



**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Departamento de Telemática**

PROPOSTAS E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE ERROS PARA REDES DE SENSORES SEM FIO

Autor: João Henrique Kleinschmidt

Orientador: Prof. Dr. Walter da Cunha Borelli

CAMPINAS

2008

JOÃO HENRIQUE KLEINSCHMIDT

**PROPOSTAS E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE
CONTROLE DE ERROS PARA REDES DE
SENSORES SEM FIO**

Tese apresentada a Faculdade de Engenharia Elétrica
e de Computação da Universidade Estadual de
Campinas como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Walter da Cunha Borelli

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Walter da Cunha Borelli – DT – FEEC – UNICAMP

Prof. Dr. Carlos Eduardo Câmara – Universidade São Francisco

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz – PPGIA – PUC-PR

Prof. Dr. Celso de Almeida – DECOM – FEEC – UNICAMP

Prof. Dr. Jaime Portugheis – DECOM – FEEC – UNICAMP

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

K674p Kleinschmidt, João Henrique
Propostas e análise de estratégias de controle de erros
para redes de sensores sem fio / João Henrique
Kleinschmidt. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Walter da Cunha Borelli.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Telecomunicações. 2. Redes de computação -
Protocolos. 3. Código de controle de erros (Teoria da
informação). I. Borelli, Walter da Cunha. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Titulo em Inglês: Proposals and analysis of error control strategies for wireless
sensor networks

Palavras-chave em Inglês: Telecommunications, Computer network protocols,
Error-correcting codes (Information theory)

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Carlos Eduardo Câmara, Marcelo Eduardo Pellenz, Celso de
Almeida, Jaime Portugheis

Data da defesa: 14/11/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

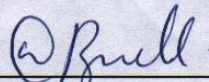
COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: João Henrique Kleinschmidt

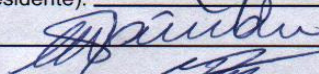
Data da Defesa: 14 de novembro de 2008

Título da Tese: "Propostas e Análise de Estratégias de Controle de Erros para Redes de Sensores sem Fio"

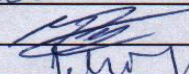
Prof. Dr. Walter da Cunha Borelli (Presidente):



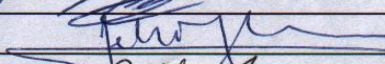
Prof. Dr. Carlos Eduardo Câmara:



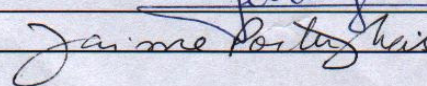
Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz:



Prof. Dr. Celso de Almeida:



Prof. Dr. Jaime Portugheis:



Agradecimentos

Farei aqui alguns agradecimentos a pessoas e afins que me acompanharam nestes anos do doutorado.

Aos meus pais, Edino e Vilma, e minha irmã, Ana Cristina, por estarem sempre ao meu lado.

Aos amigos e amigas rio-mafrenses e curitibanos.

Ao orientador Walter da Cunha Borelli, pela oportunidade. E pelas conversas, risadas, xingamentos (hehe), etc.

Ao ex-orientador Marcelo Pellenz por ter me encaminhado na pesquisa.

Ao Prof. Jaime Portugheis por ter me recebido na Unicamp.

Aos membros da banca examinadora pelos comentários e sugestões.

Aos amigos que fiz logo que cheguei em Campinas: Giuliano (Meninão), Góis (Tio Góis), João Coelho (Qualirão), Vágner (Qualirinha) e Vandenberg. Cuidado menino!!!

As amigas Andréa e Luzinete, que me proporcionaram novas oportunidades de pesquisa.

Aos amigos do DT, que sempre propiciaram um excelente ambiente de trabalho (e diversão): Taís, Sandro (Gaúcho), Fábio Hernandez, Ricardo (Pankeids), Ricardo (Ceará), Daniel (Mineirinho), Talía, Polyane, Clarice, Walter, Edgar, Renato, Júlio (Valderrama) e Edílson. Ao pessoal de outros departamentos da FEEC: Hugo Valadares, Hugo Ayres, Igor, Eiti, Carlos e Guilherme (amigo desde a graduação). Aos demais colegas do DT e da FEEC.

Ao pessoal do futebol e basquete, obrigado por aguentarem minha falta de habilidade. Se eu jogasse bem não tinha feito doutorado!

A todos que nestes anos fizeram um almoço, jantar ou apenas um bolo, meu estômago sinceramente agradece.

Algumas coisas da tese foram feitas escutando Dream Theater, Angra, Grieg, entre outros. De alguma maneira deve ter ajudado...

À CAPES pelo apoio financeiro.

Sumário

Agradecimentos	vii
Sumário	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Lista de Abreviaturas	xix
Resumo	xxi
Abstract	xxiii

Capítulo 1

Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Contribuições.....	4
1.3 Organização.....	5

Capítulo 2

Tecnologias e Controle de Erros para Redes de Sensores sem Fio	7
2.1 Comunicação digital.....	8
2.1.1 Modulação digital.....	8
2.1.2 Controle de erros.....	10
2.2 Tecnologias para redes ad hoc e de sensores.....	11
2.2.1 IEEE 802.15.1 – Bluetooth.....	14

2.2.2 IEEE 802.15.3 - UWB.....	14
2.2.3 IEEE 802.15.4 – ZigBee.....	15
2.3 Controle de erros para redes ad hoc e redes de sensores.....	16
2.4 Conclusão.....	21

Capítulo 3

Modelo de Eficiência de Energia para Estratégias de Controle de Erros	23
3.1 Controle de erros.....	24
3.2 Modelo analítico.....	27
3.2.1 Cálculo da probabilidade de erro de pacote.....	27
3.2.2 Cálculo da eficiência de energia.....	30
3.3 Resultados analíticos.....	33
3.4 Modelo de simulação.....	38
3.5 Conclusão.....	41

Capítulo 4

Esquemas de Controle de Erros para Redes IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4	43
4.1 Estratégias de controle de erros para redes de sensores Bluetooth.....	43
4.1.1 Controle de erros da especificação Bluetooth.....	43
4.1.2 Controle de erros personalizado.....	44
4.1.3 Controle de erros adaptativo.....	46
4.1.4 Modelo analítico.....	47
4.1.5 Resultados analíticos.....	51
4.1.6 Modelo de simulação.....	55
4.1.7 Resultados para diferentes condições de canal.....	57
4.1.8 Seleção adaptativa de pacotes usando informação de estado de canal.....	58
4.2 Estratégias de controle de erros para redes de sensores IEEE 802.15.4	63
4.2.1 Controle de erros do padrão IEEE 802.15.4.....	63
4.2.2 Modelo analítico.....	65
4.2.3 Resultados.....	67

