IVAN ROCA FLORIDO

**REDE DE SENSORES SEM FIO EM AMBIENTES VEICULARES
BASEADA NO PADRÃO ZIGBEE**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.**

São Paulo

2008

Dedicatória

Dedico este trabalho em primeiro lugar a meus pais Carlos H. e Gloria por me dar amor, exemplo e cuidar de minha educação sempre. A meus irmãos Carlos F. e Oscar por seu apoio incondicional em todo este tempo.

Agradecimentos

Agradeço primeiro a Deus e a meus pais por me permitir e me dar a oportunidade de demonstra-lhes que tudo é possível nesta vida através de esforço e dedicação, eles sempre me deram exemplo, ajuda e o apoio para que eu cresça como profissional e como humano.

Um agradecimento especial ao meu Orientador o Prof. Dr. Sergio Takeo Kofuji por toda a sua dedicação, apoio, entusiasmo, seu carisma, capacidade intelectual, disponibilidade e por confiar em mim. Foram fatores importantes para que este trabalho de mestrado se realizasse.

À Escola Politécnica da USP, ao departamento da Engenharia Elétrica, e ao Laboratório de Sistemas Integráveis que me outorgou todos os recursos e material necessário para a concretização de este trabalho.

Agradeço ao grupo PAD do LSI da Escola Politécnica da USP por seu companheirismo e amizade.

À equipe de HumanLab e Embarcados do Grupo PAD por seu apoio em tudo momento.

Agradeço também aos membros da banca de mestrado, pela paciência em ler meu trabalho e pelas suas valiosas sugestões e comentários.

E a todos aqueles que, de forma direta e indireta, contribuíram na elaboração desta dissertação.

Resumo

A área automotiva cada vez mais incorpora dispositivos e sistemas eletromecânicos na comunicação. Estes dispositivos são baseados nas informações internas e externas coletadas através de sensores específicos. Esta estrutura permite, por exemplo, a automatização de sistemas de transporte em ambientes controlados, monitoramento de veículos, informações de condições de trânsito e outros. Os protocolos de comunicação são fundamentais na troca de dados entre os módulos eletrônicos e certamente, se não fosse pela aplicação desses protocolos, não teríamos a integração de boa parte dos sistemas eletrônicos atualmente disponíveis. A integração dos sistemas de comunicação automotivos através de uma rede de sensores sem fio (RSSF) baseada nas especificações do padrão IEEE 802.15.4 *ZigBee*, constitui uma alternativa de comunicação nos ambientes automotivos. Além disso, esta integração em ambientes automotivos diminui a quantidade de fiação nos veículos. Neste trabalho apresentamos uma rede de sensores tipo estrela para a aquisição dos dados em um ambiente automotivo, realizando medições de intensidade do sinal, qualidade do sinal, *throughput*, pacotes perdidos.

Abstract

The automotive area is including more and more devices and electromechanical systems at communication. Those devices are based in internal and external information collected through specific sensors. This structure allows, for example, automation of transport systems at controlled environments, vehicles monitoring, information of transit conditions and other. The communication protocols are fundamentals in data exchange between electronic modules and without those protocols, couldn't be possible integrate a majority of available electronic systems. The integration of automotive communication systems through wireless sensor network (WSN) based in the specifications of the standard IEEE 802.15.4 ZigBee constitute an alternative of communication in automotive environments. Besides, this integration in automotive environments reduces the quantity of wires in the vehicles. In this work we present a WSN star topology for data acquisition in automotive environment performing measurements of signal intensity, quality of signal, throughput, and lost packages.

Lista de Figuras

FIGURA 1 FIOS QUE SÃO SUBSTITUÍDOS (AKINGBEHIN 2005)	6
FIGURA 2 REDE DE SENSORES SEM FIOS.....	10
FIGURA 3 CAMADAS DE RSSF SEGUNDO SUA ESTRUTURA.	11
FIGURA 4 PILHA DO PROTOCOLO <i>ZIGBEE</i>	18
FIGURA 5 TOPOLOGIA <i>ZIGBEE</i> (FERRARI, ET AL. 2007)	20
FIGURA 6 LOCAÇÃO DOS CANAIS BASEADOS NO PADRÃO IEEE 802.15	22
FIGURA 7 TX DISTÂNCIA D DE R_x (GIACOMIN E VASCONCELOS 2007).	24
FIGURA 8 REFLEXÃO DO SINAL.....	27
FIGURA 9 DIFRAÇÃO DO SINAL.	28
FIGURA 10 <i>ANTI BLOCKING SYSTEM</i> (TOYOTA 2008)	34
FIGURA 11 <i>BRAKING-ASSISTANT</i> (TOYOTA 2008)	34
FIGURA 12 <i>ELECTRONIC STABILITY PROGRAM</i> (TOYOTA 2008)	35
FIGURA 13 <i>TORQUE CONTROL SYSTEM</i> (TOYOTA 2008)	35
FIGURA 14 ACTIVE BODY CONTROL (MERCEDES 2008)	36
FIGURA 15 <i>CONTINUOUS DAMPING CONTROL</i> (MERCEDES 2008)	37
FIGURA 16 CAN BUS.....	41
FIGURA 17 CIRCUITO ELÉTRICO DA INTERFACE CAN BUS (INTERFACEBUS 2008) ..	42
FIGURA 18 TRANSMISSÃO DO CAN BUS RF (SOFTING 2008).....	43
FIGURA 19 <i>POWER LINE COMMUNICATION</i> (YAMAR 2008)	45
FIGURA 20 ESTRUTURA DO IEEE 1451.0 (PERRUSSEL 2005).....	47
FIGURA 21 CONFIGURAÇÃO DO PADRÃO IEEE 1451.1 (MENESES 2007).	48
FIGURA 22 VISTA FRONTAL DO TMOTESKY (MOTEIV 2007)	51
FIGURA 23 VISTA DA FACE INFERIOR DO TMOTESKY (MOTEIV 2007).....	51
FIGURA 24 VEÍCULO PARA OS TESTES E EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	54
FIGURA 25 VEÍCULO PARA OS TESTES E EXPERIMENTOS REALIZADO.....	55
FIGURA 26 MÚLTIPLAS ROTAS DE PROPAGAÇÃO COM UM SENSOR EM ROTAÇÃO	62
FIGURA 27 ANALISADOR DE ESPECTRO FHS3	64
FIGURA 28 CONECTOR DE EXPANSÃO DE 10 PINOS (MOTEIV 2007)	65
FIGURA 29 CONECTOR DE EXPANSÃO DE 6 PINOS (MOTEIV 2007)	65

FIGURA 30 DIAGRAMA DOS MÓDULOS DO APLICATIVO SBT80APP	66
FIGURA 31 DIAGRAMA DOS MÓDULOS DO APLICATIVO PONG	67
FIGURA 32 DIAGRAMA DOS MÓDULOS DO APLICATIVO TOSBASE	68
FIGURA 33 APLICATIVO LISTEN	68
FIGURA 34 PROGRAMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO EM LABVIEW	69
FIGURA 35 COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO COM E SEM INTERFERÊNCIA <i>BLUETOOTH</i> ...	72
FIGURA 36 DESEMPENHO DO BER EM UM VEÍCULO COM RUÍDO (LEE, ET AL. 2006).....	73
FIGURA 37 LARGURA DE BANDA DE 802.11B WLAN E IEEE 802.15.4	74
FIGURA 38 <i>WV PHANTOM</i> (LEOHOLD 2004)	76
FIGURA 39 LOCALIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS NO CENÁRIO DE TESTES	78
FIGURA 40 LOCALIZAÇÃO DOS NÓS NO VEÍCULO DO LADO DE FORA	81
FIGURA 41 MAIOR INTERFERÊNCIA DO <i>BLUETOOTH</i>	85
FIGURA 42 PRIMEIRA TRAJETÓRIA DOS TESTES CIDADE UNIVERSITÁRIA	91
FIGURA 43 SEGUNDA TRAJETÓRIA DOS TESTES CIDADE UNIVERSITÁRIA	94
FIGURA 44 CARACTERÍSTICAS DOS TESTES REALIZADOS EM MOVIMENTO	96

Lista de Gráficos

GRÁFICO 1 NÍVEIS DE SINAL RSSI A 0 dBm	79
GRÁFICO 2 NÍVEIS DE SINAL RSSI A 0 dBm COM INTERFERÊNCIAS	80
GRÁFICO 3 NÍVEIS DE SINAL RSSI A 0 dBm COM OS DISPOSITIVOS NO EXTERIOR DO VEÍCULO.....	82
GRÁFICO 4 NÍVEIS DE SINAL RSSI A -10 dBm E -25 dBm NO INTERIOR DO VEÍCULO	83
GRÁFICO 5 TESTE A -25 dBm DISPOSITIVOS NO EXTERIOR DO VEÍCULO.....	84
GRÁFICO 6 SINAL DE RSSI EM CENÁRIOS COM E SEM OBSTÁCULOS	85
GRÁFICO 7 SINAL DE LQI NA LOCALIZAÇÃO DO NÓ 6 PERTO DA ESTAÇÃO BASE	86
GRÁFICO 8 SINAL DE LQI NO NÓ 9	87
GRÁFICO 9 PACOTES PERDIDOS A 0 dBm DE POTÊNCIA	88
GRÁFICO 10 PACOTES PERDIDOS A -25 dBm DE POTÊNCIA	89
GRÁFICO 11 TRANSMISSÃO PONTO A PONTO COM 36 E 128 BYTES	90
GRÁFICO 12 TRANSMISSÃO DE ATÉ 4 NÓS EM UMA ARQUITETURA ESTRELA.....	90
GRÁFICO 13 INÍCIO DO TESTE COM AS 9 LOCALIZAÇÕES DOS DISPOSITIVOS DE SENSORES	92
GRÁFICO 14 TESTE EM MOVIMENTO A 90 KM/H COM 9 DISPOSITIVOS DE SENSORES.....	93
GRÁFICO 15 TESTE EM MOVIMENTO A 90 KM/H, NÓS A, B E C COM NÍVEL DE SINAL -72 dBm	93
GRÁFICO 16 TESTES EM MOVIMENTO FINAL DO PERCURSO.....	95
GRÁFICO 17 TESTE EM MOVIMENTO A 20 KM/H, DISTÂNCIAS DE 1 E 8 M	97
GRÁFICO 18 TESTE EM MOVIMENTO A 60 KM/H, DISTÂNCIAS DE 1 E 8 M	97

Lista de Tabelas

TABELA 1 SISTEMAS SEM FIOS E SUAS PROPRIEDADES	4
TABELA 2 COMPARATIVO DOS PADRÕES IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.3, IEEE 802.15.4	21
TABELA 3 ALGUNS PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO CLASSE A (GUIMARÃES 2007)..	38
TABELA 4 ALGUNS PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO CLASSE B (GUIMARÃES 2007)..	39
TABELA 5 ALGUNS PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO CLASSE C (GUIMARÃES 2007)..	40
TABELA 6 PLATAFORMAS TÍPICAS E COMPONENTES DE <i>HARDWARE</i> DAS RSSF	52
TABELA 7 LOCALIZAÇÃO DOS NÓS SENSORES NO VEÍCULO.....	54
TABELA 8 CONFIGURAÇÃO DA POTÊNCIA DO SINAL DO CC2420 (MOTEIV 2007)	56
TABELA 9 NÍVEIS DO SINAL DO LQI.	59
TABELA 10 PARÂMETROS 802.15.4 CAMADA FÍSICA.....	60

Lista de Abreviações

ABS	Anti Blocking System
ABC	Active Body Control
AP	Access Point
ADC	Analog to Digital Converter
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BAS	Braking-Assistant
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CAN	Control Area Network
CAP	Contention Access Period
CDC	Continuous Damping Control
CFP	Contention Free Period
CI	Circuito Integrado
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/BA	Carrier Sense Multiple Access with Bitwise Arbitration
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTS	Clear to Send
CWG	Car Working Group
DAC	Digital to Analog Converter
DCF	Distributed Coordination Functions

DIFS	Distributed Inter Frame Space
DMA	Direct Memory Access
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EBFD	Electric Brake Force Distribution
ECU	Electric Control Unit
EMC	Electromagnetic Compatibility
ESP	Electronic Stability Program
FCC	Federal Communication Commission
FFD	Full Function Device
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSK	Frequency Shift Keying
GTS	Guaranteed Time Slots
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IHM	Interface Homem Máquina
ISM	Industrial Scientific Medical
ISSO	International Organization for Standardization
LIN	Local Interconnect Network
LQI	Link Quality Indication
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network
MAC	Controle de Acesso ao Meio
MBOA	Multiband OFDM Alliance
MIPS	Millions of Instructions Per Second
MOST	Media Oriented System Transport
MSR Sense	MSR Networked Embedded Sensing Toolkit
NCAP	Network Capable Application Processor
NIST	National Institute of Standards and Technology

OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OQPSK	Orthogonal Quadrature Phase Shift Keying
PCF	Função de Coordenação Pontual
PER	Packet Error Rate
PDMA	Polarization Division Multiple Access
PLC	Power Line Communication
PPM	Pulse Position Modulation
PR	Potência Recebida
PSK	Phase Shift Keying
PT	Potência Transmitida
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Rádio Frequência
RFD	Reduced Function Device
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTS	Request to Send
SAE	Society of Automotive Engineers
SIG	Special Interest Group
SRS	Supplemental Restraint System
STIM	Smart Transducer Interface Module
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra Wide Band
TBIM	Transducer Bus Interface Module
TCS	Torque Control System
TEDS	Transducer Electronic Data Sheet

TII	Transducer Independent Interface
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

Sumário

DEDICATÓRIA	II
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE GRÁFICOS	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIações.....	X
SUMÁRIO	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	4
1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	6
1.3. OBJETIVOS	7
1.3.1. <i>Objetivo geral</i>	7
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	7
1.4. CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS	8
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	9
2. CONCEITOS BÁSICOS.....	10
2.1. REDES DE SENSORES SEM FIOS.....	10
2.2. PADRÕES DE COMUNICAÇÃO	12
2.2.1. <i>Padrão IEEE 802.11</i>	12
2.2.2. <i>Padrão IEEE 802.15.1</i>	15
2.2.3. <i>Padrão IEEE 802.15.3</i>	16
2.2.4. <i>Padrão IEEE 802.15.4</i>	18
2.3. PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE RÁDIO	22
2.4. MECANISMOS BÁSICOS DE PROPAGAÇÃO.....	26
2.4.1. <i>Reflexão</i>	26
2.4.2. <i>Difração</i>	27
2.4.3. <i>Dispersão</i>	28
2.5. COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA	29

2.6.	VEÍCULOS INTELIGENTES	31
2.6.1.	<i>Conceitos</i>	32
2.6.2.	<i>Sistemas Mecatrônicos Embarcados</i>	33
2.7.	PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO AUTOMOTIVA.....	37
2.7.1.	<i>Protocolos Automotivos</i>	38
2.7.1.1.	Classe A.....	38
2.7.1.2.	Classe B.....	39
2.7.1.3.	Classe C	39
2.8.	PROTOCOLO CAN	40
2.9.	CAN RF	43
2.10.	SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO 42 VOLTS	43
2.11.	POWER LINE COMMUNICATION	44
2.12.	UWB EM VEÍCULOS AUTOMOTIVOS	45
2.13.	TRANSDUTOR INTELIGENTE IEEE 1451	46
3.	METODOLOGIA.....	50
3.1.	CONFIGURAÇÕES DOS EXPERIMENTOS	50
3.1.1.	<i>Nó Sensor TmoteSky</i>	50
3.1.2.	<i>Sistema Operacional TinyOS 1.x</i>	53
3.1.2.1.	TinyOs 2.0	53
3.1.3.	<i>Localização dos nós sensores</i>	54
3.1.4.	<i>Parâmetros da comunicação</i>	56
3.1.4.1.	Energia de transmissão	56
3.1.4.2.	Envio de pacotes	56
3.1.4.3.	Seleção de canal de rádio.....	57
3.1.4.4.	Formato do pacote	57
3.2.	DEFINIÇÃO DAS MÉTRICAS	57
3.2.1.	<i>RSSI</i>	57
3.2.2.	<i>LQI</i>	58
3.2.3.	<i>Pacotes Perdidos</i>	59
3.2.4.	<i>Throughput</i>	59
3.2.5.	<i>Latência</i>	59
3.2.6.	<i>Doppler</i>	61
3.3.	ANALISADOR DE ESPECTRO FHS3	62
3.4.	APLICATIVOS PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS	64
3.5.	APLICATIVOS PARA VISUALIZAÇÃO DOS DADOS.....	68
4.	TRABALHOS RELACIONADOS	70
5.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	77

5.1.	NÍVEIS DO SINAL RSSI	77
5.2.	NÍVEIS DO SINAL LQI.....	85
5.3.	PACOTES PERDIDOS	87
5.4.	ANÁLISE DO THROUGHPUT	89
5.5.	RESULTADOS FUNCIONAIS	91
5.6.	RESULTADOS EM MOVIMENTO.....	95
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
6.1.	CONCLUSÕES.....	99
6.2.	LIMITAÇÕES.....	100
6.3.	TRABALHOS FUTUROS	101
7.	REFERÊNCIAS	102
8.	APÊNDICE	107
8.1.	APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES	107
8.1.1.	<i>Publicações no ano 2007</i>	<i>107</i>
8.1.2.	<i>Publicações no ano 2006</i>	<i>107</i>
8.2.	APÊNDICE B - CÓDIGO FONTE DOS APLICATIVOS	109
8.2.1.	<i>SBT80app</i>	<i>109</i>
8.2.1.1.	MobileNode.nc	109
8.2.1.2.	MobileNodeM.nc.....	109
8.2.1.3.	SBT80Msg.h.....	114
8.2.1.4.	SBT80ADCmap.h.....	114
8.2.2.	<i>Pong</i>	<i>115</i>
8.2.2.1.	PongC.nc	115
8.2.2.2.	PongM.nc.....	116
8.2.2.3.	PongMsg.h	118
8.3.	APÊNDICE C - PROGRAMA DO LABVIEW 8.0.....	119
8.3.1.	<i>Diagrama dos módulos em LabView</i>	<i>119</i>
8.3.2.	<i>Diagrama hierárquico em LabView</i>	<i>120</i>

Capítulo 1

1. Introdução

Os avanços nas tecnologias de comunicação e na micro-eletrônica permitiram a criação das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) de baixo custo, baixo consumo de energia, com múltiplas funções e tamanho do *hardware* reduzido. Estes dispositivos (nós sensores) geralmente apresentam capacidade de comunicação a curtas distâncias (AKYILDIZ, et al. 2002), e monitoram variáveis ambientais, processam dados e podem ser auto-configuráveis.

Nas RSSF os nós sensores operam com baterias. Para muitas aplicações, eles devem se manter operantes por períodos que variam de 2 a 5 anos, sem reposição das baterias. Para isso, um sistema de nós sensores deve ser projetado visando um consumo eficiente de energia principalmente na comunicação de dados, tanto na camada física quanto nas superiores (LEVIS, et al. 2003) (WANG A. 2001).

O módulo de comunicação de um nó sensor normalmente é o maior responsável pelo consumo de energia, devido à transmissão e recepção dos dados. O consumo depende também do tipo de sistema de comunicação utilizado como, por exemplo, o uso de rádio frequência, do infravermelho ou de som (LEE, et al. 2006).

Nos ambientes veiculares, existem padrões de comunicação que são os meios de transmissão e recepção de dados utilizados para intercomunicar módulos eletrônicos e/ou sensores e atuadores. Existem vários tipos de protocolos de comunicação, cada qual com suas características técnicas específicas e, portanto, com as suas aplicações mais apropriadas (GUIMARÃES 2007).

Muitos veículos provêm e utilizam o sistema de comunicação com fios CAN – (*Control Area Network*). Há ainda propostas para a utilização de redes sem fio para comunicação intra-veicular. O fator principal considerável para a substituição de um

sistema com fios para um sem fios são o uso de banda e o acesso aos protocolos (LEE, et al. 2006).

O sistema de comunicação veicular CAN possui algumas desvantagens no sistema de fiação e algumas vantagens para o sistema sem fio. A desvantagem é a dificuldade do posicionamento dos fios no espaço reduzido utilizado e o alto preço dos fios e os conectores (LEE, et al. 2006). A vantagem do sistema sem fios é alta confiança e seguridade pela redução dos conectores os quais causam colapsos. Além disso, o desenvolvimento de altas velocidades nos sistemas sem fios são uma razão de fazer a mudança de um sistema com fios para um sistema sem fios (LEE, et al. 2006).

Nos ambientes de computação ubíqua, como os de um veículo, espera-se que exista inteligência e comunicação através de redes sem fio, para o fornecimento de serviços. Isto requer uma arquitetura de rede e uma nova tecnologia de sensoriamento de veículos que suporte mobilidade. A mobilidade da rede para veículos fornece ao usuário controle e diagnósticos de seu veículo como um gerenciamento remoto.

A banda utilizada para serviços telemáticos é a banda *Industrial Scientific Medical* (ISM), a qual não precisa de autorização para ser utilizada. Nesta banda ISM nas frequências de 2.4 GHz e 5 GHz podem ser consideradas na utilização de altas velocidades de transmissão de dados (LEE, et al. 2006). Entretanto, os sistemas sem fios na frequência de 2.4 GHz como o *Bluetooth* com 10 m de alcance e 1 Mbps e *ZigBee* com um alcance de 10 a 75 m e 250 Kbps (LEE, et al. 2006), têm uma limitada área de cobertura. Porém, é adequada para ser utilizada em ambientes domésticos e veiculares (LEE, et al. 2006).

