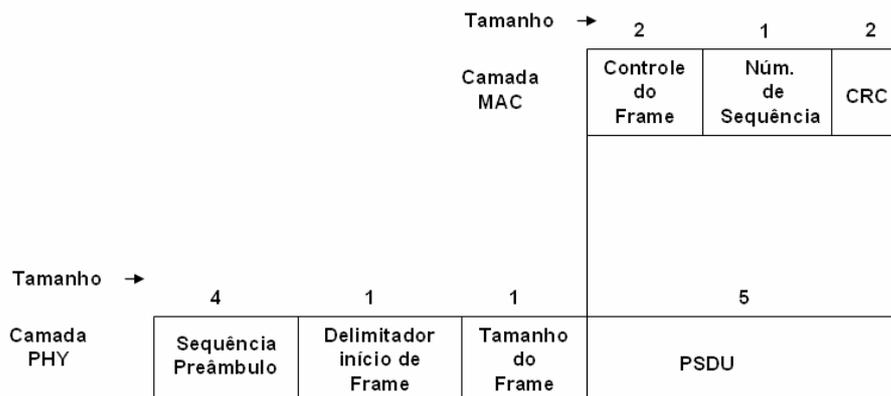


Fig. A.9 - Frame de Reconhecimento – ACK.

Neste caso,

MHR = Controle Frame + Num.Seq.Frame

MFR: MAC Footer = CRC

MPDU = MHR + MFR

### A.4.5 Frames de Comandos MAC

Os frames de comandos MAC, para a camada física de 2.4 GHz, têm o formato apresentado na figura A.10:

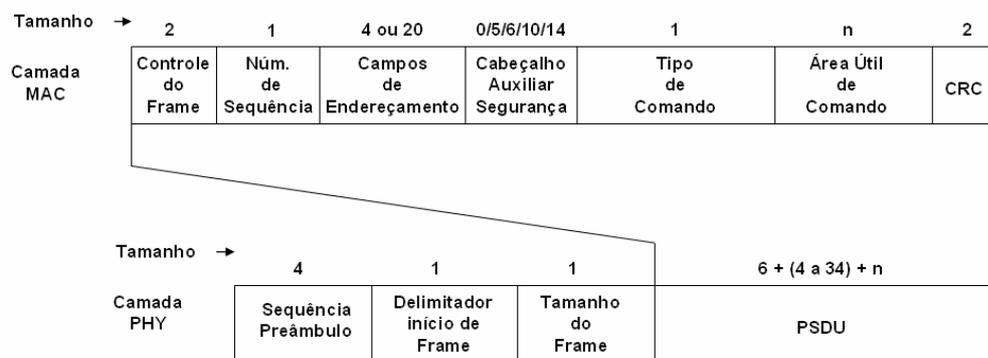


Fig. A.10 – Frame de comandos MAC.

Neste caso,

MAC Payload = Tipo de Comando + Área Útil de Comando

E os comandos da camada MAC podem ser:

- Solicitação de associação à rede: comando que pode ser transmitido por qualquer dispositivo que queira se associar à rede. Este comando deve ser feito a um coordenador de rede ou a um coordenador com capacidade de permitir a associação de nós. Os nós RFD não podem receber este comando.
- Resposta a uma solicitação de associação à rede: comando de resposta à solicitação de associação à rede. Este comando deve ser transmitido pelo coordenador da rede ou por um

coordenador com capacidade de permitir associação de nós. Os nós RFD não devem transmitir este comando.

- Notificação de dissociação da rede: pode ser transmitido por qualquer dispositivo da rede, ou seja, por um coordenador da rede ou um coordenador local que comanda a saída de um nó da rede ou por um nó da rede que envia o comando notificando a própria saída da rede.
- Requisição de dados: comando enviado por um nó para o coordenador da rede ou para o coordenador local. Este comando pode ser usado em três situações distintas: quando o coordenador envia a informação no marcador que existem dados pendentes para o nó específico; ou quando há um comando de uma camada superior indicando a busca por dados e ainda em resposta ao reconhecimento de associação a rede.
- Notificação de conflito do endereço da PAN: é um comando enviado por um nó ao coordenador da rede quando um conflito de endereço da rede PAN é detectado.
- Notificação de orfandade: é um comando enviado por um nó para o coordenador quando há perda de sincronismo do nó com o coordenador. Os nós RFD não devem ser capaz de receber este comando.
- Requisição de sinal de marcador: este comando pode ser transmitido por um nó para buscar por coordenadores de redes ativos na área de alcance do rádio. Este comando tem como objetivo identificar os coordenadores de redes PANs que operam na área de alcance do rádio.
- Realinhamento de coordenador: este comando deve ser transmitido por um coordenador de rede em duas situações: na recepção de um comando de notificação de orfandade e tendo identificado que o nó que transmitiu o comando faz parte da rede; ou quando algum atributo de configuração da rede é alterado e é recebida uma primitiva de requisição de iniciação.
- Solicitação de tempo exclusivo para a comunicação – GTS: este comando é transmitido por um nó que requer uma porção de tempo exclusiva para a transmissão de dados – GTS, ou para solicitar a desocupação da porção de tempo exclusiva que o nó tem reservada.