4.3 Conclusão.....	72
--------------------	----

Capítulo 5

Controle de Erros usando Valor de Informação de Mensagens 73

5.1 Valor de informação.....	74
5.2 Controle de erros adaptativo usando valor de informação.....	77
5.3 Resultados para valor de informação baseado em área.....	79
5.4 Resultados para valor de informação baseado em entropia.....	83
5.5 Conclusão.....	86

Capítulo 6

Conclusão 87

6.1 Considerações finais.....	87
6.2 Trabalhos futuros.....	89
6.3 Publicações.....	89

Referências Bibliográficas 91

Lista de Figuras

Figura 2.1	Exemplo de uma rede de sensores sem fio.....	12
Figura 3.1	Rede de sensores com múltiplos saltos	25
Figura 3.2	Formato do pacote da camada de enlace.....	27
Figura 3.3	Probabilidade de erro de pacote sem codificação, 32 bytes, 1 salto.....	34
Figura 3.4	Probabilidade de erro de pacote com FEC, 32 bytes, 1 salto.....	34
Figura 3.5	Eficiência de energia para 15 saltos, 32 bytes.....	36
Figura 3.6	Eficiência de energia para 2 saltos, 32 bytes, modulação OQPSK.....	36
Figura 3.7	Eficiência de energia para 2 saltos, 32 bytes, modulação GFSK.....	37
Figura 3.8	Eficiência de energia para 15 saltos, 256 bytes, modulação OQPSK.....	37
Figura 3.9	Eficiência de energia para 15 saltos, 256 bytes, modulação GFSK.....	37
Figura 3.10	Transmissão de pacotes.....	39
Figura 3.11	Recepção de pacotes.....	40
Figura 3.12	Comparação de eficiência de energia para modelo analítico e de simulação.	40
Figura 4.1	Estrutura de um pacote Bluetooth.....	44
Figura 4.2	Eficiência de energia para 1 salto.....	52
Figura 4.3	Eficiência de energia para 2 saltos.....	52
Figura 4.4	Eficiência de energia para 10 saltos.....	53
Figura 4.5	Eficiência de energia para 25 saltos.....	53
Figura 4.6	Eficiência de energia para 30 dB.....	54
Figura 4.7	Eficiência de energia para 20 dB.....	54
Figura 4.8	Eficiência de energia para 10 dB.....	55
Figura 4.9	Rota de uma rede de sensores com 15 saltos.....	55
Figura 4.10	Eficiência de energia para os modelos analítico e de simulação do	

	Bluetooth.....	57
Figura 4.11	Eficiência de energia para $m_1=m_2=m_3=0,5$	58
Figura 4.12	Eficiência de energia para $m_1=m_2=m_3=1,5$	58
Figura 4.13	Eficiência de energia para $m_1=0,5$, $m_2=0,5$ e $m_3=1,5$	60
Figura 4.14	Eficiência de energia para $m_1=1,5$, $m_2=1,5$ e $m_3=0,5$	61
Figura 4.15	Eficiência de energia para $SNR_1=20$, $SNR_2=30$ e $SNR_3=40$ dB.....	62
Figura 4.16	Eficiência de energia para $SNR_1=30$, $SNR_2=10$ e $SNR_3=20$ dB.....	62
Figura 4.17	Eficiência de energia para diferentes cenários de rede.....	63
Figura 4.18	Estrutura de um pacote IEEE 802.15.4.....	64
Figura 4.19	Eficiência de energia para 1 salto, 32 bytes.....	68
Figura 4.20	Eficiência de energia para 5 saltos, 32 bytes.....	68
Figura 4.21	Eficiência de energia para 25 saltos, 32 bytes.....	68
Figura 4.22	Eficiência de energia para 1 salto, 64 bytes.....	70
Figura 4.23	Eficiência de energia para 5 saltos, 64 bytes.....	70
Figura 4.24	Eficiência de energia para 25 saltos, 64 bytes.....	70
Figura 4.25	Eficiência de energia para 30 dB.....	71
Figura 4.26	Eficiência de energia para 20 dB.....	71
Figura 4.27	Eficiência de energia para 10 dB.....	71
Figura 5.1	Rede com sensores distribuídos de forma desigual.....	75
Figura 5.2	Vazão de esquemas BCH para $V \geq 2$	80
Figura 5.3	Vazão de estratégias ARQ para $V \geq 2$	80
Figura 5.4	Energia consumida de esquemas BCH.....	81
Figura 5.5	Energia consumida de estratégias ARQ.....	82
Figura 5.6	Vazão de esquemas BCH para $V \leq 1$	82
Figura 5.7	Vazão de estratégias ARQ para $V \leq 1$	82
Figura 5.8	Vazão de códigos BCH para $V > 0,5$	84
Figura 5.9	Energia consumida para códigos BCH.....	84
Figura 5.10	Vazão de estratégias ARQ para $V > 0,5$	85
Figura 5.11	Energia consumida para estratégias ARQ.....	85

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Comparação entre IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4.....	16
Tabela 3.1	Tipos de pacotes.....	26
Tabela 3.2	Cálculo da energia consumida.....	33
Tabela 4.1	Tipos de pacotes assíncronos.....	44
Tabela 4.2	Tipos de pacotes com controle de erros personalizado.....	46
Tabela 4.3	Esquemas adaptativos.....	47
Tabela 4.4	Esquema de seleção de pacotes adaptativo.....	59
Tabela 4.5	Cenários de rede.....	62
Tabela 4.6	Tipos de pacotes para o IEEE 802.15.4.....	65
Tabela 5.1	Controle de erros adaptativo para V baseado em área.....	78
Tabela 5.2	Controle de erros adaptativo para V baseado em entropia.....	79
Tabela 5.3	Comparação entre esquemas adaptativos.....	86