Uma tecnologia mais recente, *Ultra Wide Band* (UWB), baseada nas normas de WiMedia¹ traz a conveniência e a mobilidade da comunicação sem fio para altas velocidades de interconexão entre dispositivos. O propósito do UWB é prover baixa

¹ WiMedia, é um padrão de plataforma de rádio de alta velocidade UWB, com eficientes consumo de energia e altas velocidades de transmissão de dados.

complexidade, baixo custo, baixo consumo de potência e altas taxas de transmissão de dados entre dispositivos sem fio, dentro de espaços de operações pessoais.

1.1. Motivação

Boa parte dos veículos modernos utiliza fios como meio para o envio de sinais de controle do controlador central para cada parte do veículo. O sistema de comunicação veicular CAN é o principal canal em um sistema sem fio para a transmissão e recepção de dados. Nesta área, existem algumas vantagens utilizando sistemas com dispositivos sem fios. A grande desvantagem da utilização de fios nos veículos é a dificuldade de distribuição dos fios num espaço reduzido, além do preço dos fios e conectores. As vantagens da utilização de sistemas sem fios nos veículos é a alta confiabilidade na transmissão dos dados (WU, et al. 2006), pela diminuição de cabos e aproveitamento de espaço. Por outro lado, no desenvolvimento de altas velocidades nos sistemas de comunicação sem fios é uma razão considerável para a mudança de sistemas que utilizam fios a sistemas sem fios (ELBATT, et al. 2006).

Em um veículo existem muitos *Electric Control Unit* (ECU), alguns exemplos são: o sistema de ar condicionado, controle de injeção, controle mecânico do processo de explosão entre outros. O controle dos ECU em um veículo utilizando um sistema sem fio considera alguns fatores importantes. O primeiro fator é a frequência de banda do sistema sem fio. A frequência de banda é limitada, a maioria dos sistemas sem fios utiliza 2.4 GHz na banda ISM. Na Tabela 1 mostra-se os principais padrões de comunicação sem fios com suas respectivas bandas e propósito de uso.

Tabela 1 Sistemas sem fios e suas propriedades

Padrões de Comunicação	Propriedades		
	Banda (GHz)	Faixa (m)	Propósito
ZigBee	2.4	10 -75	Comunicação
Bluetooth	2.4	10	Comunicação
WLAN	2.4 – 2.4835	100	Comunicação
Microondas	2.4		Não Comunicação

Trabalhos recentes discutem rede sensores em ambientes automotivos. As aplicações nestes estudos incluem a medições de parâmetros como quantidades de pacotes recebidos, porcentagem de pacotes perdidos, qualidade do sinal, custo de transmissão, tempo de resposta, *throughput*, latência, entre outros parâmetros.

Atualmente, os veículos em produção podem chegar a ter mais de 150 sensores e *switches*. Este número está na expectativa de crescer mais adicionando novas características desejáveis nos veículos modernos (**GM 2007**), por exemplo, a General Motors está conduzindo a indústria para o oferecimento de *StabilityTrak* (Controle eletrônico de estabilidade) como um padrão no ano de 2007 (**GM 2007**). Este padrão e outros novos fatores poderão aumentar a utilização de sensores e *switches* incrementados nos veículos aumentando a complexidade, custo e a infraestrutura de cabos. Esta infra-estrutura de cabos em alguns casos é mais pesada, mais complexa, sendo em alguns casos muito cara. Além disso, pode contribuir para o incremento de mais de 50 kg no veículo (**LEE e HEFFERNA 2001**) o que prejudica em parte o desempenho do veículo.

Considerando todos estes fatores e a complexidade dos veículos de hoje, justifica-se a importância do estudo de uma solução viável no ambiente automotivo. A utilização de uma RSSF na área automotiva, que permita a análise, controle, monitoramento, gerenciamento, entre outros aspectos de dados, é uma das principais motivações do presente trabalho.

1.2. Definição do problema

O crescimento da utilização de novas tecnologias nos sistemas de comunicação automotivos exige o estudo das características de um ambiente veicular como: sistemas de controle e monitoramento, sistemas de segurança e desempenho, estudos dos padrões de comunicação, o *hardware* a ser utilizando, aplicações de *software*, entre outros.

Segundo (LEE e HEFFERNA 2001), a quantidade de fios existentes em um veículo é consideravelmente grande, além de ocupar espaço. A troca destes fios existentes por soluções de sistemas sem fios é uma solução promissora para este problema. Por exemplo, a Figura 1 ilustra os fios do painel do controle, das luzes e alguns sensores e atuadores de um veículo a serem substituídos por uma rede de sensores (AKINGBEHIN 2005).

Figura 1 Fios que são substituídos (AKINGBEHIN 2005)

No transcurso deste trabalho, responderemos algumas questões, tais como: Uma rede de sensores de baixo consumo de energia em um ambiente automotivo é uma solução? Que tecnologia de comunicação é a mais adequada para certas aplicações em ambientes automotivos? Quais são as novas tendências na comunicação para os veículos modernos?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo principal é determinar a utilidade de uma rede de sensores sem fios de baixo consumo de energia baseada no padrão *ZigBee* e avaliar seu desempenho em um ambiente automotivo. Nestes ambientes, as redes de sensores têm o potencial de resolver os problemas de conectividade dos nós sensores, atuadores e chaves, sobretudo em aplicações de tempo real, controle e monitoramento de eventos.

1.3.2. Objetivos específicos

- 1) O primeiro objetivo específico é a análise do funcionamento dos dispositivos nós de sensores *TmoteSky* (MOTEIV 2007) em aplicações automotivas de controle, diagnóstico e monitoramento de fenômenos automotivos como temperatura, umidade, controle de oxigênio do motor, luminosidade, acelerômetro, magnetômetro, velocidade, freio, entre outros.
- 2) O segundo objetivo específico é fazer uma caracterização do nível de alcance do sinal *Received Signal Strength Indication* (RSSI) e o *Link Quality Indication* (LQI) em um ambiente automotivo. Estes testes serão feitos em diferentes cenários com características peculiares.
- 3) O terceiro objetivo é destacar os requisitos de *hardware* e *software* dos dispositivos nós de sensores, como tipo de rádio, protocolos de comunicação, tempo resposta, tempo de envio dos pacotes, pacotes perdidos, *throughput*, consumo de energia, latência, entre outros.
- 4) Finalmente, o implementação de uma aplicação em *LabView* que permita o controle, diagnóstico e monitoramento dos sensores no veículo em tempo real, observando as variações dos fenômenos no tempo e os parâmetros anteriormente escolhidos.

1.4. Contribuições esperadas

As contribuições esperadas ao término deste trabalho, utilizando redes de sensores em ambientes automotivos, são apresentadas a seguir:

- Determinação específica das características que devem ter as redes de sensores sem fio na área automotiva;
- Análise da instalação e configuração de uma rede de sensores no padrão de comunicação *ZigBee* para ambientes veiculares;
- Elaboração de uma análise detalhada do nível do sinal RSSI em um ambiente automotivo;
- Elaboração de uma análise detalhada da qualidade do sinal LQI em um ambiente automotivo;
- Análises do tempo de resposta dos pacotes enviados e recebidos, para determinar os fatores que permitam a queda do tempo de resposta dos pacotes e a diminuição ou aumento de pacotes perdidos;
- Análises de *throughput* de dados nas aplicações da rede de sensores em ambientes automotivos;
- Implementação de uma estrutura de *software* baseados no *LabView* 8.0 que permita a captura de dados em tempo real utilizando os módulos de sensores *TmoteSky*.

1.5. Organização do texto

A seguir apresenta-se a organização da dissertação:

- Capítulo 2: Este capítulo descreve os conceitos teóricos de RSSF e dos diferentes padrões de comunicação: IEEE802.11b, IEEE815.1, IEEE815.3 e IEEE815.4. Além disso, os conceitos de propagação e compatibilidade eletromagnética;
- Capítulo 3: Este capítulo descreve a metodologia dos testes realizados nos diferentes cenários, as definições das métricas e parâmetros da comunicação;
- Capítulo 4: Este capítulo apresenta os trabalhos relevantes relacionados com o presente trabalho;
- Capítulo 5: Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais e a discussão de eles;
- Capítulo 6: Este capítulo apresenta as conclusões, os trabalhos futuros e as considerações finais;
- Finalmente, temos os apêndices das publicações realizadas no período do mestrado, código fonte de alguns aplicativos e os programas em *Labview*.

Capítulo 2

2. Conceitos Básicos

2.1. Redes de sensores sem fios

Uma RSSF é um tipo de rede *ad hoc* com uma série de características e requisitos específicos. Seu principal objetivo é realizar tarefas de sensoriamento de forma distribuída; portanto, essas redes funcionam como poderosos sistemas de aquisição de dados. Os dados são coletados através dos sensores que estão acoplados aos nós, esses por sua vez são distribuídos e entregues aos pontos de saídas da rede, chamados de estação base. A Figura 2 mostra uma RSSF com uma estação base conectada a um computador.

Figura 2 Rede de Sensores sem Fios

Quanto à sua estrutura, uma RSSF pode ser representada em 3 camadas como é mostrada na Figura 3: infra-estrutura; pilha de protocolos; e aplicação. A infra-estrutura refere-se aos sensores físicos (suas características físicas e capacidades), ao número de sensores e à sua estratégia de instalação (como e onde eles são instalados). A pilha de protocolos refere-se ao software que implementa as diversas camadas de protocolos existentes em cada nó da rede. A camada de aplicação representa os interesses ou consultas do usuário, que são traduzidos em tarefas de sensoriamento a serem executadas pela rede.

Figura 3 Camadas de RSSF segundo sua estrutura.

Vários procedimentos de otimização envolvendo as três camadas que podem ser empregados na RSSF com o objetivo de aumentar seu desempenho. Por exemplo, características da aplicação podem influenciar a infra-estrutura da rede de sensores e os protocolos utilizados. Portanto, informações no nível da aplicação devem ser aproveitadas pela rede para que ela possa alcançar uma maior eficiência em termos de energia.

A classificação de uma RSSF depende de seu objetivo e área de aplicação. A aplicação influencia diretamente as funções exercidas pelos nós da rede, a arquitetura, processador, memória, dispositivos de sensores, fonte de energia,

transceiver, quantidade de nós na rede, tipo de protocolo de comunicação, tempo de vida da rede, tipo de sensor utilizado e topologia.

Praticamente, uma RSSF é um tipo de sistema dependente da aplicação. Qualquer projeto ou solução proposta para esta rede deve levar em consideração os requisitos da aplicação a ser desenvolvida, as características e restrições dos componentes dos nós, assim como as características do ambiente onde ficará a rede (RUIZ, et al. 2004).

Um dos padrões mais utilizados para as redes de sensores sem fio é o padrão IEEE 802.15.4 (IEEE 2006), operando na banda de 2.4 GHz. Existe também o UWB, que no momento não está padronizado em sua totalidade internacionalmente. A entidade responsável pelo desenvolvimento do padrão de fabricação, realização e divulgação é o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE).

2.2. Padrões de Comunicação

2.2.1. Padrão IEEE 802.11

O IEEE 802.11b, também conhecido como Wi-Fi, é especificado para operar em 2,4-GHz utilizando a banda ISM. Os canais de rádio frequência usam a modulação *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), permitindo altas taxas de transmissão de dados em distâncias de até 30 m (INTEL 2008) em ambientes fechados. O padrão permite taxas de transferência de até 11 Mbps, que são até cinco vezes maiores do que a especificação original do IEEE 802.11 e próxima ao padrão *Ethernet*.

O IEEE desenvolveu uma série de padrões para redes de transmissão sem fio. Esses padrões definem a camada física (PHY) e a camada de controle de acesso ao meio (MAC). Apesar de pertencer à família *Ethernet*, há na sua definição grandes diferenças na arquitetura e na camada MAC. Inicialmente foi desenvolvido para permitir taxas de transmissão de 1 até 2 Mbps nas bandas ISM. Mais tarde

surgiram novas versões do padrão, com diferentes taxas de transferência e bandas de frequência.

A camada física oferece três tipos de comunicação que são:

- *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS), que utiliza uma banda de frequência estreita que varia de acordo com um padrão pré-definido e conhecido tanto pelo transmissor quanto pelo receptor. Propriamente sincronizada, a rede parece que mantém um canal lógico. Para receptores não sintonizados com essas frequências variáveis, o sinal enviado e o sinal recebido parecem um ruído de curta duração.
- *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), que gera um bit redundante padrão para cada bit que está sendo transmitido. Este bit transmitido é chamado de *bit chip* (*chipping code*). Quanto maior o *chip code*, maior será a probabilidade de que o bit original seja camuflado; é claro que também maior será a banda passante utilizada.
- Infravermelho, que fornece operação de 1 Mbps, com 2 Mbps opcionais. A versão de 1 Mbps usa modulação 16-PPM (*Pulse Position Modulation* com 16 posições) e a versão de 2 Mbps usa modulação 4-PPM.

O protocolo MAC do IEEE 802.11 fornece dois tipos de serviços: assíncrono e síncrono (ou livre de contenção). O tipo assíncrono está sempre disponível enquanto que o síncrono é opcional. O assíncrono é fornecido por uma *Distributed Coordination Functions* (DCF) que implementa o método de acesso básico do protocolo MAC do IEEE 802.11, também conhecido como *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). O serviço síncrono é fornecido pela Função de Coordenação Pontual (PCF) que basicamente implementa o *polling* como método de acesso. O PCF utiliza um Coordenador Pontual, usualmente o Ponto de Acesso, que acessa as estações, ciclicamente, dando-lhes a oportunidade de transmitir. Diferentemente do DCF, a implementação do PCF não é obrigatória. Além disso, o PCF depende do serviço assíncrono fornecido pelo DCF.

Existem dois tipos de DCF: O DCF básico baseado em CSMA/CA e outro que, além do CSMA/CA, envolve a troca de quadros de controle *Request to Send* (RTS) e *Cleat to Send* (CTS) antes da transmissão de quadros de dados. De acordo

com o DCF básico, uma estação deve detectar o meio antes de iniciar uma transmissão. Se o meio estiver livre e permanecer neste estado por um tempo maior do que um espaço distribuído entre quadros *Distributed InterFrame Space* (DIFS) então a estação pode transmitir. Caso contrário, a transmissão é adiada e um processo de *backoff* é iniciado. A estação calcula um intervalo de tempo aleatório, o intervalo de *backoff*, uniformemente distribuído entre zero e um, chamado de Janela de Contenção.

Há dois modos de *scanning*: passivo e ativo. Para o cliente achar a rede, ele segue uma trilha deixada pelo *Access Point* (AP). Essa trilha é composta por *Service Set Identifiers* e *beacons*. Eles servem como ferramentas para que os clientes descubram os APs.

Service Set Identifier (SSID) – é um valor alfanumérico, podendo ter entre 2 e 32 caracteres, que define o nome da WLAN. É utilizado para segmentar rede e no processo de requisição de entrada para rede. O cliente precisa estar configurado com o SSID correto para se unir à rede.

Beacon – Os *beacons* são pacotes curtos que são enviados do AP para os clientes com a finalidade de sincronizar a comunicação sem fio em uma WLAN.

- *Passive Scanning* - É o processo de ficar ouvindo *beacons* por um determinado tempo após a inicialização da estação. O cliente fica ouvindo até achar um *beacon* que tenha o SSID da rede a qual ele deseja se conectar. No caso de múltiplos APs, todos irão anunciar em seus *beacons* o mesmo SSID. Nesse caso, o cliente se conectará ao AP que tenha o melhor sinal.

O processo de *scanning* é mantido mesmo após o cliente se associar a um AP. Isto ocorre para que o cliente mantenha sempre atualizada uma tabela com os sinais de cada AP em sua região, para caso seja necessário entrar em *roaming* já será conhecido o novo AP a que ele vai se conectar.

- *Active Scanning* - Consiste do envio de um pacote *probe request* a partir do cliente. Este pacote é enviado sempre que o cliente deseja se conectar a uma

rede. Neste pacote é inserido o SSID. Somente os APs que possuírem esse SSID responderão. Assim que o AP desejado for encontrado, é iniciado o processo de autenticação e associação.

2.2.2. Padrão IEEE 802.15.1

IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*) atualmente provê velocidades de rede de até 3 Mbps. Originariamente concebido para *Personal Area Network* (PAN) com baixo custo, baixo poder de consumo de energia e curta faixa de interconexões sem fio. A tecnologia *Bluetooth* é muito atraente para ambientes automotivos como uma tecnologia potencial em redes sem fio automotivas (NOLTE, HANSSON e BELLO 2006).

Em resposta ao interesse pela indústria automotiva, em dezembro de 1999 o *Bluetooth Special Interest Group* (SIG) forma a *Car Working Group* (CWG). O *Hand Free* foi o primeiro perfil criado para especificações pela CWG utilizando este dispositivo que pode estabelecer automaticamente a comunicação entre o veículo e o *hand free*, inicialmente para o sistema de áudio e telefone móvel. Hoje em dia, *Bluetooth* permite o uso de *hand free* em um telefone celular através de um sistema de áudio no veículo ou um fone sem fio (NOLTE, HANSSON e BELLO 2006).

Esta tecnologia, que opera na frequência não licenciada de 2.4 GHz ISM, utiliza a técnica *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS), onde temos 79 frequências² ativas, cada uma com uma largura de banda de 1 MHz. As 79 frequências são (CHEN, TONY e MARIO 2006):

$$f = 2402 + k; k = 0 \dots 78$$

Equação 2-1

sendo: k é o número de canal de 0 até 78.

² Em alguns países, por exemplo, na França somente existem 23 saltos de frequência avaliados.

2.2.3. Padrão IEEE 802.15.3

O UWB é outra tecnologia para *Wireless Personal Area Network* (WPAN) redes sem fio UWB. O padrão IEEE 802.15.3 especifica as características dessa tecnologia UWB para redes pessoais sem fio. O propósito do UWB é prover baixa complexidade, baixo custo, baixo consumo de potência (comparável ao 802.15.1) e altas taxas de transmissão de dados entre dispositivos sem fio, dentro de espaços de operações pessoais. A taxa de dados é alta o suficiente, acima de 10 Mbps, para satisfazer um conjunto de aplicações multimídia que necessitam de comunicações WPAN. Este padrão suporta requisitos de qualidade de serviço para tipos de dados multimídia (dados de imagens e vídeo).

O UWB provê quatro vantagens principais sobre o legado das tecnologias sem fio: qualidade de serviço, altas taxas de transmissão, baixo custo e baixo consumo de energia com tempo de vida de bateria mais longo para estações. O padrão UWB é composto pelos padrões IEEE 802.15.3 e IEEE 802.15.3a. O IEEE 802.15.3 define taxas de transmissão de 10 a 55 Mbps, para um alcance de 30 a 50 metros e usa uma faixa de frequência de 2.4 GHz ISM. Por sua vez, o padrão IEEE 802.15.3a define taxas de transmissão de 110 a 480 Mbps, para um alcance menor, de cerca de 10 metros, e uma faixa de frequência de 3.1 a 10.6 GHz ISM.

Teoricamente, por utilizar potência muito baixa, sistemas de comunicação UWB podem coexistir com outras tecnologias na mesma faixa de frequência de transmissão, tais como as existentes Wi-Fi (padrões IEEE 802.11x), GSM e *Bluetooth*. Assim, os sinais UWB transmitidos não interferem em outros serviços de rádio transmissão, nem interferem entre si, nem sofrem interferências pois para os diversos esquemas de modulação e de acesso é possível obter imunidade à interferência de acesso múltiplo e de banda estreita (LISIANE, et al. 2006).

Essa tecnologia foi inicialmente desenvolvida para aplicações militares. Em fevereiro de 2002 a agência reguladora norte-americana *Federal Communications Commission* (FCC) expediu uma regulamentação para o uso comercial da tecnologia UWB, estabelecendo os limites para a banda e potência de transmissão UWB. Porém, os esforços para sua padronização continuam.

Os sinais UWB devem ocupar pelo menos 500 MHz em uma largura de banda total de 7,5 GHz; o espectro para os sistemas UWB está compreendido entre 3,1 GHz e 10,6 GHz, resultando uma atraente solução tecnológica baseada na sobreposição espectral (*overlay systems*), uma vez que uma grande parte desta faixa do espectro é ocupada por serviços e tecnologias de comunicação pré-existent (LISIANE, et al. 2006).

O princípio da comunicação UWB é diferente de todas as outras técnicas de comunicação porque emprega pulsos de rádio frequência (RF) extremamente estreitos, cobrindo uma largura de banda muito ampla no espectro de frequência. O principal benefício de utilizar UWB é sua habilidade de operar em ambiente severamente caracterizado por multi-percurso. Em um ambiente real de comunicação sem fio existem sinais multi-percursos compostos por sinais refletidos por obstáculos, como paredes, piso, teto, móveis, pessoas etc. (LISIANE, et al. 2006).

De acordo com a definição da FCC, sinais de UWB devem ter larguras de banda maior do que 500 MHz ou largura de banda fracionária maior do que 20%. A largura de banda fracionária B_f é um fator usado para classificar sinais de banda estreita, banda larga, ou banda ultra larga, sendo dada pela razão entre a largura de banda e a frequência central do espectro do sinal (LISIANE, et al. 2006):

$$B_f = \frac{BW}{f_{\text{central}}} = 2 \frac{f_{hi} - f_{low}}{(f_{hi} + f_{low})}$$

Equação 2-2

sendo f_{hi} e f_{low} a maior e a menor frequências de corte (definidas pelos pontos de -10 dB em relação à frequência central) do espectro UWB, respectivamente. Assim, sinais podem ser classificados em função de suas larguras de banda fracionárias:

- Banda estreita: $B_f < 1\%$;
- Banda larga: $1\% < B_f < 20\%$;
- Banda ultra larga: $B_f > 20\%$

2.2.4. Padrão IEEE 802.15.4

O crescimento das necessidades onde os nós podem enviar dados sem a imposição de transmitir seus dados através de cabos e com energia consideravelmente baixa, levou à criação de *Low Rate Wireless Personal Area Network* (LR-WPAN). Como exemplo, temos monitoramento remoto de eventos naturais, como terremotos, fenômenos ambientais, controle de ambientes específicos, ambientes inteligentes, ambientes automotivos, entre outras aplicações.