Lista de Símbolos

A	área coberta pelos sensores
b	tamanho do payload de um pacote em bits
B	número de blocos de 10 bits que entram no codificador
c	número de bits do cabeçalho de um pacote
C	vazão normalizada
d	número de bits de dados de um pacote
d_{min}	distância mínima do código
d_s	densidade espacial
E	energia consumida total
E_{DEC}	energia consumida na decodificação
E_{min}	energia mínima consumida
$f(\gamma)$	função de densidade de probabilidade
F_o	faixa de operação
H	número total de saltos
i	índice de modulação
I	quantidade de informação
l_{min}	valor mínimo de uma grandeza
l_{max}	valor máximo de uma grandeza
m	parâmetro de desvanecimento de Nakagami
n_{ack}	número total de bits do pacote de retorno
n_{bits}	número total de bits de um pacote
n_{error}	número de pacotes recebidos com erro no coletor
n_{pac}	número total de pacotes transmitidos

n_r	número de retransmissões
n_s	número de sensores numa determinada área
N	número total de vezes que um pacote é transmitido
$P[.]$	probabilidade de ocorrência do evento
P_{arq}	probabilidade de um pacote com ARQ ser recebido corretamente no coletor
P_{narq}	probabilidade de um pacote sem ARQ ser recebido corretamente no coletor
$p_H[h]$	probabilidade de um pacote atingir h saltos
$p_N[n_r]$	probabilidade de um pacote ser transmitido n_r vezes
$p(\gamma)$	probabilidade de erro de bit
PER_f	taxa de erro de pacote no canal direto
PER_r	taxa de erro de pacote no canal reverso
R	taxa do código
t	número de erros corrigíveis pelo código
t_r	número de bits do trailer de um pacote
T	limiar de sincronização
V	valor de informação
X_k	valor da k -ésima medida de uma grandeza
γ_f	relação sinal-ruído instantânea do canal direto
γ_r	relação sinal-ruído instantânea do canal reverso
$\bar{\gamma}$	relação sinal-ruído média recebida
Δ	variação entre medidas X_k e X_{k-1}
η	eficiência de energia
p	correlação dos sinais

Lista de Abreviaturas

ACK	<i>Acknowledge</i>
ADP1	<i>Esquema adaptativo 1</i>
ADP2	<i>Esquema adaptativo 2</i>
ADPC	<i>Esquema adaptativo baseado em canal</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BCH	<i>Bose-Chaudhuri-Hocquenghem</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSMA-CA	<i>Carrier-Sense Medium Access with Collision Avoidance</i>
DMx	<i>Data Medium-rate</i>
DHx	<i>Data High-rate</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
HEC	<i>Header Error Check</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>

ISM	<i>Industrial-Scientific-Medical</i>
LDPC	<i>Low-Density Parity-Check</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MIT	<i>Multiple Input Turbo</i>
NACK	<i>Negative Acknowledge</i>
OQPSK	<i>Offset Quadrature Phase Shift Keying</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PSDU	<i>PHY Service Data Unit</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Qualidade de Serviço</i>
SEC/DED	<i>Single Error Correction/Double Error Detection</i>
SHAS	<i>Single Hop Asymmetric Structure</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDD	<i>Time-Division Duplex</i>
UWB	<i>Ultra-WideBand</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>

Resumo

As redes ad hoc sem fio não necessitam de infra-estrutura fixa e utilizam ondas de rádio para transmissão de dados. Uma rede de sensores sem fio é um tipo especial de rede ad hoc composta por dispositivos sensores de baixo custo e baixa potência. Estas características fazem com que as redes ad hoc e de sensores tenham limitações de energia. Além disso, as informações transmitidas no canal sem fio têm taxas de erro altas. Para melhorar a confiabilidade dos dados enviados no canal sem fio, técnicas como retransmissão ou códigos corretores de erros podem ser usadas. Esta tese analisa e propõe diferentes estratégias de controle de erros para redes de sensores sem fio. São apresentados modelos analíticos e de simulação de técnicas de controle de erros para consumo eficiente de energia em redes de sensores. Estes modelos são adaptados aos padrões IEEE 802.15.1 (Bluetooth) e IEEE 802.15.4 (ZigBee) e são propostos novos esquemas de correção de erros personalizados e adaptativos para estes padrões. Também são propostas estratégias de controle de erros adaptativas usando valor de informação de mensagens baseadas na área de cobertura e entropia. Os resultados são obtidos para diferentes cenários de redes, condições de canal e número de saltos. A escolha do melhor esquema de controle de erros depende da qualidade do canal e da aplicação considerada.

Palavras-Chave: redes ad hoc, redes de sensores, controle de erros, eficiência de energia, Bluetooth, ZigBee.

Abstract

Wireless ad hoc networks do not necessitate fixed infrastructure and use radio waves for data transmission. A wireless sensor network is a kind of ad hoc network formed by low cost and low power sensor devices. These characteristics made ad hoc and sensor networks very energy limited. Besides, the information transmitted in the wireless channel has high error rates. In order to improve the reliability of the data sent in the channel, techniques such as retransmission and error correcting codes can be applied. This thesis analyzes and proposes different error control strategies for wireless sensor networks. It is presented an analytical and a simulation model of error control techniques for energy consumption and energy efficiency. These models are adapted to the IEEE 802.15.1 (Bluetooth) and IEEE 802.15.4 (ZigBee) standards and novel custom and adaptive error control schemes are proposed. This work also proposes adaptive error control strategies using messages informational value based on coverage area and entropy. The results are obtained for different network scenarios, channel conditions and number of hops. The choice of the best error control scheme depends on the channel quality and the application.

Keywords: ad hoc networks, sensor networks, error control, energy efficiency, Bluetooth, ZigBee.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Uma rede de computadores é formada por um conjunto de dispositivos capazes de trocar informações e compartilhar recursos, interligados por um sistema de comunicação. Nas redes com fio o meio de transmissão utilizado é constituído de cabos, como fibra ótica, cabos coaxiais ou de par trançado. Em redes sem fio, o meio físico de transmissão é o ar, usando ondas de rádio ou luz infravermelha. As redes sem fio podem ser divididas em redes infra-estruturadas e ad hoc.

Nas redes infra-estruturadas existe pelo menos um equipamento fixo, chamado de ponto de acesso ou estação base. Qualquer comunicação entre os nós móveis será intermediada pelo ponto de acesso. Quando uma estação móvel precisa enviar alguma informação para outra estação móvel, os dados são transmitidos a um ponto de acesso que irá reenviar os dados para a estação de destino. O principal exemplo de redes móveis sem fio infra-estruturadas são as redes de telefonia celular. Já em uma rede ad hoc todos os nós móveis são capazes de se comunicar diretamente entre si, sem a necessidade de pontos de acesso para suporte à mobilidade. Como os nós podem se mover arbitrariamente, a topologia da rede muda freqüentemente e de forma imprevisível.

Os avanços nas comunicações sem fio e principalmente na eletrônica digital têm permitido o desenvolvimento de dispositivos cada vez mais baratos, como laptops, telefones celulares, dispositivos de armazenamento portátil, aparelhos de MP3 e sensores, entre outros.

Todos estes dispositivos tem limitações de energia, fazendo necessário o uso de técnicas que economizem energia. No entanto, se em um telefone celular a bateria deve durar alguns dias e depois pode ser facilmente recarregada, há situações mais críticas, como a dos sensores. Estes dispositivos, que possuem componentes para sensoriamento, processamento de dados e comunicação, formam um tipo especial de redes ad hoc, as redes de sensores sem fio [ASSC02]. Uma das principais questões nestas redes é a conservação de energia, pois geralmente a substituição de baterias não é possível e uma rede deve operar por meses ou até anos. Algumas aplicações destas redes são: o monitoramento ambiental em locais como florestas e oceanos, monitoramento de teste de qualidade de produtos em um ambiente industrial, aplicações militares, entre outras. Os protocolos e algoritmos destas redes (formação, roteamento, gerenciamento, entre outros) devem ter capacidade de auto-organização, ou seja, a rede deve ser configurada automaticamente, sem a necessidade de intervenção humana.

Muitos trabalhos sobre conservação de energia em redes ad hoc e redes de sensores consideram os protocolos de roteamento e de acesso ao meio (MAC – do inglês: *Medium Access Control*) [ZR04]. O protocolo MAC é responsável pela criação da infra-estrutura da rede e pelo compartilhamento dos recursos de comunicação entre os nós. Modos de economia de energia, como o modo *sleep*, ajudam a reduzir o tempo em que um nó escuta o canal, que é uma das tarefas que mais consome energia. Várias tecnologias existentes vêm sendo testadas em redes de sensores e outras são desenvolvidas especificamente para este fim. As principais tecnologias para este cenário são os padrões IEEE 802.15 para redes pessoais sem fio, ou WPANs (do inglês: *Wireless Personal Area Networks*). A especificação Bluetooth [Blu01, Blu03] e o padrão ZigBee [Zig05] definem as camadas de rede superiores que não são definidas pelos padrões IEEE 802.15.1 [IEE02] e IEEE 802.15.4 [IEE03b], respectivamente.

Os protocolos de roteamento devem ser projetados para evitar rotas que tenham transmissões que consomem muita energia e também determinados nós em posições estratégicas e que podem ficar sobrecarregados, comprometendo a conectividade da rede. Outras áreas importantes na redução do consumo de energia são os protocolos de transporte [WDS06], bem como o projeto da unidade de processamento e circuitos. Tópicos que têm recebido menos atenção são os relacionados à teoria das comunicações e codificação [ZR04].

As redes ad hoc sem fio utilizam ondas de rádio para transmissão de informação. Ao contrário dos canais com cabos que são estacionários e relativamente previsíveis, os canais de rádio são extremamente aleatórios, limitando o desempenho de sistemas de comunicação sem fio e dificultando sua análise [Rap99]. O transmissor e o receptor podem estar próximos, com linha de visada, ou estarem obstruídos por paredes, construções, árvores ou outros objetos. Os canais sem fio podem ter taxas de erro altas devido à interferência e ao desvanecimento gerado pelo multipercurso, levando ao desperdício de energia. Para melhorar a confiabilidade dos dados enviados no canal sem fio, técnicas como retransmissão ARQ (do inglês: *Automatic Repeat Request*) ou correção de erros FEC (do inglês: *Forward Error Correction*) podem ser usadas [LMZG97].

As técnicas FEC usam códigos corretores de erros que adicionam redundância (bits de paridade) para corrigir erros de bits. O receptor usa os bits de paridade para detectar e corrigir erros. Essas técnicas acrescentam um *overhead* desnecessário que aumenta o consumo de energia quando o canal está relativamente sem erros. Por isso, a implementação de códigos corretores de erros em dispositivos limitados em energia deve ser feita com cuidado, pois códigos de alta complexidade acrescentam muitos bits de paridade, aumentando o consumo de energia.

As técnicas ARQ possuem capacidade apenas de detecção de erros; o receptor solicita ao transmissor a retransmissão dos pacotes recebidos com erro. Geralmente um esquema ARQ usa códigos CRC (do inglês: *Cyclic Redundancy Check*) para detecção de erros. No receptor, o código CRC verifica o pacote. Se detectar erros, o nó solicita retransmissão enviando um NACK (do inglês: *negative acknowledgement*). Se a recepção for correta, uma confirmação ACK é enviada (do inglês: *positive acknowledgement*). Esquemas ARQ híbridos podem ser desenvolvidos usando a combinação de FEC e ARQ.

Estas técnicas podem ser aplicadas em redes ad hoc sem fio. Um esquema FEC pode ser implementado usando um código corretor de erro específico no pacote de dados. Em cada nó receptor da rede os dados são decodificados e alguns erros podem ser corrigidos, dependendo da capacidade do código. Então os dados são codificados novamente e enviados ao próximo nó, até atingir o nó de destino. Em um esquema ARQ cada nó deve enviar um pacote ao transmissor indicando se a transmissão foi realizada com sucesso ou não. O consumo de energia destas técnicas devido à transmissão de bits adicionais é muito importante. Embora um controle de erros

robusto possa corrigir muitos erros, a energia consumida pode ser muito grande para uma rede sem fio com limitações de energia. Usar a mesma estratégia de controle de erros para toda a rede em todas as transmissões geralmente não é a melhor opção, pois a qualidade do canal sem fio pode variar rapidamente. Esquemas adaptativos podem ser desenvolvidos para mudar o controle de erros dinamicamente.

Como diferentes dispositivos sem fio têm diferentes níveis de restrições de energia, pode-se esperar que diferentes códigos sejam selecionados [DF03]. Sistemas com potência suficiente para transmitir dados em longas distâncias em canais ruidosos podem facilmente acomodar códigos corretores de erros complexos. Em sistemas com mais restrições de energia apenas códigos de complexidade reduzida podem ser usados. Ou seja, há uma relação custo-benefício entre o uso de controle de erros e o consumo de energia em redes sem fio. Esta relação é diferente para os vários tipos de redes, como sistemas celulares, redes ad hoc e redes de sensores.

O objetivo da tese é analisar e propor diferentes técnicas de controle de erros para redes limitadas em energia, como as redes ad hoc, e especialmente, redes de sensores. Para isto, é fundamental estudar as principais tecnologias e protocolos para estas redes, modelos de consumo de energia e esquemas de controle de erros. Os resultados são obtidos através de modelos analíticos e de simulação.