O *ZigBee* para redes de sensores com um baixo consumo de energia possui um conjunto de comandos somente para as camadas superiores a partir da terceira camada do modelo *International Organization for Standardization* (ISO) como é apresentado na Figura 4. A tecnologia *ZigBee* é baseada no padrão IEEE 802.15.4 e garante teoricamente uma transição de dados igual a 250 kbps na camada de comunicação sem fio. Três bandas de transmissão são permitidas nesta tecnologia: a primeira é de 2.4 GHz, a segunda é de 868 MHz e a terceira é de 916 MHz, onde a primeira transmissão é permitida para todo o mundo sem restrições, a segunda e a terceira para Europa e os Estados Unidos, respectivamente (IEEE 2006).

Figura 4 Pilha do protocolo *ZigBee*.

Estas três bandas de frequências estão divididas em 27 canais de 2 MHz cada uma na frequência de 2.4 GHz, 10 canais nas frequências de 915 MHz e 1 canal na frequência 868 MHz (CHEN, TONY e MARIO 2006).

$$f = \begin{cases} 868.3 ; k = 0 \\ 906 + 2(k - 1) ; k = 1 \dots 10 \\ 2405 + 5(k - 1) ; k = 11 \dots 26 \end{cases}$$

Equação 2-3

sendo: k é o número de canais disponíveis.

Podemos identificar dois tipos de dispositivos em uma rede IEEE 802.15.4 (SANTOS 2007):

- *Full Function Device* (FFD) - pode funcionar em qualquer topologia do padrão, desempenhando a função de coordenador da rede ou roteador e conseqüentemente ter acesso a todos os outros dispositivos dentro de seu alcance de transmissão. São dispositivos mais completos.
- *Reduced Function Device* (RFD) - dispositivo mais simples, com menos memória, utilizado nas pontas da rede sem atribuições de reenvio de mensagem, ou seja, não pode atuar como um coordenador de rede ou roteador. Pode comunicar-se apenas com um FFD. Cada rede consiste de múltiplos FFDs e RFDs, com um dos FFDs designado como coordenador da rede.

De acordo com o padrão *ZigBee* existem três diferentes topologias de redes as quais são descritas abaixo. A Figura 5 ilustra as diferentes topologias *ZigBee*:

- A rede de tipo estrela; todos os nós são coordenados por um nó FDD o qual é denominado como PAN e que controla o acesso ao meio. Os outros dispositivos são os *Reduced Function Device* (RFD), que suportam uma funcionalidade reduzida e são controladas pelo PAN coordenador, que indica os períodos em que é possível transmitir através de um mecanismo de sinalização (FERRARI, et al. 2007).

- Na topologia cluster; existe um coordenador que atua como raiz, e qualquer um dos RFDs ou roteadores conectados a este para incrementar a dimensão da rede. Os RFDs podem estar somente como folhas de árvore, visto que os roteadores também podem atuar como folhas. Nesta topologia pode-se realizar uma estrutura que possa ser ampliada para a obtenção de uma melhor conservação de energia na rede de sensores (FERRARI, et al. 2007).
- Na topologia mista; qualquer nó de origem pode falar ou comunicar-se com qualquer destino. Os nós roteador e coordenador são conectados como qualquer outro nó dentro da faixa de transmissão e os rádios receptores dos coordenadores e dos roteadores devem estar ligados todo o tempo (FERRARI, et al. 2007).

Figura 5 Topologia ZigBee (FERRARI, et al. 2007)

Em geral, o principal objetivo de uma rede utilizando dispositivos com *ZigBee* é a transmissão de dados com um mínimo consumo de energia. Na transmissão de dados o *frame* (quadro) principal é dividido em dois principais períodos, referidos como ativo e inativo, respectivamente. Porém, no período anterior, todos os nós

estão no estado *sleep*, para preservar energia, no período seguinte, todos os nós podem transmitir pacotes de dados (FERRARI, et al. 2007).

Na Tabela 2 mostra-se um comparativo das principais características dos padrões IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.3, IEEE 802.15.4.

Tabela 2 Comparativo dos padrões IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.3, IEEE 802.15.4

	Bluetooth (IEEE 802.15.1)	UWB (IEEE 802.15.3)	ZigBee (IEEE 802.15.4)
Grupo	WPAN	WPAN	WPAN
Disponibilidade	Sim	Não	Sim
Espectro	2.4 GHz Banda	3.1-10.6 GHz	915 MHz, 868 MHz e 2.4 GHz
Canal	79 canais com 1 MHz Cada	5 Canais	16 canais nos 2.4GHz com 5 MHz; 10 canais nos 915MHz com 2 MHz; 1 canal nos 868 MHz
Condição de Link	NLOS (indoor)	NLOS (indoor)	NLOS (indoor)
Duplexing	TDD	TDD ALOHA	TDD
Acesso ao Meio	TDM com FHSS	DSSS CSMA/CA	DSSS com CSMA/CA
Modulação	Versão 1.0 - GFSK Versão 2.0 - M-ary DPSK	DQPSK, QPSK 16-QAM, 32-QAM; BPSK e 4BOK (802.15.3a)	OQPSK (2.4 GHz); BPSK (900 MHz)
Data-Rate	1.0 – 64 kbps (V) 723 kbps(D); 2.0 – 3 Mbps(D)	11-55 Mbps (802.15.3); 55-480 Mbps (802.15.3a)	20 Kbps nos 868 MHz; 40 Kbps nos 915 MHz; 250 Kbps nos 2.4 GHz
Cobertura	10 m (10 mW); 100 m (100 mw)	70+ metros; Até 10 metros (802.15.3a)	500 metros (50 metros típicos)
QoS	Voz (<i>connection oriented</i>); Dados (<i>connectionless</i>)		Aplicações de alta ou baixa latência
Mobilidade	Entre <i>Piconets</i>	Entre <i>Piconets</i>	
Handover	Não	Não	Não
Aplicações Típicas	Voz e Dados	Eletrônica de Consumo Multimídia; Cabos de Vídeo	Dispositivos de baixa potência e baixa velocidade. Sensores, Controladores, Monitoramento remoto
Especificações Adicionais	Máxima potência 100 mW EIRP; Até 7 dispositivos por <i>piconet</i>	Até 243 dispositivos por <i>piconet</i> ; 10 dispositivos no 802.15.3a	Baterias duram entre 100 a 1000 dias; 6555 redes e 1845*10 ¹⁶ dispositivos

Para a prevenção de colisões dos pacotes, duas diferentes técnicas podem ser consideradas. A primeira é a *Contention Access Period* (CAP) onde todos os nós podem transmitir de acordo com o protocolo CSMA/CA e MAC com a utilização de um algoritmo *back-off* descrito em: “*Computer Networks*” por Tanenbaum (TANENBAUM 2003), requerido pelo padrão IEEE 802.15.4. A segunda técnica é a *Contention Free Period* (CFP), onde somente os nós com reserva de tempo podem transmitir pacotes de dados, com isso evitando colisões (FERRARI, et al. 2007).

O gráfico a seguir mostra a relação dos canais baseados no padrão IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.3, IEEE 802.15.4 (CHEN, TONY e MARIO 2006).

Figura 6 Locação dos canais baseados no padrão IEEE 802.15
(CHEN, TONY e MARIO 2006)

2.3. Propagação de ondas de rádio

Uma RSSF que estabelece comunicação através de RF emprega rádios de muito baixa potência, visto que seus nós sensores são alimentados por pequenas baterias, tendo, portanto, pouca disponibilidade de energia. A maioria dos rádios dos nós sensores realiza *Frequency Shift Keying* (FSK) *Phase Shift- Keying* (PSK). A transmissão é feita com uma potência máxima de 10 mW (10 dBm), mas normalmente é prevista alguma forma de se reduzir esta potência (CHIPCON 2007)(CHIPCON 2.4 2007). O receptor normalmente consegue identificar sinais de muito baixa potência, até mesmo de -100 dBm 10^{-10} mW. A unidade dBm é uma referência em decibéis a uma potência de 1 mW. Portanto, a potência dada em dBm é calculada da seguinte forma (GIACOMIN e VASCONCELOS 2007):

$$P(dBm) = 10 \cdot \log \left[\frac{P(mW)}{1mW} \right]$$

Equação 2-4

sendo P a potência expressada em dBm.

Esta grande sensibilidade dos receptores é importante para os sinais de RF, que se dispersam e se atenuam no caminho de propagação, o que faz com que a potência recebida seja sempre muito menor do que a potência desprendida pelo transmissor. Os modelos matemáticos utilizados para descrever a propagação das ondas eletromagnéticas são derivados das equações de Maxwell. Inicialmente pode-se considerar um modelo simples, dado pela fórmula de transmissão de Friis³, a qual descreve a propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre (GIACOMIN e VASCONCELOS 2007):

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot G_T \cdot G_R = L_{FS} \cdot G_T \cdot G_R$$

Equação 2-5

sendo P_R e P_T as potências recebidas e transmitidas, G_T e G_R são os ganhos das antenas do transmissor e do receptor, λ é o comprimento de onda e d é a distância entre o transmissor e o receptor. L_{FS} é denominada "perda de transmissão no espaço livre".

Um transmissor que utiliza uma antena isotrópica transmite ondas de rádio igualmente em todas as direções do espaço. A distribuição espacial da irradiação de uma antena real, não isotrópica, não é uniforme, e é descrita por sua função de ganho direcional G . O ganho direcional é a relação entre a intensidade de sinal irradiado por uma antena e a intensidade de sinal que seria irradiado por uma antena isotrópica, em uma determinada direção. Pela aproximação de Friis conclui-se que um receptor colocado em espaço livre a uma distância d do transmissor,

³ A Fórmula de Friis (ou Lei de Friis) é usada em engenharia de telecomunicações e relaciona a potência transmitida de uma antena para outra em determinadas condições ideais.

como representado na Figura 7, perceberá uma potência de RF que é proporcional ao inverso do quadrado dessa distância. Isto pode ser escrito, em decibéis, como:

$$P_R - P_T = -20 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(d_0)$$

Equação 2-6

sendo as contribuições de G_T , G_R e $(\lambda/4\pi)$ reunidas no termo $20\log(d_0)$.

Figura 7 Tx distância d de R_x (GIACOMIN e VASCONCELOS 2007).

Um modelo mais realista deve considerar a presença de obstáculos no caminho entre o transmissor e o receptor, como as paredes dentro de um edifício ou árvores em áreas abertas. Nestes casos, o sinal de rádio sofrerá atenuação devido à absorção da energia eletromagnética por estes obstáculos. Alguns pesquisadores utilizam a fórmula de Friis para modelar a propagação de ondas eletromagnéticas mesmo em ambientes que não correspondem ao espaço livre, modificando o expoente n da variável d (distância). Nestes casos, n recebe, normalmente, valores entre 2 e 4 (LYMBEROPOULOS, LINDSEY e SAVVIDES 2006).

A presença de vegetação no caminho de propagação das ondas de rádio, nas frequências utilizadas pelas redes de sensores, causa uma grande perda de sinal devido à presença de água no interior das plantas. Esta atenuação é uma função

exponencial decrescente. Considerando-se a atenuação causada pelos obstáculos e a dispersão do sinal de comunicação, pode-se expressar a relação entre potência recebida e potência transmitida de acordo com:

$$\frac{P_R}{P_T} = e^{-\alpha} \cdot d^{-n}$$

Equação 2-7

sendo n o fator de dispersão e $-\alpha$ o fator de atenuação. A fim de se ter um modelo simples, o total das contribuições dos demais fatores presentes na Equação 2-7 foi considerado como unitário.

Os transceptores utilizados pelos nós sensores são fabricados em um único Circuito Integrado (CI), utilizando a tecnologia *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS). Isto é feito para se conseguir um dispositivo compacto e de muito baixa potência. A seguir é apresentada as características do transceptor CC2420 utilizado nos nó TmoteSky.

O transceptor CC2420 é construído em um único circuito integrado, utilizando a tecnologia CMOS de 0,18 μm . Este transceptor foi projetado para operar na faixa de 2,4 GHz, atendendo a norma IEEE 802.15.4, e as especificações do padrão *ZigBee*. A potência do transmissor pode ser programada para níveis entre -25 dBm e 0 dBm (1 mW). O receptor tem sensibilidade para sinais de até -94 dBm. É utilizada a modulação *Offset Quadrature Phase Shift Keying* (OQPSK) e a codificação em *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), a modulação OQPSK permite maior eficiência na transmissão, atingindo uma taxa de transferência de dados de 250 Kbps. O uso de DSSS dá mais robustez ao sinal de rádio. A faixa de tensão de alimentação do CC2420 é de 2,1 até 3,6 Volts e o consumo de corrente é de 17,4 mA.

Em relação a seu antecessor CC1000, o CC2420 provê maior precisão e eficiência, outras funções na etapa digital como a geração de código *Cyclic Redundancy Check* (CRC) de erro, sua codificação criptográfica de dados usando o

padrão AES-128, armazenamento em *buffers* de 128 *bytes* dos dados para transmissão e recepção.

A RSSI é disponibilizada em formato digital codificado em complemento de 2 de 8 bits. É especificado um desvio máximo de +/- 6 dB no valor de RSSI informado pelo medidor. A intensidade do sinal recebido é calculada diretamente de acordo com (CHIPCON 2.4 2007) é:

$$P_R = RSSI_{DIG} + RSSI_{OFFSET} [dBm]$$

Equação 2-8

sendo $RSSI_{DIG}$ é o valor digital indicado na fórmula de complemento de 2 e $RSSI_{OFFSET}$ tem um valor de -45 dBm. Como exemplo, pode-se calcular a potência do sinal recebido, quando for indicado um valor digital de 11101100 (binário), que corresponde a -20 em decimal, logo $P_R = -65$ dBm.

2.4. Mecanismos básicos de propagação

Reflexão, difração e dispersão são os três mecanismos básicos de propagação que impactam os sinais em sistemas de comunicação móvel.

2.4.1. Reflexão

Quando uma onda eletromagnética atinge outro meio de propagação com propriedades elétricas diferentes das propriedades do meio de origem, a onda é parcialmente refletida e parcialmente transmitida. Caso o meio destino seja um dielétrico perfeito, parte da energia é transmitida para o meio destino, enquanto que o restante é refletido de volta ao meio de origem, não havendo perda de energia por absorção. Se o segundo meio for um condutor perfeito, toda a onda incidente é refletida de volta ao meio de origem, sem perda de energia. A intensidade do campo elétrico das ondas refletidas e transmitidas pode ser relacionada com a onda original através do coeficiente de reflexão de Fresnel. Este coeficiente de reflexão é função

de propriedades eletromagnéticas intrínsecas dos meios de origem e destino, e geralmente depende da polarização e frequência da onda incidente e do ângulo de incidência. No modelo de propagação no espaço, é assumido que apenas a onda que trafega diretamente entre o transmissor e o receptor é responsável por toda a energia presente na antena receptora. A Figura 8 ilustra um sinal de reflexão.

Figura 8 Reflexão do sinal.

2.4.2. Difração

O fenômeno da difração é que permite as ondas eletromagnéticas contornarem obstáculos, propagando-se em regiões de sombra em relação ao transmissor como se ilustra na Figura 9. A difração de ondas eletromagnéticas pode ser explicada através do princípio de *Huygen*:

- Todo ponto de frente de onda pode ser visto como uma fonte de onda capaz de produzir ondas secundárias que se combinam para produzir uma nova frente de onda na direção de propagação.

Desta forma, o fenômeno da difração, causado pela propagação das ondas secundárias dentro da região de sombra, é que permite que receptores localizados nestas regiões de sombra recebam os sinais transmitidos. Porém, a potência das ondas criadas na área de sombra decresce rapidamente à medida que estas ondas se movimentam para dentro da região de sombra, causando uma queda na qualidade do sinal recebido.

No caso do receptor estar situado totalmente na região de sombra em relação ao transmissor, não haverá uma onda que se propague diretamente do transmissor para o receptor (desconsiderando os casos de redirecionamento de ondas através do uso de equipamentos passivos, tais como refletores). Desta forma, o campo elétrico que existirá na antena receptora será a soma vetorial do campo elétrico de todas as ondas que conseguirem transpor o obstáculo existente entre T-R, sejam através da reflexão, seja através da difração, o que poderá comprometer a qualidade do sinal recebido, devido à baixa potência resultante.

Figura 9 Difração do sinal.

2.4.3. Dispersão

Medições da potência efetiva recebida em antenas de sistemas de comunicação móveis mostraram que na maioria das vezes o sinal recebido é mais forte do que o previsto pelos modelos de propagação baseados exclusivamente nos mecanismos de reflexão e difração. A explicação para este fenômeno deve-se à difusão da onda transmitida em superfícies rugosas.

Nestas situações, a onda incidente na superfície rugosa é espalhada em todas as direções, o que leva ao redirecionamento de outras frentes de onda para o receptor. O fenômeno de dispersão depende da rugosidade da superfície na qual incide a onda eletromagnética, bem como do comprimento da onda incidente. A rugosidade de uma superfície é normalmente testada segundo o critério de *Rayleigh*,

que define a altura máxima crítica (h_c) das protuberâncias de uma superfície para um dado ângulo de incidência θ_i , como sendo:

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i}$$

Equação 2-9

Uma superfície é considerada suave se suas protuberâncias possuírem altura média h menor do que a altura crítica (h_c); caso contrário, é considerada rugosa. No caso de superfícies rugosas, o coeficiente de reflexão deve ser multiplicado pelo fator de perda por dispersão S , para compensar a perda por dispersão. Segundo Boithias (BOITHIAS 1987), o fator de perda por dispersão S é dado por:

$$\rho_s = \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] I_0 \left[8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right]$$

Equação 2-10

sendo I_0 a função de Bessel de primeiro tipo e ordem 0, h é o desvio padrão da altura das protuberâncias em relação à altura média das protuberâncias. É assumido que a altura das protuberâncias possui uma distribuição Gaussiana com um valor médio local. Com isso, o campo elétrico E refletido, para $h > h_c$, pode ser determinado utilizando-se o coeficiente de reflexão modificado:

$$\Gamma_{RUGOSO} = \rho_s \Gamma$$

Equação 2-11

sendo Γ o coeficiente de reflexão e ρ_s o fator de perda da dispersão.

2.5. Compatibilidade eletromagnética

As formas de propagação da energia elétrica e eletromagnética são a condução e a irradiação. Do ponto de vista de irradiação, todo condutor de um circuito funciona potencialmente como uma antena, podendo estar transmitindo ou recebendo sinais do meio.

Em um veículo, a fim de garantir o funcionamento adequado de cada componente e a operação dos sistemas como um todo, faz-se necessária a análise da interação entre esses componentes do ponto de vista elétrico e eletromagnético. Um componente não deve interagir com outro de forma que a operação de qualquer um deles seja prejudicada.

Essa interação pode ser abordada do ponto de vista de emissão ou de susceptibilidade à interferência. No primeiro caso, o foco se concentra no sinal que emana elétrica e eletromagneticamente do componente para o meio e no segundo, como o componente é afetado por sinais elétricos e eletromagnéticos que chegam até ele. Determinados equipamentos são naturalmente fontes ou receptores de sinais eletromagnéticos. Transmissores e receptores de áudio ou dados, por exemplo.

Existem dispositivos que operam normalmente, mesmo quando submetidos a elevados níveis de potência. Outros podem ter sua operação degradada ou podem não operar enquanto estão submetidos à irradiação. Outros ainda podem passar a operar de forma degradada, mesmo depois de cessada a interferência (CLEMENTE, DENNIS e GALVANI 2006).

O projeto dos equipamentos já deve prever o controle da emissão e da susceptibilidade elétrica e eletromagnética. Diversas técnicas já são conhecidas usando *layouts*, terras, blindagem, conectores apropriados e filtragem nos pinos dos dispositivos.

Cada fornecedor e fabricante da área automotiva têm seus requisitos de *Electromagnetic Compatibility* (EMC), assim como cada componente usualmente tem seus requisitos de EMC específicos, definidos por normas. O objetivo das normas é estabelecer padrões mínimos a serem atendidos dentro da indústria automobilística (CLEMENTE, DENNIS e GALVANI 2006).

Existem normas ISO aplicáveis para o ramo automotivo:

- *ISO 11451-1, Road vehicles - Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 1: General and definitions.*
- *ISO 11451-2, Road vehicles - Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 2: Off-vehicle radiation source.*
- *ISO 11541-3, Road vehicles - Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 3: On-board transmitter simulation.*
- *ISO 11451-5, Road vehicles - Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 5: Bulk current injection (BCI).*
- *ISO 11452, Road vehicles - Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy - Component test methods.*

O Brasil também tem comissões estudando a normatização e adequação dos requisitos automotivos ao mercado brasileiro (CLEMENTE, DENNIS e GALVANI 2006).