1.2 Contribuições

Parte das análises e resultados apresentados na tese foram publicados em [KBP05], [KB06], [KBP06], [KB07a], [KB07b], [KBP07], [KBP08], [KB08a] e [KB08b]. As contribuições deste trabalho de pesquisa incluem modelos analítico e de simulação de estratégias de controle de erros FEC e ARQ para eficiência de energia em redes de sensores sem fio. O software Matlab® foi usado para os cálculos analíticos e implementação das simulações. Os códigos corretores de erros analisados são códigos de bloco Hamming e BCH. O canal sem fio é modelado com desvanecimento Rayleigh e Nakagami. Usando estes modelos foram obtidos resultados de eficiência de energia para as modulações FSK (do inglês: *Phase Shift Keying*), GFSK (do inglês: *Gaussian Frequency Shift Keying*) e OQPSK (do inglês: *Offset-Quadrature Phase Shift Keying*). Outra importante contribuição é a adaptação destes modelos para os padrões

IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4. Os esquemas de correção de erros usados nestes padrões são analisados e também são propostos novos esquemas de codificação personalizada (do inglês: *custom*) e controle de erros adaptativo para o padrão Bluetooth, usando informação de número de saltos e estado de canal. Para o IEEE 802.15.4 são analisadas as estratégias de retransmissão e são propostos esquemas de codificação personalizada. Os resultados são obtidos para diferentes condições de canal e número de saltos. Por fim, são analisadas técnicas de controle de erros para aumentar a vazão de pacotes que possuem alto valor de informação. Duas maneiras para medir o valor de informação são propostas: usando área de cobertura e entropia. A primeira abordagem considera mais importantes os pacotes enviados por nós de regiões cobertas por poucos sensores. A segunda abordagem calcula o valor de informação considerando o valor da grandeza física medida pelo sensor, sendo mais importantes os pacotes enviados por sensores que captam mudanças significativas no valor da grandeza física medida. Baseadas neste valor de informação são propostas estratégias de controle de erros adaptativas usando códigos BCH e ARQ.

1.3 Organização

A tese está estruturada em seis capítulos, organizados da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução: este capítulo, faz uma apresentação geral da tese.
- Capítulo 2 – Tecnologias e Controle de Erros para Redes sem Fio: descreve os principais conceitos necessários para o entendimento da tese. São abordadas as tecnologias para redes ad hoc e de sensores e controle de erros para redes sem fio limitadas em energia.
- Capítulo 3 – Modelo de Eficiência de Energia para Estratégias de Controle de Erros: apresenta uma modelagem analítica e de simulação para diferentes estratégias de controle de erros FEC e ARQ. São apresentados resultados para as modulações FSK, GFSK e OQPSK em canais com desvanecimento Rayleigh.
- Capítulo 4 – Esquemas de Controle de Erros para Redes IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4: faz uma análise e apresenta propostas de novos esquemas de controle de erros para estes padrões. Resultados analíticos e de simulação são apresentados.

- Capítulo 5 – Controle de Erros usando Valor de Informação de Mensagens: são discutidas diferentes abordagens para cálculo da importância de pacotes em redes de sensores e propostos controle de erros usando diferentes métricas para o valor de informação das mensagens. Os resultados desta seção são obtidos através de simulação.
- Capítulo 6 – Conclusão: são feitas as considerações finais sobre o trabalho e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Tecnologias e Controle de Erros para Redes de Sensores sem Fio

Este capítulo apresenta alguns conceitos importantes para o desenvolvimento da tese. A Seção 2.1 faz uma breve descrição de alguns tipos de modulação e controle de erros usados nos próximos capítulos. A Seção 2.2 apresenta as redes ad hoc e redes de sensores sem fio, bem como os principais padrões existentes para comunicação nestas redes. Na Seção 2.3 são descritos alguns trabalhos que utilizam técnicas FEC e ARQ para redes sem fio limitadas em energia. Este capítulo traz apenas uma visão geral do assunto. Para mais detalhes sobre redes ad hoc e de sensores, excelentes tutoriais são encontrados em [CA02], [LNRM03] e [ASSC02]. Para as tecnologias de redes ad hoc, a melhor fonte são as especificações de cada padrão [Blu01], [Blu03], [IEE02], [IEE03a], [IEE03b] e [Zig05]. Mais informações sobre estratégias FEC e ARQ podem ser encontradas em [Pro01] e [LC04] e aplicações dessas técnicas em redes sem fio em [LMZG97]. Para esquemas de controle de erros para redes sem fio limitadas em energia, consultar diretamente os artigos citados na Seção 2.3.

2.1 Comunicação digital

2.1.1 Modulação digital

Num sistema de transmissão de dados digital, com ou sem fio, é preciso utilizar alguma técnica para inserir as mensagens em um sinal de rádio frequência, chamado de onda portadora, que irá transportar as mensagens do transmissor ao receptor. Esta onda portadora, cujas propriedades são mais convenientes aos meios de transmissão, é modificada para representar a mensagem a ser enviada. A modulação é a alteração sistemática de uma onda portadora de acordo com a mensagem (sinal modulante). Estas formas de inserção das mensagens em um sinal são chamadas de modulação, e permite que esta informação seja transportada embutida nos parâmetros de amplitude, frequência ou fase da portadora. Nas modulações digitais, os bits do sinal de informação são codificados através de símbolos. A modulação é responsável por mapear cada possível sequência de bits de um comprimento fixo em um símbolo determinado. O conjunto de símbolos gerado por uma modulação é chamado de constelação, sendo que cada tipo de modulação gera uma constelação de símbolos diferentes. Os símbolos nos quais as sequências de bits de um sinal de informação são transformadas é que serão transmitidos pela onda portadora. Algumas das principais modulações digitais são descritas a seguir [Pro01], [Sk195].

ASK (do inglês: *Amplitude Shift Keying*) – É a técnica de modulação mais simples entre as utilizadas para modular sinais digitais. Consiste na alteração da amplitude da onda portadora em função do sinal digital a ser transmitido. A modulação em amplitude translada o espectro de frequência baixa do sinal binário, para uma frequência alta como é a da onda portadora. A amplitude da portadora é comutada entre dois valores.

PSK (do inglês: *Phase Shift Keying*) – O PSK é uma forma de modulação em que a informação do sinal digital é embutida nos parâmetros de fase da portadora. Neste sistema de modulação, quando há uma transição de um bit 0 para um bit 1 ou de um bit 1 para um bit 0, a onda portadora sofre uma alteração de fase de 180 graus. Esta forma de particular do PSK é chamada de BPSK (do inglês: *Binary Phase Shift Keying*). Quando não há nenhuma destas transições, ou seja, quando bits subsequentes são iguais, a portadora continua a ser transmitida com a mesma fase.

QPSK (do inglês: *Quadrature Phase Shift Keying*) – A modulação QPSK é uma técnica de modulação derivada do PSK, porém são utilizados parâmetros de fase e quadratura da onda portadora para modular o sinal de informação. Como são utilizados dois parâmetros, existem mais tipos possíveis de símbolos nesta constelação, o que permite que sejam transmitidos mais bits por símbolo.