2.6. Veículos Inteligentes

A automação veicular, além de oferecer ao motorista maior segurança em condições críticas adversas, também pode auxiliá-lo na condução do veículo, onde uma ou mais tarefas podem ser automatizadas, tais como: seguir a pista, mantendo-se na faixa correta, manter uma distância segura entre veículos, regular automaticamente a velocidade do veículo conforme as condições de trânsito e características da rodovia, fazer ultrapassagens seguras e evitar obstáculos, achar o caminho mais curto e seguro para o destino bem como mover o veículo e estacioná-lo em ambiente urbano (JUNG, et al. 2005).

Visando aumentos na segurança, no conforto, e no rendimento dos veículos automotores, a indústria tem investido intensamente em sistemas eletrônicos embarcados. Com o intuito de auxiliar os condutores, diversas soluções eletrônicas

vêm sendo desenvolvidas e implementadas nos veículos nas últimas décadas, como freios ABS e sistema de estabilização ESP, que atuam automaticamente, quando o veículo encontra-se em condições extremas, procurando minimizar, dessa forma, a ocorrência de acidentes (JUNG, et al. 2005).

Com a introdução de soluções de informática nos veículos, o motorista pode contar em diversos países com sistemas de navegação, que o auxiliam na escolha da melhor rota entre a origem e o destino, e que podem, inclusive, adequá-la durante a viagem, conforme as condições de tráfego.

2.6.1. Conceitos

A tecnologia *drive-by-wire* representa uma nova era, na qual soluções mecânicas serão substituídas por soluções eletro-mecânicas (JUNG, et al. 2005). A possibilidade de se dirigir um veículo a partir de sinais eletrônicos permite o uso de computadores embarcados atuando como co-pilotos e ajudando o motorista em situações de emergência, ou na execução de tarefas, tais como estacionar um veículo.

Os sistemas mecatrônicos e de apoio ao motorista baseiam-se em informações internas e externas ao veículo que são coletadas através de sensores específicos. Através destas informações, pode-se identificar o estado em que o veículo se encontra e quais as condições do ambiente ao seu redor. Além disso, um sistema de comunicação complementa a integração da estrutura de controle como um todo, possibilitando a troca de informações entre o veículo e uma base de supervisão e comando remotos, bem como a comunicação entre veículos. Esta estrutura permite, por exemplo, a automatização de sistemas de transporte em ambientes controlados. Através do sistema de comunicação, os veículos podem ser informados a respeito das condições do trânsito, possibilitando, dessa forma, a otimização do tráfego.

A Interface Homem Máquina (IHM) entre o condutor e o veículo automatizado também merece estudos mais aprofundados. Através da tecnologia *drive-by-wire*, o carro pode ser guiado a partir de comandos eletrônicos, não havendo, portanto, a necessidade da interface convencional de volante e pedais. IHMs, empregando *joysticks* e manches, já foram testadas, mas não há, até o momento, estudos que indiquem qual a solução mais eficaz quanto à dirigibilidade, conforto, ergonomia e segurança (JUNG, et al. 2005).

2.6.2. Sistemas Mecatrônicos Embarcados

Sistemas mecatrônicos embarcados consistem nos conjuntos eletromecânicos disponíveis em um veículo, responsáveis por alguma função específica no funcionamento do veículo. Destaca-se o sistema de injeção de combustível, sistema de freio e de posicionamento angular da barra de direção. Cada um destes subsistemas é controlado por uma unidade eletrônica, que se comunica com as outras através de uma rede. No setor automotivo é comum o uso da rede CAN para tais aplicações (JUNG, et al. 2005).

Diversas soluções já se encontram disponíveis nos veículos atuais, principalmente nos automóveis de maior valor agregado. Destacam-se os seguintes sistemas mecatrônicos (JUNG, et al. 2005):

- ***Anti Blocking System (ABS)***: Impede o bloqueio das rodas durante uma freada, evitando que o veículo derrape como se ilustra na Figura 10. É disponível em veículos de todas as categorias. Em conjunto com o *Electronic Brake Force Distribution* (EBFD), garante, através de uma distribuição da força de frenagem em cada roda, uma melhor estabilidade do veículo em manobras rápidas com o pedal de freio ainda acionado.

Figura 10 *Anti Blocking System* (TOYOTA 2008)

- ***Braking-Assistant (BAS)***: Em casos de colisão iminente, alguns condutores pisam bruscamente no pedal do freio, mas mantêm este fortemente pressionado apenas durante um curto espaço de tempo, a Figura 11 ilustra o BAS. O sistema “percebe” a intenção do condutor e amplifica a intensidade do freio de forma a garantir uma desaceleração máxima.

Figura 11 *Braking-Assistant* (TOYOTA 2008)

- **Electronic Stability Program (ESP):** Sistema eletrônico que reconhece o escorregamento do veículo nas direções longitudinal e transversal, como, por exemplo, o deslizamento lateral em curvas, e atua de forma orientada e independente sobre o freio de cada uma das rodas, evitando que o veículo rodopie. A Figura 12 ilustra este caso.

Figura 12 *Electronic Stability Program* (TOYOTA 2008)

- **Torque Control System (TCS):** Sistema eletrônico de controle do torque realizado por cada uma das rodas de tração, que evita que a roda “patinhe”, garantindo, assim, a dinâmica do veículo em arrancadas e curvas como se ilustra na Figura 13.

Figura 13 *Torque Control System* (TOYOTA 2008)

- **Active Body Control (ABC):** Sistema que controla dinamicamente a carroceria do veículo, evitando que a mesma se incline para frente ou para os lados, aumentando assim o conforto dos passageiros, como se ilustra na Figura 14.

Figura 14 Active Body Control (MERCEDES 2008)

- **Continuous Damping Control (CDC):** Sistema de suspensão adaptativa, que possibilita uma regulação contínua da constante de amortecimento da suspensão. Possibilita ajustar, a partir de comandos eletrônicos, a suspensão do veículo para uma direção confortável ou esportiva, conforme a vontade do motorista como se ilustra na Figura 15.

Figura 15 *Continuous Damping Control* (MERCEDES 2008)

- **X-by-Wire:** Tecnologia que, aos poucos, vem substituindo os comandos mecânicos por sistemas eletrônicos, como o acelerador eletrônico (*Power-by-Wire*), já disponível em diversos veículos de série, bem como os sistemas *Brake-by-Wire*, *Shift-by-Wire* e *Steer-by-Wire*.

2.7. Protocolo de Comunicação Automotiva

Protocolos de comunicação são os meios de transmissão e recepção de dados utilizados para intercomunicar módulos eletrônicos e/ou sensores e atuadores inteligentes com micro controladores e *transceivers*, por exemplo. Existem vários tipos de protocolos de comunicação, cada qual com suas características técnicas específicas e, portanto, com as suas aplicações mais apropriadas, segundo (GUIMARÃES 2007).

2.7.1. Protocolos Automotivos

As tabelas a seguir relacionam os diversos tipos de protocolos existentes e algumas características principais. Essas tabelas estão divididas em grupos seguindo os critérios utilizados pela *Society of Automotive Engineers* (SAE) (GUIMARÃES 2007).

2.7.1.1. Classe A

Protocolos com taxa de transmissão de até 10 Kbps. Geralmente relacionadas às funções de conforto de um veículo. A Tabela 3 mostra as características da classe A.

Tabela 3 Alguns protocolos de comunicação classe A (GUIMARÃES 2007).

	SINEBUS	1raC	SAE J1780	CCD	ACP	BEAN	LIN
Instituição diretamente relacionada	Delco Electronics	Philips	SAE/TCM	Chrysler	Ford	Toyota	Motorola
Aplicação principal	Sistema de Áudio	Comunicação entre displays e rádios	Comunicação e diagnóstico	Comunicação e diagnóstico	Sistema de áudio	Comunicação e diagnóstico	Sensores e Atuadores inteligentes
Tipo de barramento	Fio único	Par trançado	Par trançado	Fio único	Par trançado	Fio único	Fio único
Codificação dos sinais	SAM	AM	NRZ (Non-Return to Zero)	NRZ (Non-Return to Zero)	NRZ (Non-Return to Zero)	NRZ (Non-Return to Zero)	NRZ (Non-Return to Zero)
Detecção de erro	Não disponível	Bit ACK	Check SUM de 8 bits	Check SUM de 8 bits	Check SUM de 8 bits	CRC de 8 bits	Check SUM de 8 bits
Quantidade de dados	10 – 18 bits	-	-	5 Bytes	6 – 12 Bytes	1 – 11 Bytes	8 Bytes
Taxa de transmissão	66.6 Kbps-200 Kbps	1 Kbps – 100 Kbps	9.600 bps	7.812,5 bps	9.600 bps	10 Kbps	20 Kbps
Comprimento Máximo de barramento	10 metros	Não especificado	40 metros	-	40 metros	-	40 metros
Quantidade máxima de nós na rede	-	-	20	10	20	20	16

2.7.1.2. Classe B

Protocolos com taxa de transmissão de 10 Kbps a 125 Kbps. Geralmente relacionados ao controle dos sistemas de entretenimento de um veículo. A Tabela 4 mostra as características da classe B.

Tabela 4 Alguns protocolos de comunicação classe B (GUIMARÃES 2007).

	<i>CAN 2.0 ISO 11898 ISO 11519-2</i>	<i>CAN 2.0 SAE J1939</i>	<i>J1859 Class 2</i>	<i>J1850 SCP</i>	<i>J1850 PCI</i>
Instituição diretamente relacionada	SAE ISSO	SAE	GM	Ford	Chrysler
Aplicação principal	Controle e diagnóstico	Controle e diagnóstico	Controle e diagnóstico	Controle e diagnóstico	Controle e diagnóstico
Tipo de barramento	Par trançado	Par trançado	Fio único	Par trançado	Fio único
Codificação dos sinais	NRZ (Non-Return to Zero)	NRZ (Non-Return to Zero)	VPW	PWM	VPW
Detecção de erro	CRC	CRC	CRC	CRC	CRC
Quantidade de dados	0 – 8 Bytes	8 Bytes	0 – 8 Bytes	0 – 8 Bytes	0 – 10 Bytes
Taxa de transmissão	10 Kbps-1 Mbps	250 Kbps	10.4 K bps	41 Kbps	10.4 K bps
Comprimento Maximo de barramento	40 metros	40 metros	35 metros	35 metros	35 metros
Quantidade máxima de nós na rede	32	32	32	32	32

2.7.1.3. Classe C

Protocolos com taxa de transmissão de 125 Kbps a 1 Mbps. Geralmente relacionados ao controle dos sistemas de segurança de um veículo. A Tabela 5 mostra as características da classe C.

Tabela 5 Alguns protocolos de comunicação classe C (GUIMARÃES 2007).

	CAN 2.0 ISO 11898 ISO 11519-2	CAN 2.0 SAE J139
Instituição diretamente relacionada	SAE & ISSO	SAE
Aplicação principal	Controle e diagnóstico	Controle e diagnóstico
Tipo de barramento	Par trançado	Par trançado
Codificação dos sinais	NRZ (Non-Return to Zero)	NRZ (Non-Return to Zero)
Deteção de erro	CRC	CRC
Quantidade de dados	0 – 8 Bytes	8 Bytes
Taxa de transmissão	10 Kbps- 1 Mbps	250 Kbps
Comprimento Máximo de barramento	40 metros	40 metros
Quantidade máxima de nós na rede	32	32

2.8. Protocolo CAN

Em 1983, Robert Bosch inicia na Alemanha o desenvolvimento de um projeto de rede para um veículo com um servidor para interconectar componentes eletrônicos no carro. No ano de 1986, introduz o conceito de um BUS baseado no *Controller Area Networks* CAN para a sociedade de engenharia automotiva. O protocolo CAN é baseado no princípio da técnica da transmissão *broadcast*. (SHRINATH e EMADI 2004).

O CAN tornou-se um padrão internacional na especificação *Data Link Layer* ISO 11898 em 1994, e foi especialmente desenvolvido para rápida troca de dados entre controladores eletrônicos em veículos motorizados. O CAN também pode ser usado na implementação de redes de dispositivos industriais micro-processados, por exemplo, como um barramento interno de máquinas, ferramentas, como interconexão de sistemas de medição distribuídos, funções de controle e monitoração no nível inferior ao superior ou como um barramento de campo para interligar sensores, atuadores e interfaces homem-máquina.

O CAN é baseado em uma arquitetura multi-mestre, como é mostrada na Figura 16. Todos os controladores têm direitos iguais e funcionalidade de mestre. A grande vantagem disto é que cada controlador tem livre acesso ao meio de transmissão, sendo capaz de enviar uma mensagem sempre que necessário ou em resposta a um evento. Obviamente, colisões podem ocorrer e devem ser contornadas. O controle de acesso ao meio por CSMA/BA *Bit Wise Arbitration* é semelhante ao CSMA/CD utilizado na Ethernet, com a diferença que, em uma eventual colisão, temos prioridades de tempo definidas, enquanto que no CSMA/CD teríamos uma espera aleatória entre os participantes da disputa pelo meio.

Figura 16 CAN BUS

A arquitetura multi-mestre tem um efeito positivo na disponibilidade da rede. A falha de um controlador não leva a um colapso do barramento. Os controladores não possuem endereço. As suas mensagens possuem identificadores usados tanto para definir prioridades em uma disputa pelo meio, como para os demais nós decidirem se devem ou não processar a mensagem em trânsito. Os identificadores com menor valor binário têm a mais alta prioridade no acesso ao meio. (INTERFACEBUS 2008).

Cada mensagem CAN pode transmitir de 0 a 8 *bytes* de informação do usuário. Obviamente, transmissão de dados de maior tamanho pode ser efetuada usando segmentação. A taxa máxima de transmissão de dados é 1 Mbps. Este valor

aplica-se a redes com até 40 metros. Para distâncias superiores, a taxa de transmissão deve ser reduzida. Até 500 m, a taxa de 125 Kbps é possível, e para redes de até 1km, a taxa de 50 Kbps é permitida.

O circuito da interface elétrica do CAN bus é ilustrado na Figura 17, onde o CAN bus é balanceado mediante 2 fios de interface executando-se um sobre outro, estes fios podem ser *Shielded Twisted Pair* (STP), *Un-shielded Twisted Pair* (UTP) ou cabo *Ribbon*. Cada fêmea utiliza um conector D de 9 pinos, o bit de codificação utilizado é o *Non Return to Zero* (NRZ) (INTERFACEBUS 2008).

Figura 17 Circuito elétrico da interface CAN BUS (INTERFACEBUS 2008)

O CAN disponibiliza dois serviços: o envio de uma mensagem (*data frame transmission*) e uma solicitação de mensagem (*remote transmissions request*). Todos os outros serviços como sinalização de erro, retransmissão automática de mensagens mal formadas, são transparentes ao usuário, devido à execução automática pelo *chip* CAN.

O protocolo CAN é implementado em *hardware* disponível por mais de 40 fabricantes de *chips*. Fator este que possibilitou uma redução de custo por escala e levou ao avanço em áreas como automação de equipamentos médicos, automação predial, navios, aviões, etc. A quantidade de nós não é explicitamente limitada, mas um número máximo de 64 nós é recomendado.

2.9. CAN RF

Em algumas aplicações é necessário que nós do CAN bus tenha dispositivos de RF para se comunicar. Tipicamente, este caso se aplica para nós em movimento e que precisam se comunicar. Praticamente, é uma conexão ponto a ponto, seria uma sub rede CAN (SOFTING 2008). A Figura 18 ilustra mais detalhadamente o CAN RF.

Figura 18 Transmissão do CAN BUS RF (SOFTING 2008)

2.10. Sistema de Alimentação 42 Volts

Os primeiros sistemas elétricos automotivos trabalhavam com alimentação de 6V/7V. Com a introdução dos sistemas de injeção eletrônica na década de 1950, o sistema foi alterado para o atualmente conhecido 12V/14V. Hoje, cerca de 60 anos após a introdução dos primeiros sistemas de injeção eletrônica, percebe-se claramente que necessitamos de uma nova mudança no sistema elétrico (GUIMARÃES 2007).

A demanda por potência elétrica nos veículos tem crescido exponencialmente. As causas principais são:

- O aumento do desempenho dos veículos;

- A contínua adição de funções que melhoram o conforto e a segurança dos passageiros;
- A substituição de sistemas mecânicos e hidráulicos por sistemas elétricos.

Estudos indicam que o valor limite teórico de corrente fornecido por um sistema elétrico automotivo aproxima-se de 200 ampères. Essa limitação se dá em função da bitola da fiação, que precisaria ser muito grande para atender aos requisitos elétricos de condução. Vale mencionar que no sistema de energia atual, 12V/14V, 200 ampères representariam 3.000 W de potência consumida (GUIMARÃES 2007).

Para solucionar este problema, mantendo o mesmo nível de potência entregue aos sistemas e reduzindo a corrente elétrica a níveis razoáveis (cerca de três vezes menor que o atual), o sistema de 36V/42V apresenta-se como uma excelente alternativa (GUIMARÃES 2007).

Esta solução técnica foi desenvolvida por um grupo de pesquisa iniciado pela Mercedes Benz em meados de 1994. Várias empresas integravam o grupo de pesquisa, além de um renomado corpo acadêmico. O grupo estudou alternativas, avaliando seus impactos na segurança, confiabilidade, infra-estrutura e custos dos veículos. Os resultados nós já sabemos qual foi: definiram como ideal o sistema 36V/42V (GUIMARÃES 2007).

Atualmente, os resultados dos estudos conduzidos por esse grupo já são reconhecidos por mais de 40 empresas automotivas, montadoras e fornecedores ao redor do mundo.

2.11. Power Line Communication

O *Power Line Communication* (PLC) realmente não é uma idéia nova, embora esteja sendo somente utilizada para aplicações domesticas e para transmissão de dados entre subestações e edifícios (DEGARDIN, et al. 2003).

Os sistemas PLC podem ser implementados conforme a diferentes modos, utilização de largura de bandas, protocolos ou técnicas de proteção digital de dados (ARABIA, et al. 2006). Recentemente técnicas de PLC têm sido também utilizadas para aplicações em veículos, onde a proliferação de dispositivos eletrônicos a ocasionando um dramático incremento de cabos do sinal conectados a sensores e atuadores para seu controle (ARABIA, et al. 2006).

Figura 19 Power Line Communication (YAMAR 2008)

2.12. UWB em Veículos Automotivos

A redução de custos é sempre crítica na indústria de automóvel, alcançar uma redução considerável dos custos é possível através do emprego do UWB afirma Li em (LI e TALTY 2006). Para uma rede de sensores em um veículo automotivo UWB é a melhor entre todas as possíveis tecnologias (LI e TALTY 2006).

A tecnologia de comunicação UWB vem recebendo muita atenção e esforços de pesquisa devido às suas características atrativas, associado ao recente e explosivo avanço tecnológico. Essa tecnologia, que pode ser implementada tanto em banda-base quanto com a utilização de uma portadora de rádio frequência possibilita conjugar a transmissão de dados digitais de altíssimas taxas com baixa potência envolvida e robustez em ambientes com multi-percursos. Devido a estas características, a tecnologia UWB mostra grande potencial quando comparada a outras alternativas de acesso sem fio de quarta geração (4G) para ambientes fechados indoor (LISIANE, et al. 2006).

Para receptores que não são da mesma tecnologia, os sinais UWB comportam-se como ruído de fundo de baixa PSD, por causa da sua baixa potência de transmissão da ordem de 50 uW (1/10.000 da potência normal de um telefone celular), e portanto permitem que sistemas UWB coexistam com as outras tecnologias (ou serviços) em um espectro compartilhado (LISIANE, et al. 2006).

Os pulsos estreitos utilizados no UWB permitem que o mesmo tenha robustez em relação à interferência de multi-percursos. Até mesmo em ambientes fechados, os atrasos mínimos de multi-percursos são apenas algumas dezenas de nano segundos, ainda assim muito maiores que a largura de pulso do UWB. Portanto, os sinais refletidos nunca interferem com o sinal principal e são inteiramente separáveis no dispositivo receptor de UWB (LISIANE, et al. 2006).

2.13. Transdutor Inteligente IEEE 1451

As instituições *National Institute of Standards and Technology* (NIST) e IEEE reuniram-se para discutir tecnologias de transdutores inteligentes e sentiram a necessidade de criar uma interface comum de comunicação para transdutores inteligentes, este padrão foi criado em setembro do 1993. A partir dessa reunião foram formados comitês responsáveis por produzir especificações das interfaces como IEEE 1451, IEEE 1451.1, IEEE 1451.2, IEEE 1451.3, IEEE 1451.4, IEEE 1451.5 e IEEE 1451.6. O padrão IEEE 1451 define um conjunto de interfaces padronizadas de *hardware* e *software* para conectar um transdutor a qualquer tipo de rede de comunicação de forma automática, buscando atingir interoperabilidade em nível de transdutor (MENESES 2007).

A Figura 20 apresenta a estrutura completa do padrão IEEE 1451.0, proporcionada por Perrussel no ano 2005.

Figura 20 Estrutura do IEEE 1451.0 (PERRUSSEL 2005).

O processador *Network Capable Application Processor* (NCAP) pertencente ao padrão IEEE 1451.1, é o responsável pela troca de informações ocorrida entre o transdutor e o ambiente externo. Os padrões IEEE 1451.2, IEEE 1451.3, IEEE 1451.4, IEEE 1451.5 e IEEE 1451.6 (descritos mais na frente), têm por objetivo especificar o projeto do transdutor inteligente e uma interface para o NCAP. A configuração do padrão IEEE 1451 pode ser visualizada na Figura 21 (NIST-IEEE 2008) (IEEE 2008).

Figura 21 Configuração do padrão IEEE 1451.1 (MENESES 2007).

O padrão IEEE 1451.1 (IEEE 2008) (NIST-IEEE 2008) define um modelo orientado a objetos implementado em um processador de aplicações com capacidade de operar em rede NCAP para representar qualquer transdutor inteligente ligado em rede. O NCAP possui pelo menos duas interfaces de comunicação: uma com a rede e outra com o transdutor (MENESES 2007).

O padrão IEEE 1451.2 (IEEE 2008) (NIST-IEEE 2008) especifica um *Transducer Independent Interface* (TII) e um *Smart Transducer Interface Module* (STIM). O STIM vincula-se com o processador de rede através da interface independente de transdutor constituindo um nó de rede. Através dessa interface é introduzido o modo de operação *plug and play* do transdutor, independente do processador de rede. O módulo de interface do transdutor inteligente é responsável pela aquisição, condicionamento e digitalização de sinal, onde são ligados todos os sensores e atuadores do sistema (analógico ou digital) responsáveis pela troca de sinais com o exterior (MENESES 2007).

O padrão IEEE 1451.3 (IEEE 2008) (NIST-IEEE 2008) define uma interface digital para sistemas de transdutores distribuídos multi-pontos. Este padrão define estruturas *Transducer Electronic Data Sheet* (TEDS), a interface elétrica, protocolos de identificação de canais e sincronização de tempo e funções lógicas de escrita e leitura usadas para acessar o TEDS e dados do transdutor. A interface proposta une no mesmo barramento o processador de rede e vários módulos e transdutores inteligentes, nesse caso, nomeado como *Transducer Bus Interface Module* (TBIM). O barramento é usado para alimentar os transdutores e assegurar a comunicação entre estes e o processador de rede (MENESES 2007).

O padrão IEEE 1451.4 (IEEE 2008) (NIST-IEEE 2008) define o protocolo e interface que permita uma comunicação de transdutores analógicos (a maioria no mercado) com um objeto IEEE 1451. É definido também o formato das estruturas TEDS, que são baseadas no padrão IEEE 1451.2. O padrão IEEE 1451.4 tem o propósito de prover interoperabilidade, permitindo aos transdutores mecanismos de *plug and play* (MENESES 2007).

O padrão IEEE 1451.5 (IEEE1451.5 2008) define os TEDS baseados no IEEE 1451 e os protocolos de acesso aos TEDS e transdutores de dados. Este poderia aceitar uma interface sem fio e protocolos para facilitar o uso das soluções sem fio existentes. Este padrão não especifica o desenho dos transdutores, condição do sinal, o desenho físico do sistema sem fio, ou uso dos TEDS (IEEE1451.5 2008).

O Padrão IEEE 1451.6 (IEEE 1451.6 2008) define controladores padrões para a segurança de um ambiente de rede em cascada com múltiplos controladores em cada nível. A camada de aplicação pode ser implementada livremente e com direitos de autoria (IEEE 1451.6 2008).

Capítulo 3

3. Metodologia

Neste capítulo detalhamos os passos a seguir para fazer os testes e obter os gráficos dos resultados das medições. Em primeiro lugar procedemos à configuração dos experimentos baseados no trabalho de Tsai (TSAI, et al. 2007). Apresentamos o nó sensor TmoteSky a ser utilizado nos experimentos. A configuração do sistema operacional para RSSF e os aplicativos instalados nos sensores e a topologia a ser utilizada. Neste capítulo também mostramos a localização física dos nós sensores no veículo.

Em segundo lugar a definição das métricas (RSSI, LQI, pacotes perdidos, *throughput*) a ser avaliadas durante os experimentos. A seguir em este capítulo detalhamos as características e a utilização de um analisador de espectro e sua configuração. Finalmente, se detalham os aplicativos para a aquisição dos dados em TinyOs, Java e LabView para a visualização dos dados.

3.1. Configurações dos experimentos

Nesta secção apresentamos as diferentes características dos cenários, métricas, plataforma de hardware, software, localização dos nós sensores, experimentos e testes, sendo que a maioria destas configurações é baseada no artigo apresentado pela Universidade Carnegie Mellon e o Laboratório de pesquisa da *General Motors* descrita em (TSAI, et al. 2007).

3.1.1. Nó Sensor TmoteSky

O TmoteSky foi projetado e desenvolvido pela Universidade de Berkeley e é distribuído pela *Moteiv Corporations*, que foi fundada pelos estudantes e doutores pesquisadores da Universidade de Califórnia em Berkeley em novembro do 2003 (MOTEIV 2007). Estes dispositivos foram projetados com dois objetivos principais:

alto grau de tolerância a falhas e fácil desenvolvimento. Utiliza um sistema de rádio conhecido como IEEE 802.15.4 ou popularmente como *ZigBee*, que trabalha na faixa de frequência de 2.4 GHz ISM e oferece taxas de transmissão na ordem de 250 Kbps, com um alcance rádio de 125 metros aproximadamente. Além disso, inclui um *Analog to Digital Converter* (ADC) de 12 bits e *Digital to Analog Converter* (DAC), timer, I2C, SPI, um protocolo *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART) e um controlador de *Direct Memory Access* (DMA), como se mostra na Figura 22 e a Figura 23.

Figura 22 Vista frontal do TmoteSky (MOTEIV 2007)

Figura 23 Vista da face inferior do TmoteSky (MOTEIV 2007)

Os dispositivos utilizam o *chip* CC2420 desenvolvido pela Chipcon. Este sistema de rádio trabalha com a modulação *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) por meio de DSSS. Outra evolução desta plataforma foi a utilização da interface *Universal Serial Bus* (USB), que facilita a programação dos dispositivos e a troca de informações com o ponto de acesso.

Na Tabela 6 são apresentadas as características dos nós de sensores como: tipo de processador, memória, rádio, Sistema Operacional das diferentes plataformas de *hardware* existentes para RSSF. Como se observa na tabela existe na atualidade uma grande quantidade de plataformas para as redes de sensores. Por exemplo, micaZ, Telos, e iMote2, todos eles compartilham o mesmo sistema de rádio CC2420, enquanto Telos, WISAN, eyesIFX, ScartterWeb, usam o microcontrolador MSP430. A família Mica utiliza o microcontrolador Atmega128L.

Tabela 6 Plataformas típicas e componentes de *Hardware* das RSSF

Plataforma	Micro controlador	Frequência	Rádio
eyesIFX	TI MSP430	2.4 Ghz	TDA5250
ScatterWeb	TI MSP430	868 MHz	CC1020
telosB	TI MSP430	2.4 Ghz	CC2420
WISAN	TI MSP430	2.4 Ghz	CC2420
iMote2	ARM Core PXA27X	2.4 Ghz	CC2420
micaZ	Atmega128	2.4 Ghz	CC2420
mica2	Atmega128	433, 868, 900 Mhz	CC1000
mica2dot	Atmega128	433, 868, 900 Mhz	CC1000
BTnode	Atmega128	433, 868, 900 Mhz	ZV4002, CC1000
evb13192	HCS08	2.4 Ghz	MC13192
criquet	Atmega128	433 Mhz	CC1000
TmoteSky	TI MSP430	2.4 Ghz	CC2420
nymph	Atmega128	433, 868, 900 Mhz	CC1000
XYZ mote	ARM7TDMI	1.8MHz	CC2420
TinyNode	MSP430	868 MHz ISM	XE1205
mote2	Intel PXA271	2.4 Ghz	CC2420
Schockfish	TI MSP430	868 MHz	Xemics XE 1205

3.1.2. Sistema Operacional TinyOS 1.x

TinyOS 1.x, é um dos primeiros Sistemas Operacionais específicos para as redes sensores, e foi desenvolvido pela Universidade de Berkeley com a colaboração da Intel no início desta década. Em pouco tempo passou a ser o sistema mais popular para RSSF, sendo um *software open source* disponível em <http://www.tinyos.net>.

Muitas características do TinyOS 1.x se devem ao fato de ter sido desenvolvido em NesC (LEVIS, et al. 2003), derivado do C ANSI⁴. NesC é uma extensão da linguagem C padrão, adaptada para as necessidades especiais das RSSF. Uma das características principais deste modelo de programação é o uso de componentes. Neste modelo, a funcionalidade da tradicional camada de abstração é quebrada em pequenos blocos que interagem com outros blocos via interface.

Dentre os motivos pelos quais o TinyOS 1.x foi desenvolvido, o principal é a utilização de recursos limitados. Os nós de sensores têm recursos físicos limitados devido ao pequeno tamanho, baixo custo e baixo consumo de energia. Na atualidade os nós contêm um processamento de 1 *Millions of Instructions Per Second* (MIPS) e 10 Kbytes para armazenamento. Em segundo lugar vem a concorrência; em uma aplicação típica de RSSF, um nó é responsável pela amostragem de seu ambiente através dos sensores. Esses sensores são manipulados através dos atuadores, executando processamento de dados, distribuindo dados para outros nós e participando em processos distribuídos, tais como agregação estática. Muitos destes eventos, como por exemplo, a gerência de rádio, requer respostas em tempo real. Isto requer uma aproximação ao gerenciamento de um modelo de concorrência que reduz erros potenciais.

3.1.2.1. TinyOs 2.0

O Tinyos encontra-se na versão 2.0, que implementa a capacidade de mudanças na política de escalonamento do Sistema Operacional. Desta forma, programadores podem adotar suas próprias políticas de acordo a aplicação desenvolvida. Basicamente a concorrência é obtida a partir de um escalonamento

⁴ ANSI, Linguagem de programação criada na década de setenta por Dennis Ritchie e Ken Thompson

em dois níveis, tarefas e eventos. O nível com prioridade mais baixa é representado pelas tarefas enquanto que o mais alto pelos eventos.

3.1.3. Localização dos nós sensores

Os sensores serão localizados em forma independente, cada uns deles com relação à estação base, logo formando uma rede de sensores todos juntos com um total de 9 nós mais a estação base.

O veículo utilizado para estes experimentos foi um Honda Fit 1.5, ano 2006, como ilustrado na Figura 24. A Tabela 7 seguinte descreve a localização detalhada dos nós no veículo. A Figura 24 ilustra em forma gráfica a localização dos nós sensores dentro ambiente veicular durante os experimentos.

Figura 24 Veículo para os testes e experimentos realizados

Durante todos os experimentos realizados considerou-se uma topologia estrela; além disso, todos os nós conseguiram comunicar-se à estação base em canais diferentes.

Tabela 7 Localização dos nós sensores no veículo.

<i>Número de Nó</i>	<i>Localização e Descrição</i>
Estação Base	É o ponto aonde chegam todos os dados da rede, está localizado no painel superior perto do pára-brisa, do lado do co-piloto. Este ponto é fixo durante todos os testes realizados.
Nó1	A área onde se encontra o motor foi dividida em 3 áreas. No lado esquerdo e na frente do motor.
Nó2	No centro e na frente do motor.
Nó3	No lado direito e na frente do motor.
Nó4	Dentro da cabine na porta esquerda.
Nó5	No meio da cabine entre o motorista e o co-piloto.
Nó6	Dentro da cabine na porta direita.
Nó7	Os 3 últimos nós foram localizados na parte traseira do veículo. O Nó 7 está no lado esquerdo do porta malas. .
Nó8	No centro do porta malas.
Nó9	No lado direito da porta malas.

A Figura 25 mostra em forma gráfica a localização dos nós sensores no veículo. Todos os testes realizados no veículo adotaram esta configuração para a aquisição dos dados.

Figura 25 Veículo para os testes e experimentos realizado

3.1.4. Parâmetros da comunicação

A seguir descrevemos os diferentes parâmetros de comunicação tomados em conta durante a realização dos experimentos.

3.1.4.1. *Energia de transmissão*

Todos os nós de sensores TmoteSky podem ser configurados com diferentes níveis de potência de saída, e a Tabela 8 ilustra os níveis suportados pelo *chip* CC2420. Para nossos experimentos configuramos os nós sensores em 3 diferentes níveis: 0 dBm, -10 dBm e -25 dBm para os cenários dos testes. A energia de transmissão do nó estação base foi configurada a 0 dBm para todos os experimentos realizados.

Tabela 8 Configuração da potência do sinal do CC2420 (MOTEIV 2007)

Nível	Potência de Saída [dBm]	Energia Consumida [mA]
31	0	17.4
27	-1	16.5
23	-3	15.2
19	-5	13.9
15	-7	12.5
11	-10	11.2
7	-15	9.9
3	-25	8.5

3.1.4.2. *Envio de pacotes*

Os nós de sensores, mediante os módulos de programação em NesC, permitem a configuração dos diferentes tempos possíveis de envio de pacotes, entre outros parâmetros. Para nossos experimentos, mudamos este parâmetro para 250 ms com o objetivo de ter uma maior taxa transmissão de dados.

3.1.4.3. Seleção de canal de rádio

Os dispositivos TmoteSky podem transmitir dentro de uma largura de banda de 2.4 GHz ISM. Para os testes, o nó estação base foi configurado no primeiro canal disponível dos 16 livres. Os demais nós foram configurados em forma aleatória para a transmissão e recepção dos dados.

3.1.4.4. Formato do pacote

Dependendo da aplicação utilizada, para cada experimento o tamanho do *raw data* varia de longitude. Como longitude padrão são 36 *bytes*. Esta longitude pode ser reduzida. Para os experimentos utilizamos a aplicação *pong*⁵ que tem um comprimento de *raw data* de 27 *bytes*.

3.2. Definição das métricas

3.2.1. RSSI

Atualmente, os modernos receptores de rádio são capazes de receber e amplificar sinais muito fracos de um emissor distante. A sensibilidade do receptor é definida como o mais fraco sinal que o receptor consegue receber. O RSSI elimina a necessidade da existência de *hardware* adicional nos pequenos dispositivos sem fios, melhorando o desempenho aos níveis energético e de custo.

A variável RSSI é uma medida de força do sinal de rádio recebido, referindo-se apenas à energia do sinal e não à qualidade deste. É uma métrica genérica presente nos receptores de rádio comuns, normalmente invisível ao utilizador do receptor de rádio, mas bastante relevante para utilizadores de tecnologias de redes sem fios.

⁵ *Pong*, é um programa feito em NesC para TinyOs 1.x e localizado no repositório tinysos.cvs.sourceforge.net do TinyOs.

Se um emissor distante é deslocado para mais próximo do receptor, a força do sinal transmitido na antena receptora aumenta. A medição da força do sinal de recepção é um dos métodos de determinação da qualidade da ligação.

Apesar dos sistemas de localização pela força de sinal, usando o protocolo IEEE 802.15.4, despertar grande interesse, existe, contudo, uma falta de caracterização dos fatores fundamentais que contribuem para a variação da força do sinal.

A medida de RSSI, disponibilizada pelo sistema operacional TinyOS 2.0⁶, é um valor de 8 bits que varia entre 0 e 255. O valor 1 indica a força mínima do sinal detectável pelo receptor, enquanto o valor 0 indica a inexistência de sinal.

É especificado um desvio máximo de +/- 6 dB no valor de RSSI informado pelo medidor.

$$P_R = RSSI_{DIG} + RSSI_{OFFSET} [dBm]$$

Equação 3-1

Sendo, $RSSI_{DIG}$ o sinal emitido pelo nó sensor, $RSSI_{OFFSET}$ é encontrado empiricamente $RSSI_{OFFSET}$ tem um valor de -45 dBm.

3.2.2. LQI

O indicador de qualidade é calculado pelo Chipcon CC2420 de rádio. Para determinar que o indicador de qualidade de dois nós vizinhos é "alto" ele deverá ser maior que 104. Ele é considerado de qualidade "média" quando é maior que 80 e menor que 104. Finalmente, é considerado "baixo" quando é menor que 80 (estas informações foram adquirida da aplicação *pong*). A Tabela 9 mostra um resumo dos diferentes níveis do LQI. Alguns autores consideram que o nível de LQI pode ser entre 110 e 50 como valores máximos e mínimos. O padrão 802.15.4 não especifica como é calculado este valor (CHIPCON 2.4 2007).

⁶ Tinyos2.0, é a nova versão do sistema operacional para nós de sensores sem fio.

Tabela 9 Níveis do sinal do LQI.

Nível	Valor
Alto	> 104
Médio	> 80
Baixo	< 80

3.2.3. Pacotes Perdidos

Esta métrica será determinada pela quantidade de pacotes recebidos sobre a quantidade de pacotes enviados multiplicado por 100.

$$PPE(100) = \frac{Pacotes - Recebidos}{Pacotes - Enviados} * 100$$

Equação 3-2

Sendo, *Pacotes-Recibidos* a quantidades de pacotes que chegam à estação base e *Pacotes-Enviados* a quantidade de pacotes que sairão do no transmissor.

3.2.4. Throughput

O *throughput* é definido pela IEEE como a soma de trabalho que pode ser executado por um sistema de computador ou um componente em um determinado período de tempo (IEEE 1990).

3.2.5. Latência

Em um sistema eletrônico de comunicação veicular; se denomina *uplink* aos nós de sensores que se comunicam com o ECU é se denomina de *downlink* quando

o ECU gera uma decisão para um atuador (ELBATT, et al. 2006). A latência geral é dada principalmente pela latência de comunicação da leitura do nó *uplink* U_i para um correspondente nó *downlink* D_i é dada por:

$$Latência(i) = UL_{Latência(i)} + ECU_{Latência} + DL_{Latência(i)}$$

Equação 3-3

onde $UL_{Latência(i)}$ é a latência envolvida na comunicação de uma medida do nó sensor U_i para o ECU e a $DL_{Latência(i)}$ é a latência causada pela comunicação do ECU para o nó sensor D_i . Finalmente, o $ECU_{Latência}$ é o tempo requerido pelo ECU para o processamento da informação.

A Tabela 10 mostra os parâmetros do IEEE 802.15.4 da camada física. O IEEE 802.15.4 suporta 2 tipos de esquemas para o MAC, a CSMA/CA MAC durante CAP e a livremente MAC durante a CFP.

Tabela 10 Parâmetros 802.15.4 camada física.

Acesso ao meio	DSSS
Frequência	2.4 GHz
Data Rate	250 Kbps
Canaís	16
Bits/ símbolos	4
Data Frame PPDU	15+payload to 31+payload bytes

O IEEE 802.15.4 PAN, pode ser *beacon* habilitado ou desabilitado. Para uma aplicação automotiva sem fio, ter *beacon* habilitado na rede é apropriado devido a dois aspectos segundo (ELBATT, et al. 2006):

- A transmissão de *baecons* periódicos pelo coordenador do PAN que poderia ser o ECU para a finalidade de sincronização.

- A necessidade de fornecer latência garante a utilização de *Guaranteed Time Slots* (GTS) em CFP.

Finalmente, segundo (ELBATT, et al. 2006), para caracterizar a variação da latência para uma rede estrela em um veículo com o número de nós U_i . Para uma instância que $N = 7$ e cada nó se assumem, que vai ter 1 GTS por *frame* e, por conseguinte, uma latência de fila de 16 *slot* (um super *frame* de duração). Para $N = 14$ cada nó tem 1 GTS para cada 2 super *frames* com uma latência de fila de 32 *slot*. Assim por diante.

$$802.15.4 UL_{Latência} = Q_{Latência} + Tx Time$$

$$802.15.4 UL_{Latência} = \left(16 * \left\lceil \frac{N}{7} \right\rceil * slot_{Duração} \right) + \frac{Tamanho Pacote}{Link bit rate}$$

Baseado em que a duração do *slot* é de 0.96 ms, o tamanho do pacote igual a 17 bytes e *link bit rate* igual a 250 kbps, segundo (ELBATT, et al. 2006).

$$802.15.4 UL_{Latência} = 15.36 * \left\lceil \frac{N}{7} \right\rceil + 0.544 msec; N > 1$$

Equação 3-4

Sendo, N é o número de nós.

3.2.6. Doppler

Segundo (SARKIMAKI, et al. 2006) modelar os canais de transmissão não é uma tarefa fácil. Para isso foram definidas algumas propriedades como: uma pequena escala é utilizada para descrever a rápida flutuação da amplitude e da recepção do sinal sobre um curto período de tempo ou distância. Múltiplas rotas de propagação são ilustradas na Figura 26 onde as ondas de rádio chegam a diferentes rotas com diferentes tempos devido à reflexão dos obstáculos pertos.

Figura 26 Múltiplas rotas de propagação com um sensor em rotação (SARKIMAKI, et al. 2006)

O tempo de variação natural de um canal pode ser investigado pelo efeito Doppler:

$$fd = \frac{v}{\lambda} \cos\phi, e \lambda = \frac{c}{f_c}$$

Equação 3-5

Sendo v a velocidade do sensor e ϕ o ângulo entre a direção do motor e a direção de chegada da onda. f_c é a frequência transportadora.

3.3. Analisador de espectro FHS3

O analisador de espectros (FSH3 2002) é um instrumento utilizado para a análise de sinais alternados no domínio da frequência. Possui certa semelhança com um osciloscópio, uma vez que o resultado da medida é apresentado em uma tela, tendo a amplitude na vertical e a frequência na horizontal. Um analisador de espectros é essencialmente um receptor de rádio passivo, com uma interface gráfica (*display*) para a análise e medida do sinal no domínio da frequência. Os

analisadores de espectros indicam geralmente a informação contida no sinal de forma direta, tais como a tensão, a potência, o período e a frequência.

A análise espectral de um sinal fornece informação adicional difícil de ser obtida em uma análise temporal (osciloscópio). Por exemplo, ao analisar um sinal senoidal levemente distorcido em função do tempo, dificilmente percebemos visualmente essa imperfeição. Na análise no domínio da frequência, pequenas distorções e imperfeições (que implicam em componentes de frequência diferentes) são facilmente identificadas, pois cada componente de frequência é visualizada separadamente.