OQPSK – É baseada na modulação QPSK e tem como objetivo a redução das transições de 180 graus na fase da portadora, limitando-as a um máximo de 90 graus. Isto permite obter uma eficiência, em termos de potência, superior à da modulação QPSK.

QAM (do inglês: *Quadrature Amplitude Modulation*) – Nesta forma de modulação, os símbolos são mapeados em um diagrama de fase e quadratura, sendo que cada símbolo apresenta uma distância específica da origem do diagrama que representa a sua amplitude, diferentemente da modulação PSK, na qual todos os símbolos estão a igual distância da origem. Isto significa que as informações são inseridas nos parâmetros de amplitude e quadratura da onda portadora.

FSK – A modulação FSK atribui frequências diferentes para a portadora em função do bit que é transmitido. Portanto, quando um bit 0 é transmitido, a portadora assume uma frequência correspondente a um bit 0 durante o período de duração de um bit. Quando um bit 1 é transmitido, a frequência da portadora é modificada para um valor correspondente a um bit 1 e analogamente, permanece nesta frequência durante o período de duração de 1 bit. Também podem-se utilizar 4 frequências de transmissão diferentes, cada uma delas correspondendo a 2 bits, chamado de 4FSK. Isto aumentaria a taxa de bits transmitidos, porém aumenta também a banda de frequência de transmissão utilizada.

GFSK – No GFSK os dados são codificados na forma de variações de frequência em uma portadora, de maneira similar à modulação FSK. Portanto, o modulador utilizado pode ser o mesmo da modulação FSK. Todavia, antes de os pulsos entrarem no modulador, eles passam por um filtro gaussiano, de modo a reduzir a largura espectral dos mesmos. O filtro gaussiano é uma espécie de formatador de pulso que serve para suavizar a transição entre os valores dos pulsos.

As modulações utilizadas na tese são FSK, GFSK e OQPSK, por serem bastante utilizadas para redes de sensores sem fio e nos padrões para WPANs.

2.1.2 Controle de erros

O controle de erros pode ser feito através de detecção de erros e retransmissão (ARQ) ou através de códigos corretores de erros (codificação de canal). FEC usa símbolos de redundância acrescentados aos símbolos de informação para permitir a detecção ou correção dos erros. O codificador de canal transforma a sequência de símbolos de informação em uma sequência de símbolos codificada chamada palavra código [LC04], [LMZG97].

Os códigos corretores de erros podem ser divididos em dois tipos principais: códigos de bloco e códigos convolucionais. Na tese são utilizados códigos de bloco binários para controle de erros, onde os símbolos possuem um único bit. Alguns dos principais códigos de bloco são: Hamming, BCH, Reed-Solomon e Golay. Em um código de bloco (n,k) , o codificador transforma um bloco contendo k bits de informação em uma palavra código contendo n bits, sendo portanto acrescentados $n-k$ bits de redundância (bits de paridade). A relação k/n é chamada de taxa do código. Na implementação de forma sistemática, os k bits de informação estão presentes de forma inalterada nos n bits da palavra código. Como há 2^k vetores de informação possíveis, haverá 2^k diferentes palavras-código. Um dos principais códigos de bloco linear é o código de Hamming, que pode detectar e corrigir todos os erros de 1 bit. Pode ainda detectar até dois erros de bit numa palavra código.

Uma sub-classe importante dos códigos de bloco são os códigos cíclicos. Um código de bloco linear (n,k) é chamado de código cíclico se cada deslocamento cíclico nos bits de uma palavra código gerar outra palavra código. Os códigos BCH formam uma grande classe de códigos de bloco cíclicos com grande capacidade de correção de erros aleatórios. Diversos algoritmos de decodificação para os códigos BCH foram propostos, sendo o algoritmo iterativo de Berlekamp-Massey e o algoritmo de busca de Chien os mais eficientes. Esta família de códigos é bastante utilizada e diversos códigos com diferentes capacidades de correção de erros são apresentados na literatura. Na tese é utilizada a notação BCH (n, k, t) , onde t indica a capacidade de correção do código. Um código com $t=10$ é capaz de corrigir até 10 erros em uma palavra código.

Os códigos CRC são os mais utilizados para detecção de erros em redes de dados com sistema ARQ, embora também tenham capacidade de correção de erros. Na técnica de correção

de erros por retransmissão (ARQ) utiliza-se um código para detecção de erros e solicita-se a retransmissão ao transmissor. Três protocolos básicos podem ser utilizados:

Protocolo *Stop-and-Wait*: o transmissor envia um bloco e interrompe a transmissão, à espera do reconhecimento do bloco. Se o reconhecimento é positivo, indicando que não houve erro detectável na transmissão, um novo bloco é enviado; se o reconhecimento é negativo, o bloco é retransmitido.

Protocolo *Go-Back-N*: o transmissor envia seus blocos de dados continuamente. Quando o receptor recebe um bloco errado, este envia uma mensagem de reconhecimento negativo indicando o número do bloco que continha erro (geralmente o receptor é obrigado a enviar um reconhecimento, mesmo que nenhum bloco tenha sido recebido com erro). Ao receber o reconhecimento negativo, o transmissor volta ao bloco que foi recebido com erro e retransmite todos os blocos a partir daquele.

Protocolo *Selective-Repeat*: Este protocolo é semelhante ao *Go-Back-N*. A diferença é que o transmissor reenvia apenas o bloco que foi detectado como errado (e não todos os blocos a partir do errado). Este protocolo obriga que o receptor reordene os blocos recebidos.

Na tese são utilizados códigos de bloco Hamming e BCH para correção de erros, CRC para detecção de erros e protocolo ARQ *Stop-and-Wait*.

2.2 Tecnologias para redes ad hoc e de sensores

As redes ad hoc são redes onde os dispositivos computacionais são capazes de trocar informações diretamente entre si ou através de múltiplos saltos sem a necessidade de uma infraestrutura de comunicação. Assim, estes dispositivos podem atuar como roteadores, dispositivos de comunicação terminal ou ainda ambos simultaneamente. Com essas características, as redes ad hoc são indicadas para situações onde não se pode ou não é adequado instalar uma rede infra-estruturada [CA02].

As redes de sensores sem fio são aplicações das redes ad hoc e podem ser usadas no monitoramento, rastreamento, coordenação e processamento em diferentes aplicações. A Figura 2.1 mostra um exemplo típico de uma rede de sensores, onde a informação é passada de um sensor a outro, até chegar ao nó concentrador, chamado de coletor. Este nó coletor é responsável

por recolher toda a informação dos sensores e enviá-la ao usuário final, possivelmente conectado à Internet. Cada nó da rede pode ser equipado com uma variedade de sensores, tais como de temperatura, sísmico, pressão, acústico, de imagem, entre outros. Entre as áreas que estas redes podem ser aplicadas está o monitoramento das condições ambientais numa floresta, oceano, deserto e vulcões ou ainda em locais internos como prédios e residências. Num ambiente industrial, sensores podem ser colocados numa linha de montagem para fazer testes no processo de manufatura. Os sensores podem ainda ser usados para monitorar tráfego de veículos em rodovias, prover segurança em centros comerciais e em aplicações médicas, como monitoramento de condições físicas de um paciente.