A escala vertical (amplitude) e horizontal (frequência) de um analisador de espectros é em geral logarítmica que facilita a leitura de sinais de baixa amplitude. Assim, a amplitude pode ser diretamente lida em dB (unidade mais usual em sistemas de comunicação) e na escala horizontal um amplo espectro de frequências pode ser visualizado simultaneamente.

As principais medidas efetuadas com um analisador de espectro são:

- Modulação: em sistemas de comunicação via rádio, é fundamental a análise dos níveis de potência relativos a cada frequência, do grau e da qualidade de modulação, da largura de banda ocupada no espectro. etc.
- Distorção: sistemas supostamente lineares (amplificadores, transmissores e receptores de rádio, filtros, etc. apresentam sempre certo grau de não linearidade gerando conseqüentemente distorções no sinal (harmônica, intermodulação, emissões espúrias).
- Ruído: todo circuito ou elemento ativo gera ruído tipicamente em uma faixa larga de frequências. Medidas como figura de ruído e relação sinal/ruído são importantes na caracterização de sistemas eletrônicos ou dispositivos.

Para nosso caso foi utilizado um analisador de espectro *Handheld Spectrum Analyzer R&S*® FSH3, que possui uma frequência desde 100 KHz a 3 GHz, sendo

1.5 GHz o máximo *span* de freqüência. Para nosso caso experimental utilizamos uma freqüência de 2.400 GHz - 2.480 GHz com *spans* de 200 MHz, 50 KHz e de 10 KHz para uma melhor visualização e com uma amplitude, na faixa de 0 dBm a -90 dBm. A Figura 27 ilustra o analisador que utilizamos nas medições práticas.

Figura 27 Analisador de Espectro FHS3

3.4. Aplicativos para aquisição dos dados

Um dos aplicativos utilizados foi o SBT80app, desenvolvido pela EasySen (EASYSSEN 2008), que permite a captura de dados nos diferentes canais disponíveis nos conectores de expansão do TmoteSky.

TmoteSky contém dois conectores de expansão e um par de *jumbers onboard*, que podem ser configurados para utilização de sensores analógicos, periféricos digitais, displays LCD, os quais podem ser controlados por módulos nos aplicativos. O conector IDC de 10 pinos é o conector principal e provê tanto entradas digitais como entradas analógicas. Adicionalmente, o conector IDC de 6 pinos provê acesso às características exclusivas do TmoteSky. Por exemplo, o ADC7 pode atuar

com um simples supervisor de voltagem. Na Figura 28 e na Figura 29 se ilustra os dois conectores IDC de 10 e 6 pinos respectivamente.

Figura 28 Conector de expansão de 10 pinos (MOTEIV 2007)

Figura 29 Conector de expansão de 6 pinos (MOTEIV 2007)

O SBT80app (EASYSSEN 2008), consiste em dois arquivos cabeçalhos em C++ que são: *SBT80ADCmap.h* e *SBT80Msg.h*, além de um arquivo de configuração *MobileNode.nc* e um arquivo de tipo módulo *MobileModeM.nc*. Este programa tem a característica de controlar e gerenciar as entradas do ADC do nó sensor TmoteSky, permitindo assim a aquisição dos dados de forma completa e prática. No Apêndice B, mostra-se o código completo em NesC da aplicação SBT80app. A Figura 30 ilustra os diferentes módulos do aplicativo utilizado.

Figura 30 Diagrama dos módulos do aplicativo SBT80app

Outro aplicativo em NesC utilizado é o *Pong*, que é empregado para a transmissão e recepção dos pacotes como se fosse um *ping-pong*. É utilizado principalmente para a coleta das sanais de RSSI e LQI. Além disso, o formato dos dados permite obter os sinais de origem e destino do RSSI e LQI. Do mesmo modo no, Apêndice B, mostra-se o código completo da aplicação *Pong*. Os diferentes módulos são ilustrados na Figura 31 que está em seguida. Todos os programas desenvolvidos são feitos na linguagem *NesC* que rodam no sistema operacional *TinyOS 1.x*.

Figura 31 Diagrama dos módulos do aplicativo Pong

Para todos os testes realizados foi empregado o aplicativo TOSBase⁷, que é utilizado para a recepção dos dados via RF, para em seguida serem enviados via porta serial ao computador. O código completo está disponível no Apêndice B, parte de sua implementação e seus módulos estão ilustrados na Figura 32.

⁷ TOSBase, aplicativo feito em NesC para TinyOs 1.x. Em sua maioria de vezes funciona como uma estação base na rede de sensores.

Uma segunda opção que utilizamos para o tratamento e visualização dos dados foi o LabView 8.0. Com esta ferramenta, conseguimos visualizar as informações do *throughput*, RSSI, LQI dos nós localizados no veículo nas 9 áreas configuradas como pode ser visto no próximo capítulo.

Figura 34 Programa de controle e monitoramento em LabView

O código fonte deste aplicativo está detalhado no Apêndice C, ali se ilustra as diferentes fases e subfases do aplicativo.

Capítulo 4

4. Trabalhos *Relacionados*

Cada vez mais as pessoas precisam de interagir com seus veículos com o objetivo de obter um retorno do desempenho, conforto, segurança (*safety*). No entanto, as pessoas são diferentes, cada uma delas precisa de informações diferentes ou características especiais. Sendo assim, é proposta uma solução do monitoramento e controle de um ambiente automotivo através das RSSF. Recentes trabalhos estão sendo apresentados nesta área de sensores para veículos. Em geral, estes tipos de sensores requerem uma estrutura predeterminada que permitam obter medidas personalizadas.

Na atualidade, a indústria automobilística cria uma diversidade de modelos para cada cliente, algumas indústrias de autos, principalmente MINI e Scion da BMW e Toyota respectivamente, planejam atividades de marketing para personalizar veículos conforme pedidos (PETERSON 2007). Elas realizam mais de 10.000.000 possíveis configurações personalizadas, sendo as variações dos veículos desde os mais simples ao, mais sofisticado complicado ou complexo (PETERSON 2007).

Em “*Wireless Automotive Communications*” (NOLTE, HANSSON e BELLO 2006) se identifica as tecnologias sem fios utilizadas nas aplicações dentro de um veículo e entre veículos, avaliando os novos serviços oferecidos pela indústria automotiva. Propõe-se discutir como as novas tecnologias sem fios poderiam interagir com a arquitetura de protocolos de comunicação já existentes como *Controller Area Network* (CAN), *Local Interconnect Network* (LIN), *Media Oriented System Transport* (MOST), além do suporte em tempo real das aplicações em ambientes automotivos. Considerando a energia utilizada, ambos *ZigBee* e UWB requerem muito pouca energia para serem operados. Por outro lado, embora muito melhor que *Wi-Fi*, *Bluetooth* requer cerca de 50 vezes mais energia para transferir um simples bit comparado a UWB.

Observando o contexto automotivo, o *Bluetooth* hoje em dia é incluído em muitos veículos. Por conseguinte, é o mais utilizado na tecnologia sem fio automotiva. A técnica de modulação de salto de frequência utilizada é também adequada para ambientes rugosos encontrados frequentemente em ambientes automotivos. Adicionalmente, os dispositivos *Bluetooth* podem facilmente se comunicar com outros dispositivos do mesmo padrão no veículo como: dispositivos portáteis, DVD, MP3 *players*, auto-falantes, celulares, *smartphones*, entre outros (NOLTE, HANSSON e BELLO 2006).

Por outro lado, o *ZigBee*, preenche um vazio não previsto por outras tecnologias especialmente a interconexão de sensores sem fio de controle. O *ZigBee* desenvolvido e utilizado para o controle e monitoramento de aplicações como medições de temperatura, umidade, ventilação, ar-condicionado, luminosidade entre outras mais. Finalmente, o UWB é um padrão novo nesta área automotiva. Possibilita e provê uma comunicação robusta devido à utilização do amplo espectro de frequência. Para a utilização de aplicações que requerem uma grande largura de banda como a intercomunicação de dispositivos multimídia. Outras aplicações são as de detecção, prevenção de colisões e suspensão de sistemas que dependam de determinadas condições (NOLTE, HANSSON e BELLO 2006).

Tsai et AL., no ano 2007 escrevem no artigo “*ZigBee-based Intra-car Wireless Sensor Networks*”, experimentos e testes em uma rede de sensores em ambientes automotivos utilizando o padrão *ZigBee*. A localização dos nós de sensores no veículo é importante para um sinal adequado. Utilizam 4 nós em um veículo para a transmissão e recepção, onde conseguiram obter resultados de LQI e RSSI. O fato é que o ruído do motor do veículo incrementa a sensibilidade da recepção dos pacotes de 2 dB a 4 dB.

Além disso, a interferência com dispositivos *Bluetooth* pode reduzir o desempenho de 3% a 40%, dependendo da configuração do sinal e da potência da saída. A Figura 35 mostra a comparação gráfica dos resultados obtidos em um cenário com interferência de dispositivo *Bluetooth* (TSAI, et al. 2007).

Figura 35 Comparação do desempenho com e sem interferência *Bluetooth* (TSAI, et al. 2007)

Além disso, este trabalho apresenta uma estratégia adaptativa que poderia melhorar o desempenho da transmissão dos pacotes, na qual o sinal de saída do rádio do nó sensor é aperfeiçoado.

Dois níveis de aplicações em ambientes automotivos são apresentados em (CHEN e CHEN 2005) no artigo “*Using Bluetooth wireless technology in vehicles*”. Para o nível do sistema da aplicação, o CAN transmite em tempo real os dados em uma faixa maior do que 250 Kbps e esta informação é compartilhada com a rede, normalmente a 125 Kbps. Enquanto a faixa de transmissão assimétrica no *Bluetooth* na rede é de 723.2 Kbps e é de 433.9 Kbps na transmissão simétrica. O baixo consumo de energia do *Bluetooth* é uma vantagem. Segundo os autores, a tecnologia sem fio do *Bluetooth* não é adequada para ser utilizada no controle da segurança crítica do veículo como: *Anti-Lock Break System* (ABS), *Electronic Stability Program* (ESP), *Electric Brake Force Distribution* (EBFD), *Supplemental Restraint System* (SRS) *Airbag*, etc.; devido a que as interferências e as configurações de atraso no tempo das aplicações são muito perigosas. Todavia poderia ser utilizado para o controle de situações não críticas no veículo.

O desempenho do padrão IEEE 802.11b em ambientes veiculares na faixa de 2.4 GHz é apresentado em “*Performance of Wlan 802.11b Standard at in-vehicle Environment*” por (LEE, et al. 2006). O nível de interferência do sistema em uma mesma faixa de banda de frequência e o ruído do veículo é utilizado como variáveis para os resultados numéricos.

Figura 36 Desempenho do BER em um veículo com ruído (LEE, et al. 2006)

A Figura 36 mostra o desempenho de BER de uma WLAN com diferentes níveis de interferência, a saída de sinal é de 1 W. Na faixa de -50 dBm a -30 dBm o BER não afeta o desempenho do sistema, mas antes dos -30 dBm causa uma degradação do desempenho, no caso do ruído do veículo varia entre -60 dBm a -10 dBm. As simulações mostram que o nível de -40 dBm é o ponto crítico para a performance do sistema. Nestes experimentos, não foi considerado *fading* para a transmissão durante a transmissão dos pacotes (LEE, et al. 2006).

Um estudo mais detalhado relacionado à interferência entre os padrões 802.15.4 e 802.11b é descrito em “*Mutual interference analysis of IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b*” pelos autores (SHIN, PARK e KWON 2007). O *Packet Error Rate* (PER), o tempo de transmissão e o *throughput* são utilizados como métricas de desempenhos nos dois sistemas estudados. O PER é obtido do *Bit Error Rate* (BER) e o tempo de colisão. Finalmente, o tempo de colisão é calculado assumindo que os pacotes de transmissão para ambos os padrões. A interferência de banda de IEEE 802.11b é considerada como *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) para IEEE

802.15.4. Em outro aspecto, a interferência de IEEE 802.15.4 é considerada como uma interferência eletrônica intencional de dispositivos e sistemas eletrônicos.

A distância e o centro da frequência entre 802.11b e IEEE 802.15.4 são importantes, deste modo devem ser levados em conta. Se a distância entre o nó IEEE 802.15.4 e o nó IEEE 802.11b é maior que 8 metros, o PER de IEEE 802.15.4 é menor que 10^{-5} . O que significa que a interferência de IEEE 802.11b é quase desprezível.

Além disso, existem 3 canais adicionais no padrão IEEE 802.15.4 (2420 MHz, 2445 MHz e 2470 MHz) como é mostrado na Figura 37. Para prevenir a interferência entre estes 2 padrões, o padrão IEEE 802.15.4 recomenda a utilização de canais que evitem a sobreposição. Estes canais podem ser utilizados para a coexistência de canais sob a interferência de IEEE 802.11b. Os resultados deste artigo sugerem a coexistência dos padrões IEEE 802.15.4 e 802.11b na implementação e a utilização de redes (SHIN, PARK e KWON 2007).

Figura 37 Largura de Banda de 802.11b WLAN e IEEE 802.15.4 (SHIN, PARK e KWON 2007)

Sandeep Kar e Frost & Sullivan são empresas de consultoria e análises nos avanços das tecnologias de automóveis, eles dirigem as futuras técnicas sem fio nos veículos. Ante as discussões sobre o uso de UWB, *ZigBee* e WUSB, Kar defende as tecnologias *Bluetooth*, Wi-Fi, Wimax como tecnologias e protocolos com grandes detalhes. Reduzir as instalações elétricas para melhorar a economia do combustível é uma das considerações nas tecnologias para redes sem fios nos veículos, sobretudo considerando que o preço do combustível está em alta.

Segundo Kar, “As pessoas desejam que seus veículos sejam mais luminosos e que o consumo de combustível seja eficiente. A tecnologia sem fio é o caminho para eliminar o peso dos fios, do uso cobre nas instalações elétricas, porém, mais de uma tecnologia poderia fazer isso. Eu não estou achando que os preços do *ZigBee* subam”. “Porque *ZigBee* pode dar um maior conforto e conveniência nas aplicações baseadas em RSSF de múltiplos sensores e atuadores”. Kar pensa que a existência do protocolo *Local Interconnection Network* (LIN) reduza a complexidade das instalações elétricas e forneça uma alternativa barata. Porém, além do peso do veículo, a instalação elétrica tem dificuldade no roteamento e nos limites de flexibilidade. Conseqüentemente, algumas universidades temem pesquisado o uso da conectividade sem fio (RANDY 2007).

“Se você observa nesta tecnologia, peça por peça, você não pode justificar o custo” diz Patrick Dessert⁹. “No entanto, quando você olha tudo isto como um nível de sistema, o custo é justificável através da redução da garantia, diagnósticos inteligentes e funcionalidade”.

⁹ Patrick Dessert, diretor da *Oakland University's Product Development* e do centro de *Manufacturing (PDM)*, sócio com a *DaimlerChrysler*, *Arvin-Meritor*, *Eaton Corp.*, *TRW*, e *Lear Corp.*

Figura 38 WV Phantom (LEOHOLD 2004)

No artigo “*Communication Requirements for Automotive Systems*” escrito por Jurgem Lohold no ano 2004. Este arquivo descreve o veículo *WV Phantom* possui mais de 11.136 partes elétricas em total, na área de comunicação possui 62 ECU, para um diagnóstico externo tem 31 ECU para comunicar via um cabo serial, 31 ECU conectados por meio de 3 CAN BUS, a Figura 38 mostra o esquema do *WV Phantom* (LEOHOLD 2004).

Capítulo 5

5. Resultados Experimentais e Discussão

Neste capítulo discutiremos e avaliaremos os resultados obtidos nos testes e experimentos, comparando-os com os resultados e trabalhos relacionados mencionados no capítulo anterior.

5.1. Níveis do sinal RSSI

As primeiras avaliações foram dos experimentos realizados para obter o sinal do RSSI nos cenários que foram descritos no capítulo 3. No cenário onde o veículo estava parado o dispositivo Tmotesky se localizou nas 9 áreas diferentes em tempos diferentes, adquirindo-se então os dados de RSSI, LQI mediante o aplicativo SBT80app desenvolvido pela Easysen (EASYSEN 2008).

Para uma melhor compreensão, a Figura 39 ilustra uma área quadrada onde se apresenta as 9 localizações dos dispositivos sensores utilizados. Os 3 primeiros nós *A*, *B* e *C* na parte anterior; na parte central estão os nós *D*, *E* e *F*; e na parte posterior do quadro estão os 3 últimos nós *G*, *H* e *I*. Finalmente, o nó estação base está localizado na parte superior direita do quadrado entre os nós *B* e *C*; este cenário é de 3 x 3 nós. No eixo "X" e "Y" dos gráficos se mostra o nível do sinal que poderia estar entre os valores de -90 dBm até -10 dBm.

A ferramenta utilizada para a visualização dos sinais foi o *LabView* 8.0 - no apêndice C apresentamos o código e algumas características desta aplicação. O código fonte desta aplicação e das outras que são utilizadas, está disponível no site do grupo de pesquisa: www.pad.lsi.usp.br/humanlab.

Figura 39 Localização dos dispositivos no cenário de testes

A potência de saída (*Output Power*) dos nós sensores por *default* é 0 dBm (máxima potência permitida no *chip* CC2024) (CHIPCON 2.4 2007), nesta configuração o consumo de energia dos nós sensores é de 17.4 mA mostrada na Tabela 8 Configuração da potência do sinal do CC2420 . Para este primeiro cenário de teste deixamos as configurações de potência de saída nos valores padrões.

O resultado do primeiro teste realizado neste cenário é mostrado no Gráfico 1, ele ilustra um primeiro panorama a ser avaliado. Neste cenário não tinha nenhuma interferência de sinais das tecnologias Wi-Fi, *Bluetooth* e dos ruídos do ar condicionado, motor do veículo ligado, entre outros. Os obstáculos que estão presentes no testes é o próprio ambiente automotivo, portas, porta malas, motor, painel de controle, assentos, janelas, pára-brisas, vidros até mesmo as pessoas.

Gráfico 1 Níveis de Sinal RSSI a 0 dBm

Neste gráfico, os sinais do RSSI variam de -65 dBm (sinal mais fraco) até -35 dBm (sinal mais forte). Nas medições de RSSI as que estão entre -50 dBm até -20 dBm são consideradas eficazes. Desta forma, o gráfico tem uma queda de sinal na área posterior do veículo, chegando o nó do meio *H* até -65 dBm. Observa-se também que nas áreas do meio *D*, *E* e *F* o sinal é muito melhor que nas outras, sobretudo nos extremos *D* e *F*. Esta diferença de sinal deve-se ao posicionamento dos nós sensores em relação ao nó estação base. A estação base encontra-se localizada bem próxima das áreas *D* e *F*.

Gráfico 2 Níveis de Sinal RSSI a 0 dBm com interferências

Comparando o Gráfico 2 com o anterior, a principal diferença é que esse possui algumas interferências causadas por dispositivos como *Bluetooth*, WI-FI e aparelhos como ar-condicionado, ruído do motor ligado, entre outros. Este gráfico apresenta uma queda do sinal, assume-se que esta leve queda do sinal é devido às interferências mencionadas anteriormente. Segundo (TSAI, et al. 2007), há uma queda do desempenho na transmissão e recepção dos dados, esta queda do desempenho é de 3% até 40%, esta diferença é devido à configuração de cada nó, sobretudo na potência de saída.

Em nosso caso, observa-se uma situação não muito diferente da apresentada por (TSAI, et al. 2007). Neste experimento, as configurações da potência dos nós de sensores não foram modificadas, a potência de saída ficou em 0 dBm (configuração padrão).

Dando continuidade aos experimentos, realizamos um segundo teste com 0 dBm de potência igual dos testes anteriores, mas neste caso os nós de sensores ficaram na parte externa do veículo, como pode ser visto na Figura 40, a figura “a” o nó sensor esta localizado na frente do carro, a figura “b” o nó estação base, a figura “c” na parte posterior do veículo, a figura “d” perto do pinéu dianteiro do veículo, finalmente no pinéu posterior na figura “e”.

Figura 40 Localização dos nós no veículo do lado de fora

Os resultados dos testes deste cenário são mostrados no Gráfico 3. Este gráfico ilustra os diferentes níveis do sinal em dBm. Observa-se que a primeira diferença é a escala do gráfico que está entre -50 dBm e -75 dBm, com relação ao gráfico anterior que está entre -35 dBm e -65 dBm. O Gráfico 1 possui um sinal do RSSI maior que o Gráfico 3. O sinal do RSSI mais forte nesse experimento é de -50 dBm, que é do dispositivo localizado na área E do veículo. Isto deve-se ao fato de

que o nó está mais perto da estação base, conseqüentemente, o sinal é maior com relação às demais localizações dos nós sensores no veículo.

Gráfico 3 Níveis de Sinal RSSI a 0 dBm com os dispositivos no exterior do veículo

Todos os testes descritos acima foram feitos com uma arquitetura de rede estrela usando simples saltos para o envio dos pacotes. Em alguns casos o sinal dos nós sensores não é suficientemente bom para a transmissão dos dados. Porém, esta dificuldade pode ser solucionada usando uma topologia malha no veículo com um protocolo de comunicação *multihop*. Usando esta solução pode-se obter um sinal adequado para a transmissão e controle dos dados.

Este mesmo cenário foi modificado. A potência de saída dos nós sensores foi alterada para -10 dBm e -25 dBm. A potência mais baixa suportada pelos nós de sensores é de -25 dBm. Nestas duas alterações observa-se no Gráfico 4, que o sinal do RSSI tem uma queda mínima em relação aos gráficos anteriores pelo fato de que as distâncias são curtas. Mais se as distancias fossem mais cumpridas, por exemplo, mais de 10 m o sinal RSSI seria muito baixo.

Gráfico 4 Níveis de Sinal RSSI a -10 dBm e -25 dBm no interior do veículo

Finalmente, neste mesmo cenário, os testes foram feitos com os nós sensores localizados fora do veículo, configurados a uma potência de saída de -25 dBm para tentar encontrar alguma diferença. Efetivamente, observa-se uma diferença em relação aos outros gráficos, avaliando-se a escala do sinal onde foi observado o valor máximo do sinal de -57 dBm e o mínimo de -68 dBm. O Gráfico 5, ilustra esta diferença. De fato, esta diferença é causada pela diminuição do sinal de saída dos dispositivos configurados a -25 dBm.

Por esta razão, não é uma boa alternativa fazer aplicações com esta configuração de -25 dBm nos nós de sensores. Tratando o consumo de energia, nesta configuração não existe grande diferença o nó sensor a -25 dBm de potência de saída consome 8.5 mA, só 6.2 mA menos do que a configuração padrão.

Gráfico 5 Teste a -25 dbm dispositivos no exterior do veículo

No Gráfico 6 fazemos um comparativo nas diferentes áreas do veículo anteriormente mencionadas em forma simultânea quando se está transmitindo e recebendo informação com e sem interferência (*Bluetooth*, Wi-Fi, ar condicionado, motor ligado). O gráfico mostra as comparações entre os dois sinais. Em alguns pontos do veículo o sinal com interferência é melhor que o outro.

Gráfico 6 Sinal de RSSI em cenários com e sem obstáculos

Para uma melhor explicação a Figura 41 ilustra as áreas onde a sinal com interferência *Bluetooth* tem mais ganho do sinal. Perto da estação base e os nós *B*, *C*, *F*, *H* e *I* são os mais afetados por esta interferência.

Figura 41 Maior interferência do *Bluetooth*

5.2. Níveis do sinal LQI

O LQI é um indicador de força e/ou de qualidade da ligação sem fios entre os nós vizinhos. O LQI foi introduzido no protocolo de comunicação *ZigBee* e é fornecido pelo componente de rádio CC2420. O LQI é representado por um inteiro de 8 bits, os valores podem variar entre 0 até 255, correspondendo respectivamente

ao valor de qualidade mais baixo e mais elevado que o receptor consegue detectar entre -110 dBm e 50 dBm, como valor máximo e mínimo respectivamente.

Considera-se um sinal de 104 de LQI como ideal para a transmissão e recepção de dados entre os nós vizinhos, os gráficos a seguir permitem ter uma visão clara que o sinal é sempre ótimo na maioria dos pontos do veículo, sendo em sua maioria maior que 104. Estes dados se obtiveram com um total de 1.223 pacotes em média nas 9 localizações do veículo.

Por exemplo, o Gráfico 7 ilustra o nó 6 que está localizado na parte direita do nó estação base, bem próximo à porta e estação base. Nesta localização, a quantidade de pacotes recebidos pela estação base com um nível de sinal maior ou igual a 104 de LQI foi de 1.214 pacotes sendo um total de 99.26% dos pacotes transmitidos. O nível de LQI é "alto" devido à pouca distância, além de não ter obstáculos entre o nó 6 e a estação base.

Gráfico 7 Sinal de LQI na localização do nó 6 perto da estação base

No gráfico seguinte utilizamos os dados recebidos pelo nó 9 localizado na área I do veículo, uma das áreas mais distantes do nó estação base e com alguns

obstáculos do ambiente veicular. Os pacotes recebidos com sinal "alto" foram 499, sendo 40.8% em relação aos pacotes transmitidos; mas 59.2% dos pacotes transmitidos do nó 9 são maiores de 80 de LQI. Este nível de sinal é ainda muito bom para a transmissão de dados, Também observou-se que nenhuma das áreas do veículo obtivemos sinais menores que 80 de LQI. O Gráfico 8 ilustra a quantidade de pacotes acima de 104 de LQI.

Gráfico 8 Sinal de LQI no nó 9

5.3. Pacotes Perdidos

Para considerar a quantidade de pacotes perdidos entre dois pontos, consideramos a quantidade máxima de pacotes que deveriam chegar à estação base, com relação aos pacotes que finalmente chegaram à estação base.

A quantidade de pacotes perdidos vai depender muito do ambiente, da potência do sinal, localização dos nós sensores, obstáculos, entre outros fatores. Neste teste, nós mostramos a diferença que existe entre os cenários onde o sinal do RSSI está 0 dBm de potência (está no máximo) e a -25 dBm (está no mínimo). O Gráfico 9 ilustra o cenário onde o sinal é de 0 dBm, ali se observa que a perda de

pacotes é pouca, sendo o mais afetado o nó 8, que estava localizado no meio do veículo.

O nó 5, que estava localizado na cabine do veículo, muito perto da estação base, perdeu somente 2 pacotes. Para um ambiente automotivo onde as distâncias são curtas, a perda de pacotes é muito baixa. Segundo (BEINGOLEA 2007), testes realizados em ambientes com obstáculos a perda de pacotes é de 2%, em nosso caso a perda máxima de pacotes foi 3.5% e a mínima de 0.16%.

Gráfico 9 Pacotes perdidos a 0 dBm de Potência

No Gráfico 10 observa-se que a perda de pacotes aumenta e isto é devido ao nível do sinal de RSSI que está sendo testado (-25 dBm, nível mais baixo de potência). Por consequência, a perda de pacotes é muito maior como ilustrado no gráfico.

Gráfico 10 Pacotes perdidos a -25 dBm de Potência

Quando a potência do sinal é baixa, os obstáculos contribuem para que não haja uma qualidade de enlace adequada para a transmissão dos dados, conseqüentemente, existe uma perda de pacotes maior, neste caso é de 67.05%.

5.4. Análise do Throughput

Neste cenário medimos o *throughput* dos nós de sensores no ambiente veicular. Cada *frame* de dados da aplicação OscilloscopeRF¹⁰ tem um total de 36 *bytes*. O tempo dos experimentos foi de 300 segundos, a taxa de transmissão foi de 1.25 ms. Nestas circunstâncias nós conseguimos um *throughput* de 27.7 Kbps para uma topologia ponto a ponto.

A camada física do chip CC2024 suporta uma quantidade máxima de 128 *bytes* de *frame* de dados. Neste cenário, o experimento alcançou um *throughput* de 98,6 Kbps, com os mesmo parâmetros do teste anterior. O Gráfico 11 mostra a diferença destas duas medidas obtidas.

¹⁰ OscilloscopeRF é uma aplicação desenvolvida em NesC para as redes de sensores sem fio.

Gráfico 11 Transmissão ponto a ponto com 36 e 128 bytes

Finalmente, no seguinte cenário utilizamos até 4 nós em uma topologia estrela, o tamanho do *frame* de dados da aplicação foi de 36 *bytes*, a taxa de transmissão foi de 12.5 ms em um total de 300 s. de medição. Inicialmente o teste foi com um nó, logo dois nós, continuando com três nós e finalmente com quatro nós. Devido ao incremento dos nós sensores na rede, o *throughput* dos dados se incrementa de 14.0 Kbps até 33.0 Kbps para 4 nós com um *frame* de 36 *bytes*. Já com um *frame* de 128 *bytes*, o *throughput* vai de 49.8 Kbps até 117.5 Kbps. Este incremento não é linear devido ao modelo do protocolo CSMA/CA para o tratamento de colisões em uma rede de sensores. Os resultados são mostrados no Gráfico 12.

Gráfico 12 Transmissão de até 4 nós em uma arquitetura estrela

Gráfico 13 Início do teste com as 9 localizações dos dispositivos de sensores

Segundo (TSAI, et al. 2007), os nós que ficam perto do motor têm uma queda de desempenho entre 2 dB e 4 dB na sensibilidade da recepção e transmissão dos dados, esse mesmo fenômeno está sendo visualizado no Gráfico 13.

Na segunda imagem ilustrada no Gráfico 14, o veículo está em movimento a uma velocidade constante de 90 km/h. em linha reta com vários veículos em nosso contorno (Marginal Pinheiros). Aqui é mostrado uma queda do sinal em relação à primeira gráfica, sobretudo nos sensores localizados nas regiões *A* e *B*. Segundo (TSAI, et al. 2007), esta mudança do sinal pode ser causada por fatores como o ruído eletromagnético do motor, perdendo sensibilidade no desempenho da transmissão. Segundo os autores (SARKIMAKI, et al. 2006) o efeito Doppler não é um fator de perda de sinal em movimento. Neste teste a perda do sinal é pouca, entretanto, há uma diferença, o sinal máximo foi de -24 dBm para os nós *D* e *I*, e o sinal mínimo de -72 dBm foi obtida pelo nó *B*.

Gráfico 14 Teste em movimento a 90 km/h com 9 dispositivos de sensores

Ainda em movimento, na terceira gráfica o sinal se estabiliza nos dispositivos de sensores localizados em *A*, *B* e *C* onde se observa que a sinal é de -72 dBm. Já na região entre *D* e *G*, o sinal é de -24 dBm, como está ilustrado no Gráfico 15.

Gráfico 15 Teste em movimento a 90 km/h, nós A, B e C com nível de sinal -72 dBm

Finalmente, a Figura 43 ilustra a trajetória de cor azul do caminho percorrido da Universidade de São Paulo até a Praça Vladimir Azevedo. Esta figura é muito parecida com a mostrada anteriormente, no entanto, podem ser observados os

Gráfico 16 Testes em movimento final do percurso

5.6. Resultados em Movimento

Neste cenário de testes, a configuração foi a seguinte: foram preparados 2 nós sensores, um fixo (no pedestal) e o outro em movimento (no veículo). O nó estação base, está localizado no veículo juntamente com o computador para a captura dos dados mediante o aplicativo SBT80app. O veículo se movimenta a velocidades de 20, 40 e 60 Km/h. O outro nó está fixo em um pedestal de 1.5 m de altura em relação ao chão para evitar perdas de sinal causadas pelas zonas de Fresnel. As medições foram feitas inicialmente com um nó a 1 m de distância da estação base e posteriormente a 8 m. A Figura 44 ilustra a arquitetura deste cenário para os experimentos realizados.

Figura 44 Características dos testes realizados em movimento

O primeiro teste foi a uma velocidade de 20 Km/h. Inicialmente a 1 m de distância entre a estação base e o nó fixo e depois a 8 m. O Gráfico 17 ilustra o comportamento do sinal de LQI e RSSI nas distâncias de 1m e 8 m. Foram capturados aproximadamente um total de 40 pacotes com um sinal de -50 dBm de RSSI.

Gráfico 17 Teste em movimento a 20 km/h, distâncias de 1 e 8 m

Finalmente, a velocidade foi mudada para 60 Km/h. O Gráfico 18 ilustra os pacotes recebidos, em média, 20 pacotes chegaram com sinal adequado com relação aos outros.

Gráfico 18 Teste em movimento a 60 km/h, distâncias de 1 e 8 m

Todos os testes foram realizados no mesmo padrão para a transmissão dos pacotes, e os gráficos mostram que os sinais de RSSI não têm uma variação considerável, quando estão em movimento mantendo um nível de potência de rádio de 0 dBm nos dispositivos utilizados. Quando se reduz o nível da potência dos dispositivos a -25 dBm, o sinal RSSI era muito baixo, não conseguindo obter uma quantidade de pacotes adequada.

Capítulo 6

6. Considerações Finais

6.1. Conclusões

A partir dos resultados obtidos podemos extrair as seguintes conclusões parciais:

- A utilização dos dispositivos nós sensores com *ZigBee* em ambientes automotivos é uma alternativa confiável, baixo custo e de fácil configuração para o controle e monitoramento de redes sem fios nos veículos;
- Os sinais de RSSI e LQI em todos os cenários testados no presente trabalho indicaram um ótimo desempenho, mostrando que uma rede de sensores em um ambiente automotivo utilizando o padrão *ZigBee* é uma boa alternativa para capturar dados e posteriormente realizar o tratamento dos mesmos;
- A interferência produzida utilizando o padrão *ZigBee* com o padrão *Bluetooth*, produz uma leve queda no desempenho da transmissão e recepção dos dados.
- Os ruídos produzidos pelo motor diminuem a sensibilidade da transmissão e recepção dos pacotes, esta queda é baixa, sendo em alguns casos desconsiderada;
- Os sinais de LQI e RSSI avaliados na captura dos dados permitem determinar o nível da qualidade do sinal nas diferentes localizações em um ambiente automotivo, permitindo uma distribuição adequada no ambiente para uma melhor recepção do sinal;
- O *throughput* de dados em uma rede de sensores automotiva com uma arquitetura estrela, um *frame* de 36 *bytes*, um tempo de envio de pacotes de 1.25 ms o padrão *ZigBee* atinge taxas de transferências de dados de 27.7 Kbps. Se o *frame* alcançasse seu máximo comprimento de 128 *bytes* estaríamos falando de 96.6 Kbps. Concluindo que no protocolo de comunicação CAN pertenceriam à Classe B;

- Ao utilizar o analisador de espectro FHS3, capturamos os sinais dos dispositivos antes e depois de incrementar interferências como WI-FI, *Bluetooth*, motor ligado, ar-condicionado, entre outros. Observamos que as interferências citadas não afetaram o desempenho da rede de sensores;
- O uso de *ZigBee* é adequado para ambientes onde existe mobilidade e uma interação entre estes ambientes (entre veículos), além de ter que lidar com a infra-estrutura. Em relação aos dispositivos com *Bluetooth*, observamos uma desvantagem que é limitada a uma área pequena;
- A elaboração da ferramenta desenvolvida em *LabView* permitiu o controle e a visualização dos dados de uma forma ordenada. De fato isto ajudou muito na interpretação dos dados.

Portanto podemos concluir que uma RSSF, com uma configuração básica infra-estruturada com poucos sensores em ambientes internos automotivo baseados no padrão *ZigBee* atende as exigências mínimas de redes veiculares como o CAN. Todavia a partir de nossa experiência anterior com redes de múltiplos saltos (BEINGOLEA 2007), acreditamos que o desempenho da qualidade do sinal em cada nó e *throughput* podem ser sensivelmente melhorados. Isto decorre do fato de podemos ter múltiplos caminhos entre a estação base e os demais nós, contornando barreiras físicas como, por exemplo, chassis, assentos, pessoas, vidros, etc.

6.2. Limitações

Neste trabalho temos algumas limitações relacionadas à topologia, nós realizamos todos os testes utilizando uma rede estrela. Para a realização das medições nós utilizamos aplicações prontas desenvolvidas em TinyOs 1.x, nas quais somente fizemos algumas modificações simples. Finalmente, toda a rede de sensores em arquitetura estrela estava composta somente com a quantidade máxima de 10 nós.

6.3. *Trabalhos Futuros*

- Desenvolver uma aplicação em NesC para TinyOS que permita obter todos os parâmetros internos do dispositivo além dos conectores externos;
- Refazer todos os testes utilizando uma topologia com múltiplos saltos para a transmissão dos dados;
- Melhorar a aplicação feita em LabView, obtendo valores mais próximos ao tempo real, utilizando a aplicação proposta anteriormente;
- No ambiente automotivo, estudar em forma mais detalhada as interferências utilizando redes internas como UWB e *Bluetooth*;
- Desenvolver uma rede de sensores sem fios intra-veicular utilizando o padrão IEEE 1451;
- Realizar análises completas da mobilidade em um ambiente inter-veicular com os padrões UWB e Wimax, que são os mais concorrentes no momento;
- Desenvolver uma ferramenta para o gerenciamento dos dados. Utilizando análise semântica e ontológica que será mais adequado para a interpretação dos dados. No entanto, precisa-se de um maior estudo nesta área;
- Os nós de sensores possuem hardware limitado para armazenamento, comunicação e processamento dos dados. Por tanto, o desenvolvimento de uma aplicação que permita ajudar no processamento dos dados será de grande utilidade para futuras medições;
- Estudar a ferramenta MsRSense da Microsoft para futuras análises e processamento dos dados recolhidos.

7. Referências

AKINGBEHIN, KIUMI. “Wireless Communications for Intra-Vehicle Use (Wireless Harnesses).” *Institute for Advanced Vehicle Systems, University of Michigan-Dearborn*, 2005.

AKYILDIZ, IAN, WELLJAN SU, YOGESH SANKARASUBRAMANIAM, e ERDAL CAYIRCI. “A survey on sensor networks.” *IEEE Communications Magazine* 40, n. 8 (August 2002): 102–114.

ARABIA, CIOFI, CONSOLI, MERLINO, e TESTA. “Electromechanical Actuators for Automotive Applications Exploiting Power Line Communication.” *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2006. *SPEEDAM 2006*, May 2006: 909-914.

BEINGOLEA, JORGE. “Análise de Desempenho de uma Rede de Sensores Sem Fio Baseado no Padrão Zigbee/IEEE 802.15.4. Dissertação (Mestrado).” *Universidade de São Paulo*, Setembro 2007.

BOITHIAS, L. *Radio Wave Propagation*. McGraw-Hill, 1987.

CHEN, LING-JYH, SUN TONY, e GERLA MARIO. “Modeling Channel Conflict Probabilities between IEEE 802.15 based Wireless Personal Area Networks.” *IEEE International Conference on Communications* 1 (June 2006): 343-348.

CHEN, YE, e LI CHEN. “Using Bluetooth Wireless Technology in Vehicles.” *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, October 2005: 344- 347.

CHIPCON 2.4. “2.4 ghz ieee 802.15.4 / zigbee-ready rf transceiver (rev. b).” *Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>>.*, 2007.

CHIPCON. “Single-chip very low power rf transceiver (rev. a).” 2007. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc1000.html>.

CLEMENTE, FAIÃO, SANTI DENNIS, e RAFAEL GALVANI. “Frequências e Tensões no Mundo Real e Testes de Emc.” *VIII Seminário sobre a Eletro-Eletrônica Aplicada à Mobilidade Compatibilidade Eletromagnética*. Delphi Automotive Systems, Junho 2006.

DEGARDIN, VIRGINIE, MARC OLIVAS CARRION, MARTINE LIENARD, e PIERRE DEGAUQUE. “In-Vehicle Power Line Communication: Impulsive Noise Characteristics.” *Lab. IEMN/TELICE*, 2003: 1-4.

EASYSSEN. *Smart Sensing Solutions*. 2008. <http://www.easysen.com/>.

ELBATT, TAMER, SARAYDAR CEM, AMES MICHAEL, e TIMOTHY TALTY. "Potential for Intra-Vehicle Wireless Automotive Sensor Networks." *IEEE Sarnoff Symposium*, March 2006.

FERRARI, G, P MEDAGLIANI, S DI PIAZZA, e MARTALO M. "Wireless Sensor Networks: Performance Analysis in Indoor Scenarios." *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* (Hindawi Publishing Corp.) 2007, n. 1 (January 2007): 41.

FSH3. *Software for FSH3 Spectrum Analyzers*. Edição: Rohde & Schwarz Company. Alemanha, 2002.

GIACOMIN, JOAO CARLOS, e FLAVIO VASCONCELOS. "Qualidade da Medição de Intensidade de Sinal nas Comunicações de uma Rede de Sensores Sem Fios: uma Abordagem da Camada Física." Janeiro 2007.

GM. *General Motor*. 2007. <http://www.gm.com/company/onlygm/>.

GUIMARÃES, ALEXANDRE. *Eletrônica Embarcada Automotiva*. 1. São Paulo, São Paulo: Erika Ltda, 2007.

IEEE 1451.6. "IEEE P1451.6 Home Page." *The Proposed IEEE 1451.6 Standard*. 2008. <http://grouper.ieee.org/groups/1451/6/>.

IEEE. "IEEE Approves Two Smart Transducer Standard." *IEEE STANDARD ASSOCIATION*. 2008. http://standards.ieee.org/announcements/PR_IEEE1451series.html (acesso em 28 de Fevereiro de 2008).

IEEE. "IEEE Standard Computer Dictionary." *A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries*, 1990: 202.

IEEE. "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)." *Computer Society*, Setember 2006.

IEEE1451.5. "IEEE P1451.5 Working Group." *IEEE P1451.5 Project*. 2008. <http://grouper.ieee.org/groups/1451/5/>.

INTEL. "Intel® PRO/Wireless Network Connection." *PRO/Wireless Network Connection for Mobile* - Overview. 2008. http://www.intel.com/network/connectivity/products/wireless/prowireless_mobile.htm.

INTERFACEBUS. *CAN Bus Interface Description CANbus Pin Out, and Signal Names. Controller Area Network*. 2008. http://www.interfacebus.com/Design_Connector_CAN.html.

JUNG, CLÁUDIO ROSITO, FERNANDO SANTOS OSÓRIO, CHRISTIAN ROBERTO KELBER, e FARLEI JOSÉ HEINEN. “Computação Embarcada: Projeto e Implementação de Veículos Autônomos Inteligentes.” *XXV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*, 2005: 1358-1407.

LEE, G., e D. HEFFERNA. “Vehicules without wires.” *Automotive Electronics Computing and Control Engineering Journal*, October 2001: 205–211.

LEE, SEUNGHWAN, YOUNWANK PARK, JEAHWANG YU, DONG-HAHK LEE, e SANGSHIN LEE. “Performance of wlan 802.11b standard at in-vehicle environment.” *Proceedings 6th International Conference on IEEE ITS Telecommunications*, 2006: 1110–1113.

LEOHOLD, JURGEN. “Communication Requirements for Automotive Systems.” *5th IEEE Workshop on Factory Communication Systems*, 2004.