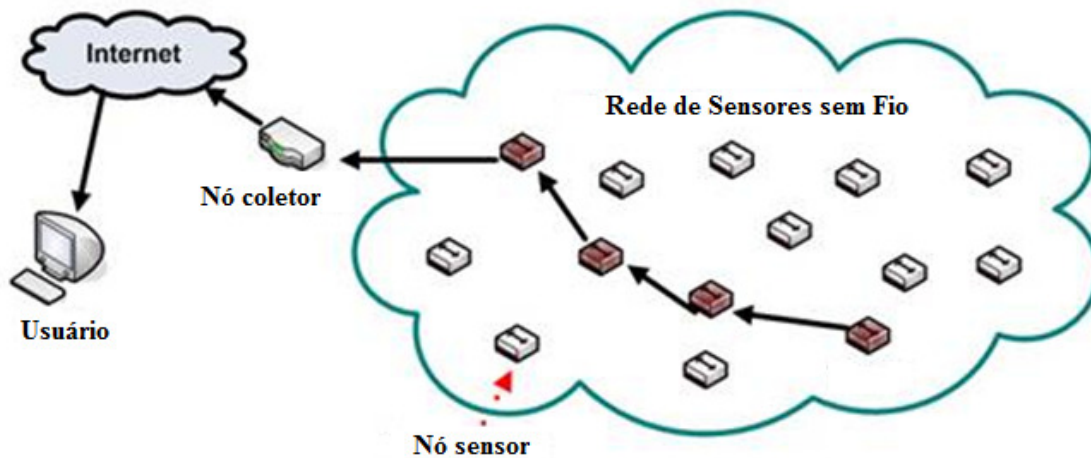


Figura 2.1: Exemplo de uma rede de sensores sem fio

Embora existam muitos protocolos e algoritmos para as redes ad hoc, eles não podem ser aplicados diretamente nas redes de sensores, pois estas apresentam algumas características únicas. Em geral, as redes de sensores diferem das redes ad hoc em alguns aspectos [ASSC02], [LNRM03]:

- o número de nós sensores pode ser muito grande, chegando até centenas ou milhares em casos de ampla abrangência geográfica;
- os sensores são mais suscetíveis à falhas;
- a topologia da rede pode mudar ainda mais rapidamente;

- a comunicação é feita geralmente através de *broadcast*, enquanto que na maioria das redes ad hoc a comunicação é ponto-a-ponto;
- os nós sensores são limitados em capacidade computacional, memória e, principalmente, energia.

Os principais padrões para redes ad hoc são os padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.15. Os padrões IEEE 802.11 são usados para WLANs (do inglês: *Wireless Local Area Networks*), enquanto que os padrões IEEE 802.15 para WPANs. As WPANs são redes sem fio de pequeno alcance (poucos metros) e as WLANs são redes sem fio para transmissões de maior alcance (algumas dezenas de metros) e maior volume de dados. Além destes padrões, vários outros protocolos vêm sendo propostos para redes ad hoc e de sensores.

As WLANs são normalmente usadas como uma rede infra-estruturada, assim como as redes celulares, usando pontos de acesso para conectar usuários sem fio à rede local ou à Internet. No entanto, também possuem um modo de operação ad hoc. Os principais padrões IEEE para WLANs são o IEEE 802.11b, IEEE 802.11a e IEEE 802.11g. O padrão IEEE 802.11b opera na banda ISM (do inglês: *Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz. Sua taxa atinge até 11 Mbps. O IEEE 802.11a opera na faixa de 5 GHz com taxas de até 54 Mbps e o IEEE 802.11g na banda 2,4 GHz com taxas de até 54 Mbps. Os padrões para WLANs têm um custo bem mais alto que os das WPANs, pois atingem taxas de transmissão bem mais altas e consomem mais energia.

As WPANs visam criar redes ad hoc sem fio com equipamentos como computadores pessoais, telefones celulares, impressoras, eletrodomésticos e sensores. Os padrões IEEE 802.15 surgiram como necessidade de padronizar os diferentes tipos de redes pessoais sem fio, assim como aconteceu com as redes locais sem fio. O IEEE 802.15.1 é derivado do Bluetooth, sendo adotadas as camadas física e de enlace do protocolo. O IEEE 802.15.2 são práticas recomendadas para facilitar a coexistência de dispositivos que usam a banda livre ISM de 2,4 GHz. O padrão IEEE 802.15.3 é utilizado para WPANs de alta velocidade (20 Mbps ou mais), especialmente para aplicações multimídia. O IEEE 802.15.4 é para WPANs de baixa velocidade (200 Kbps ou menos) e baixa potência. Estes padrões são os mais usados em redes ad hoc e uma breve descrição de cada um deles é feita a seguir.

2.2.1 IEEE 802.15.1 – Bluetooth

O padrão Bluetooth [Blu01], [Blu03] é uma tecnologia para redes sem fio de comunicação pessoal de curta distância. O IEEE adotou a camada física e de enlace do Bluetooth no padrão IEEE 802.15.1 [IEE02]. Os dispositivos Bluetooth operam na faixa de frequência ISM de 2,4 GHz utilizando a técnica de espalhamento espectral com saltos de frequência (FHSS – do inglês: *Frequency Hopping Spread Spectrum*). Usa modulação GFSK e atinge taxas de transmissão de até 1 Mbps na versão 1.2 [Blu01] e 2 ou 3 Mbps na versão 2.0 [Blu03]. O canal é dividido em quadros de tempo de 625 μ s usando TDD (do inglês: *Time-Division Duplex*). O protocolo MAC do Bluetooth foi projetado para facilitar a formação de redes ad hoc. Esta característica torna a tecnologia Bluetooth atrativa também para aplicações em redes de sensores, assim como seu baixo custo, suporte a comunicação com múltiplos saltos, processo de descoberta de dispositivos e modos de economia de energia [LDB03], [ME04], [ZR05].