LEVIS, P., N. LEE, M. WELSH, e D. CULLER. “Tossim: Accurate and scalable simulation of entire tinyos applications.” *Sensys*, 2003.

LI, JIA, e TIMOTY TALTY. “CHANNEL CHARACTERIZATION FOR ULTRA-WIDEBAND INTRA-VEHICLE SENSOR NETWORKS.” 2006.

LING-JYH, CHEN, SUN TONY, e MARIO GERLA. “Modeling channel conflict probabilities between IEEE 802.15 based Wireless Personal Area Networks.” *IEEE International Conference on Communications (ICC 2006)*, 2006.

LISIANE, HERINGER, ANGÉLICO BRUNO, ABRÃO TAUFÍK, e JESZENSKY PAUL. “Sistemas de Comunicação de Banda Ultralarga.” *REVISTA CIENTÍFICA PERIÓDICA - TELECOMUNICAÇÕES*, 2006: 8-20.

LYMBEROPOULOS, D., Q. LINDSEY, e A SAVVIDES. “An empirical characterization of radio signal strength variability in 3-d ieee 802.15.4 networks using monopole antennas. .” *European conference on Wireless Sensor Networks*, 2006: 326 341.

MENESES, ERICO. “Uma Arquitetura de Sensores Inteligentes Disparada por Eventos.” *Dissertação de Mestrado*. Julho de 2007.

MERCEDES. *Mercedes-Benz*. 2008. <http://www.mercedes-benz.com.br/ModeloDetalhe.aspx?categoria=11&conteudo=11874&descricao=1530&produto=2>.

MOTEIV. “Tmotesky. ultra low power ieee 802.15.4 compliant wireless sensor module.” *Visualizada. Disponível em:*, 2007: <<http://www.moteiv.com/products/docs/tmote-sky-datasheet.pdf>>.

NIST-IEEE. "NIST IEEE-P1451 Draft Standard Home Page." *Brief Description of the Family of IEEE 1451 Standards*. 2008. <http://ieee1451.nist.gov/>.

NOLTE, THOMAS, HANS HANSSON, e LUCIA LO BELLO. "Wireless Automotive Communications." 2006.

PERRUSSEL, DAVID. "Open Sensor Interface Needsfor the US Navy." *Sensor Expo Chicago - Naval Surface Warfare Center -Dahlgren, Virginia USA*, 2005.

PETERSON, E. O. DIOMEDES. "An integrated automotive diagnostics system that is customizable, low-cost, and non-intrusive built on a wireless sensor network. Dissertação (Mestrado)." *UNIVERSITY OF CALIFORNIA Santa Barbara*, 2007.

RANDY, FRANK. "Wireless Technologies Simplify Wiring Harness." *SPECIAL REPORT: EMERGING WIRELESS TECHNOLOGY (AUTO ELECTRONICS)*, July 2007: 17-22.

RUIZ, L., et al. "Arquiteturas para redes de sensores sem fio. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores." *SBRC*, 2004.

SANTOS, SERGIO TORRES DOS. "REDES DE SENSORES SEM FIO EM MONITORAMENTO E CONTROLE." *UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO*, 2007.

SARKIMAKI, VILLE, RISTO TIAINEN, TUOMO LINDH, e JERO AHOLA. "Applicability of ZigBee Technology to Electric Motor Rotor Measurements." *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion IEEE*, 2006.

SHIN, SOO YOUNG, HONG SEONG PARK, e WOOK HYUN KWON. "Mutual Interference Analysis of IEEE 802.15.4 and IEEE 8-2.11b." *The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 2007: 3338-3353.

SHRINATH, A, e A EMADI. "Electronic control units for automotive electrical Power systems: communication and networks." *Institution of Mechanical Engineers. Illinois Institute of Technology* 218 (2004).

SOFTING. *Controller Area Networks*. 2008. <http://www.softing.com/home/en/industrial-automation/products/can-bus/index.php?navanchor=3010024>.

STELZER, JOHANN. "LIN bus emerging standard for body control apps." *European Marketing Manager Automotive Products Group Microchip Technology Inc.*, 2004.

TANENBAUM, A. S. *Computer Networks*. Quarter edition. NY: Printice-Hall, 2003.

TOYOTA. *Car Safety Innovation and Technology*. 2008.

<http://www.safetytoyota.com/hello.html#/prius/technology/wil> (acesso em 2008).

TSAL, H.-M., C. SARAYDAR, T. TALTY, M. AMES, A. MACDONALD, e O. K. TONGUZ. “Zigbee-based intra-car wireless sensor network.” *IEEE International Conference on Communications*, 2007: 3965–3971.

WANG A., CHO S., SODINI C., CHANDRAKASAN A. “Energy efficient modulation and mac for asymmetric rf microsensor systems.” *ACM - International symposium on Low power electronics and design*, 2001: 106–111.

WHITEHOUSE, C. D. “The Design of Calamari: an Ad-hoc Localization System for Sensor Networks. Dissertação (Mestrado).” University of California Berkeley, 2002.

WU, ZHIZHOU, HAO CHU, YUQI PAN, e XIAOGUANG YANG. “Bus Priority Control System Based on Wireless Sensor Network and Zigbee.” *IEEE International Vehicular Electronics and Safety, 2006. ICVES 2006.*, 2006: 148-151.

YAMAR, ELECTRONICS. *Benefits of power-line communication (PLC) multiplexing automotive network*. 2008. <http://www.yamar.com/benefits.html>.

8. Apêndice

8.1. Apêndice A - Publicações

No decorrer do período de elaboração desta dissertação de mestrado, foram apresentados os seguintes artigos em conferencias nacionais e internacionais, relatando alguns resultados parciais:

8.1.1. Publicações no ano 2007

- ROCA I.; Zuñiga J.C.; Kofuji Sergio Takeo. Modelagem de Dados e Sensores para aplicações em Intra-Vehicle Wireless Sensor Networks. I Workshop on Pervasive and Ubiquitous Computing - WPUC 2007. Gramado - Brazil. 2007.
- ROCA I.; Zuñiga J.C.; Kofuji Sergio Takeo. Sensor Modeling and Sensor Data for UnderWater Acoustic Sensor Networks (UW-ASN) Applications. The Second ACM International Workshop on UnderWater Networks (WUWNet). Montral - Canada. 2007.
- ROCA I.; Moraes F.; Kofuji Sergio Takeo. Aplicações das Redes de Sensores Sem Fio (Wireless Sensor Networks) em Engenharia Naval e Oceânica. XX COPINAVAL. São Paulo - Brazil. 2007.

8.1.2. Publicações no ano 2006

- ROCA I.; Cabrini Fábio H.; Kofuji Sergio Takeo. Monitoramento Ambiental de Salas Limpas através do uso de Redes de Sensores Sem Fio. IBERSENSOR, Montevideo, Uruguai, Setembro 2006.
- CABRINI Fábio H.; Roca I.; Kofuji Sergio Takeo. Monitoramento da Temperatura Utilizando Redes de Sensores Sem Fio em Ambientes Controlados. 3er CONTECSI, pagina 32, São Paulo, Brasil, Maio 2006.

8.2. Apêndice B - Código fonte dos aplicativos

8.2.1. SBT80app

8.2.1.1. *MobileNode.nc*

```

includes SBT80Msg;
includes SBT80ADCmap;

configuration MobileNode { }
implementation
{
  components Main, MobileNodeM
    , TimerC
    , LedsC
    , GenericComm as Comm
    , ADCC
    , MSP430GeneralIOC ;

  Main.StdControl -> MobileNodeM;
  Main.StdControl -> TimerC;
  Main.StdControl -> ADCC;

  MobileNodeM.SampleTimer      -> TimerC.Timer[unique("Timer")];
  MobileNodeM.SwitchTimer      -> TimerC.Timer[unique("Timer")];
  MobileNodeM.Leds              -> LedsC;

  MobileNodeM.RadioControl      -> Comm;
  MobileNodeM.RadioSend -> Comm.SendMsg[AM_SBT80MSG];

  MobileNodeM.ADCCControl -> ADCC.ADCCControl;
  MobileNodeM.VL -> ADCC.ADC[TOS_ADC_EXTERNAL_ADC0_PORT];
  MobileNodeM.MIC -> ADCC.ADC[TOS_ADC_EXTERNAL_ADC1_PORT];
  MobileNodeM.IR -> ADCC.ADC[TOS_ADC_EXTERNAL_ADC2_PORT];
  MobileNodeM.TEMP -> ADCC.ADC[TOS_ADC_EXTERNAL_ADC3_PORT];
  MobileNodeM.ACMGchX ->
  ADCC.ADC[TOS_ADC_EXTERNAL_ADC6_PORT];
  MobileNodeM.ACMGchY ->
  ADCC.ADC[TOS_ADC_EXTERNAL_ADC7_PORT];

  MobileNodeM.SBcontrol -> MSP430GeneralIOC.Port23;
  MobileNodeM.SBswitch -> MSP430GeneralIOC.Port26;

}

```

8.2.1.2. *MobileNodeM.nc*

```

includes SBT80Msg;

```

```

includes SBT80ADCmap;

module MobileNodeM
{
  provides {
    interface StdControl;
  }
  uses {
    interface Timer      as SampleTimer;
    interface Timer      as SwitchTimer;
    interface Leds;

    interface ADC as VL;
    interface ADC as MIC;
    interface ADC as IR;
    interface ADC as TEMP;
    interface ADC as ACMGchX;
    interface ADC as ACMGchY;

    interface MSP430GeneralIO      as SBcontrol;
    interface MSP430GeneralIO      as SBswitch;

    interface ADCControl;
    interface StdControl      as RadioControl;
    interface SendMsg         as RadioSend;
  }
}

implementation
{
  uint8_t currentMsg;
  uint16_t sampleTime;
  uint16_t sampledChannelNo;
  TOS_Msg msg[2];
  char  ACMGswitch;

  enum {AC,MG};

  command result_t StdControl.init() {
    call Leds.init();
    call Leds.yellowOff(); call Leds.redOff(); call Leds.greenOff();
    call RadioControl.init();

    call ADCControl.init();
    call ADCControl.bindPort(TOS_ADC_EXTERNAL_ADC0_PORT,
    TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC0_PORT);
    call ADCControl.bindPort(TOS_ADC_EXTERNAL_ADC1_PORT,
    TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC1_PORT);
  }
}

```

```

    call ADCControl.bindPort(TOS_ADC_EXTERNAL_ADC2_PORT,
TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC2_PORT);
    call ADCControl.bindPort(TOS_ADC_EXTERNAL_ADC3_PORT,
TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC3_PORT);
    call ADCControl.bindPort(TOS_ADC_EXTERNAL_ADC6_PORT,
TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC6_PORT);
    call ADCControl.bindPort(TOS_ADC_EXTERNAL_ADC7_PORT,
TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC7_PORT);

    atomic {
        currentMsg = 0;
        sampledChannelNo = 0;
        sampleTime = 0;
    }
    return SUCCESS;
}

command result_t StdControl.start() {
    call SampleTimer.start(TIMER_REPEAT,1000);
    call RadioControl.start();

    // Wake up the sensor board
    call SBcontrol.setLow();
    call SBcontrol.makeOutput();
    call SBcontrol.selectIOFunc();

    return SUCCESS;
}

command result_t StdControl.stop() {
    call SampleTimer.stop();
    call RadioControl.stop();
    return SUCCESS;
}

// ----- TASK : Send packet after all sensor data is gathered
task void dataTask() {
    struct SBT80Msg *pack;
    atomic {
        pack = (struct SBT80Msg *)msg[currentMsg].data;

        sampledChannelNo = 0;
        pack->timeStamp[5] = 0x00;
    }
    pack->sourceMoteID = TOS_LOCAL_ADDRESS;
    // Send packet
    if (call RadioSend.send(TOS_BCAST_ADDR, sizeof(struct SBT80Msg),
&msg[currentMsg]))
    {
        atomic {currentMsg ^= 0x1;}
    }
}

```

```

    call Leds.greenToggle();
}
}

// ----- TASK : Set the Switch for reading ACcel or MaGnetic sensors task
void switchTask() {
if (ACMGswitch == MG)    {call SBswitch.setHigh();} // High = Magnetic
else                    {call SBswitch.setLow();}  // Low = Accel

    call SBswitch.makeOutput();
    call SBswitch.selectIOFunc();
}

// ----- EVENT: SampleTimer fired
event result_t SampleTimer.fired() {
result_t ok1;

ACMGswitch = AC;
post switchTask();

call Leds.redOn();
ok1 = call VL.getData();
return ok1;
}

// ----- EVENT: VL data ready - Read MIC data
async event result_t VL.dataReady(uint16_t data) {
struct SBT80Msg *pack;
atomic {
pack = (struct SBT80Msg *)msg[currentMsg].data;
pack->data[sampledChannelNo++] = data;
}
call MIC.getData();
return SUCCESS;
}

// ----- EVENT: MIC data ready - Read IR data
async event result_t MIC.dataReady(uint16_t data) {
struct SBT80Msg *pack;
atomic {
pack = (struct SBT80Msg *)msg[currentMsg].data;
pack->data[sampledChannelNo++] = data;
}
call IR.getData();
return SUCCESS;
}

// ----- EVENT: IR data ready - Read TEMP data
async event result_t IR.dataReady(uint16_t data) {
struct SBT80Msg *pack;

```



```

atomic {
pack = (struct SBT80Msg *)msg[currentMsg].data;
pack->data[sampledChannelNo++] = data;
}
call TEMP.getData();
return SUCCESS;
}

// ----- EVENT: Read ACcel channel X data over ADC6
async event result_t TEMP.dataReady(uint16_t data) {
struct SBT80Msg *pack;
atomic {
pack = (struct SBT80Msg *)msg[currentMsg].data;
pack->data[sampledChannelNo++] = data;
}

call ACMGchX.getData();
return SUCCESS;
}

// ----- EVENT: ACMGchX data ready
async event result_t ACMGchX.dataReady(uint16_t data) {
struct SBT80Msg *pack;
atomic {
pack = (struct SBT80Msg *)msg[currentMsg].data;
pack->data[sampledChannelNo++] = data;
}

call ACMGchY.getData();
return SUCCESS;
}

// ----- EVENT: ACMGchY data ready
async event result_t ACMGchY.dataReady(uint16_t data) {
struct SBT80Msg *pack;
atomic {
pack = (struct SBT80Msg *)msg[currentMsg].data;
pack->data[sampledChannelNo++] = data;
}

if (ACMGswitch == AC){ //call chX getdata again only when ACMGswitch
== AC
ACMGswitch = MG;
post switchTask();
call SwitchTimer.start(TIMER_ONE_SHOT,20);
}
else{
call Leds.redOff();
post dataTask();
}
}

```

```

return SUCCESS;
}

// ----- EVENT: SwitchTimer fired
event result_t SwitchTimer.fired() {
call ACMGchX.getData();
return SUCCESS;
}

// ----- EVENT: Packet Tx Done
event result_t RadioSend.sendDone(TOS_MsgPtr sent, result_t success) {
return SUCCESS;
}
}

```

8.2.1.3. **SBT80Msg.h**

```

enum {
BUFFER_SIZE = 8
};

struct SBT80Msg
{
uint16_t    sourceMotelID;
uint8_t     timeStamp[5];
uint16_t    data[BUFFER_SIZE];
};
enum {
AM_SBT80MSG = 10,
};

```

8.2.1.4. **SBT80ADCmap.h**

```

#ifndef ADC_EXTERNAL_H
#define ADC_EXTERNAL_H

enum
{
TOS_ADC_EXTERNAL_ADC0_PORT = unique("ADCPort"),
TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC0_PORT =
ASSOCIATE_ADC_CHANNEL(
INPUT_CHANNEL_A0,
REFERENCE_VREFplus_AVss,
REFVOLT_LEVEL_2_5),

TOS_ADC_EXTERNAL_ADC1_PORT = unique("ADCPort"),
TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC1_PORT =
ASSOCIATE_ADC_CHANNEL(

```

```

INPUT_CHANNEL_A1,
REFERENCE_VREFplus_AVss,
REFVOLT_LEVEL_2_5),

TOS_ADC_EXTERNAL_ADC2_PORT = unique("ADCPort"),
TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC2_PORT =
ASSOCIATE_ADC_CHANNEL(
INPUT_CHANNEL_A2,
REFERENCE_VREFplus_AVss,
REFVOLT_LEVEL_2_5),

TOS_ADC_EXTERNAL_ADC3_PORT = unique("ADCPort"),
TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC3_PORT =
ASSOCIATE_ADC_CHANNEL(
INPUT_CHANNEL_A3,
REFERENCE_VREFplus_AVss,
REFVOLT_LEVEL_2_5),

TOS_ADC_EXTERNAL_ADC6_PORT = unique("ADCPort"),
TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC6_PORT =
ASSOCIATE_ADC_CHANNEL(
INPUT_CHANNEL_A6,
REFERENCE_VREFplus_AVss,
REFVOLT_LEVEL_2_5),

TOS_ADC_EXTERNAL_ADC7_PORT = unique("ADCPort"),
TOSH_ACTUAL_ADC_EXTERNAL_ADC7_PORT =
ASSOCIATE_ADC_CHANNEL(
INPUT_CHANNEL_A7,
REFERENCE_VREFplus_AVss,
REFVOLT_LEVEL_2_5),
};
#endif

```

8.2.2. Pong

8.2.2.1. *PongC.nc*

```

includes PongMsg;

configuration PongC
{
}
implementation
{
  components Main
  , PongM

```

```

, TimerC
, GenericComm
, LedsC
;
Main.StdControl -> GenericComm;
Main.StdControl -> TimerC;
Main.StdControl -> PongM;

PongM.Timer -> TimerC.Timer[unique("Timer")];
PongM.SendMsg -> GenericComm.SendMsg[AM_PONGMSG];
PongM.ReceiveMsg -> GenericComm.ReceiveMsg[AM_PONGMSG];
PongM.PingMsg -> GenericComm.ReceiveMsg[AM_PINGMSG];
PongM.Leds -> LedsC.Leds;
}

```

8.2.2.2. ***PongM.nc***

```

includes PongMsg;
includes Timer;

module PongM
{
  provides interface StdControl;
  uses interface Timer;
  uses interface SendMsg;
  uses interface ReceiveMsg;
  uses interface ReceiveMsg as PingMsg;
  uses interface Leds;
}
implementation
{
  TOS_Msg m_msg;
  TOS_MsgPtr p_msg;
  PongMsg_t* pongmsg;
  int m_int;
  bool m_sending;
  command result_t StdControl.init()
  {
    m_int = 0;
    m_sending = FALSE;
    pongmsg = (PongMsg_t*)m_msg.data;
    p_msg = &m_msg;
    call Leds.init();
    return SUCCESS;
  }

  command result_t StdControl.start()
  {
    if (TOS_LOCAL_ADDRESS == 1) {
      call Timer.start(TIMER_REPEAT, 50);
    }
  }
}

```

```

}
return SUCCESS;
}

command result_t StdControl.stop()
{
return SUCCESS;
}

event result_t Timer.fired()
{
call Leds.redToggle();
pongmsg->src = TOS_LOCAL_ADDRESS;
if (call SendMsg.send(TOS_BCAST_ADDR, sizeof(PongMsg_t), p_msg)) {
}

return SUCCESS;
}

event result_t SendMsg.sendDone( TOS_MsgPtr msg, result_t success )
{
return SUCCESS;
}

event TOS_MsgPtr ReceiveMsg.receive( TOS_MsgPtr msg )
{
PongMsg_t* _pongmsg;
call Leds.greenToggle();
_pongmsg = (PongMsg_t*)msg->data;
if( _pongmsg->src != TOS_LOCAL_ADDRESS )
{
pongmsg->src = _pongmsg->src;
pongmsg->src_rssi = msg->strength;
pongmsg->src_lqi = msg->lqi;
pongmsg->dest = TOS_LOCAL_ADDRESS;
call SendMsg.send(_pongmsg->src, sizeof(PongMsg_t), p_msg);
}
else {
call Leds.yellowToggle();
pongmsg->src = _pongmsg->src;
pongmsg->src_rssi = _pongmsg->src_rssi;
pongmsg->src_lqi = _pongmsg->src_lqi;
pongmsg->dest = _pongmsg->dest;
pongmsg->dest_rssi = msg->strength;
pongmsg->dest_lqi = msg->lqi;
call SendMsg.send(TOS_UART_ADDR, sizeof(PongMsg_t), p_msg);
}
return msg;
}

```

```

event TOS_MsgPtr PingMsg.receive( TOS_MsgPtr msg )
{
    PingMsg_t* pingmsg = (PingMsg_t*)(msg->data);
    if (pingmsg->src == TOS_UART_ADDR) {
        call Leds.redToggle();
        pongmsg->src = TOS_LOCAL_ADDRESS;
        if (call SendMsg.send(TOS_BCAST_ADDR, sizeof(PongMsg_t), p_msg)) {
            call Leds.greenToggle();
        }
    }
    return msg;
}

```

8.2.2.3. ***PongMsg.h***

```

enum
{
    AM_PINGMSG = 7,
    AM_PONGMSG = 8,
};

typedef struct PongMsg
{
    uint16_t src;
    uint8_t src_rssi;
    uint8_t src_lqi;
    uint16_t dest;
    uint8_t dest_rssi;
    uint8_t dest_lqi;
} PongMsg_t;

typedef struct PingMsg
{
    uint16_t src;}

```

8.3. Apêndice C - Programa do LabView 8.0

8.3.1. Diagrama dos módulos em LabView

8.3.2. Diagrama hierárquico em LabView