Os dispositivos podem se comunicar formando uma rede de até oito nós, chamada de *piconet*. Numa *piconet*, um dispositivo assume a função de mestre e os outros de escravos. Dispositivos em diferentes *piconets* podem se comunicar usando uma estrutura chamada *scatternet*. A especificação Bluetooth define diferentes pacotes de dados. Cada pacote consiste de três campos: o código de acesso, cabeçalho e o *payload*. O código de acesso é usado para sincronização e o cabeçalho possui informações como tipo de pacote, controle de fluxo e confirmação de pacotes. O cabeçalho contém um código de repetição (3,1) para verificação de erro. O *payload* carrega os bytes de dados. A maioria dos pacotes é protegida por um esquema de retransmissão ARQ *stop-and-wait* baseado num código CRC. Adicionalmente, alguns pacotes possuem os dados protegidos por um código de Hamming de taxa 2/3 (15,10).

2.2.2 IEEE 802.15.3 – UWB

O UWB (do inglês: *Ultra-WideBand*) opera de forma diferente das demais tecnologias sem fio. Além de ter um espectro de atuação amplo (3,1 - 10,6 GHz), o UWB transmite através de rajadas de sinal (centenas por segundo). A combinação dessas rajadas rápidas com a ampla banda de operação permite que o UWB consuma pouquíssima energia e atinja taxas de

transmissão muito altas. O ponto forte do UWB é a sua velocidade de transmissão (100 a 500 Mbps), mais rápida que a maioria dos tipos de transmissão sem fio convencionais. No entanto, sua área de cobertura é de no máximo 10 metros. O padrão IEEE 802.15.3 [IEE03a] é projetado para prover qualidade de serviço (QoS) para transmissões em tempo real de tráfego multimídia, como áudio e vídeo. O padrão tradicional opera na banda de 2,4 GHz. Três tipos de mecanismos de retransmissão são definidos na camada MAC do IEEE 802.15.3: sem ACK, ACK imediato ou ACK com atraso. No ACK imediato, cada pacote de dados transmitido deve ser confirmado com o ACK. No ACK com atraso um único quadro ACK é usado para confirmar o recebimento de vários pacotes.

2.2.3 IEEE 802.15.4 – ZigBee

O padrão IEEE 802.15.4 [IEE03b] foi desenvolvido para aplicações de redes de sensores com baixo custo, baixo consumo de energia e baixas taxas de transmissão. Apenas a camada física e a camada de enlace são padronizadas pelo IEEE. As camadas de rede superiores são padronizadas com o nome de ZigBee [Zig05] por um consórcio de várias empresas. Os dispositivos podem operar em diferentes bandas: 2,4 GHz (global), 902-928 MHz (Américas) e 868 MHz (Europa). Em 2,4 GHz (16 canais) as taxas chegam a 250 Kbps, com modulação OQPSK e espalhamento espectral por sequência direta (DSSS – do inglês: *Direct Sequence Spread Spectrum*). As bandas de 868 MHz (1 canal) e 915 MHz (10 canais) também usam DSSS, mas com modulação BPSK, atingindo taxas de dados de até 20 Kbps e 40 Kbps, respectivamente.

O padrão 802.15.4 define dois mecanismos para acesso ao meio: *beacon* e *non-beacon*. Numa rede *non-beacon* é usada a técnica CSMA-CA (do inglês: *Carrier-Sense Medium Access with Collision Avoidance*). Para uma rede *beacon*, uma estrutura chamada *superframe* controla o acesso ao canal para garantir largura de banda e baixa latência, transmitindo *beacons* em intervalos pré-determinados e fornecendo 16 quadros de tempo entre os *beacons*. Para controle de erros, um esquema de retransmissão pode ser usado, indicando no pacote enviado a necessidade de confirmação de recepção. No padrão não foi previsto o uso de códigos corretores de erros. Um nó pode ser um coordenador de rede, um dispositivo de função completa ou um dispositivo de

função reduzida. Duas topologias de rede são suportadas: estrela e ponto-a-ponto. A topologia ponto-a-ponto permite que formações de rede mais complexas sejam implementadas, como a chamada *cluster-tree*. A Tabela 2.1 resume as principais diferenças dos padrões IEEE 802.15.1 e 802.15.4.

Tabela 2.1: Comparação entre IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4

Característica	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
Taxa de transmissão	1 Mbps (versão 1.2) 3 Mbps (versão 2.0)	20-250 Kbps
Modulação e acesso ao meio	GFSK FHSS TDD	BPSK e OQPSK CSMA/CA
Frequência de operação	2,4 GHz	868 MHz, 902-928 MHz e 2,4 GHz
Correção de erros	ARQ/Hamming	ARQ
Topologia de rede	<i>Piconet e scatternet</i>	Estrela, ponto-a-ponto e <i>cluster-tree</i>

2.3 Controle de erros para redes ad hoc e redes de sensores

As redes apresentadas na Seção 2.2 utilizam ondas de rádio para transmissão de informação. Ao contrário das tradicionais redes com fio, cujos canais são estacionários e relativamente previsíveis, os canais de rádio são aleatórios e difíceis de serem analisados [Rap99]. Fatores que influenciam diretamente a qualidade do canal são a distância entre transmissor e receptor, se há linha de visada entre eles ou existem obstáculos como paredes e construções, ou até mesmo pessoas e outros objetos.

Os modelos de propagação tentam prever a potência média do sinal recebido numa dada distância do transmissor, assim como a variabilidade da potência do sinal. Modelos de propagação que prevêm a potência média do sinal para uma separação transmissor-receptor qualquer são chamados de modelos de propagação de larga escala, pois caracterizam a intensidade do sinal em grandes distâncias transmissor-receptor. Os modelos de propagação que caracterizam as flutuações rápidas da potência do sinal recebido em distâncias muito pequenas

(poucos comprimento de onda) ou durações muito curtas (poucos segundos) são chamados de pequena escala ou modelos de desvanecimento. Os mecanismos básicos de propagação de ondas eletromagnéticas são: reflexão, difração e espalhamento. Os modelos de propagação de larga escala e de desvanecimento são baseados na física destes três mecanismos de propagação. Logo, os canais sem fio podem ter taxas de erro bastante altas. Uma solução para diminuir os erros de transmissão é aumentar a potência do sinal. Porém, esta opção consome muita energia, recurso escasso em redes de sensores. As técnicas FEC e ARQ também são comumente utilizadas em redes sem fio para diminuir a taxa de erro [LMZG97].

Enquanto que o controle de erros é tradicionalmente estudado na perspectiva de selecionar o melhor esquema para atingir um determinado desempenho do canal de rádio, para dispositivos que operam com recursos limitados de energia o problema de controle de erros deve ser tratado considerando a quantidade de energia consumida para transmitir a informação em um enlace sem fio [LFS97]. Alguns dos primeiros trabalhos que analisaram sistemas ARQ e codificação de canal sob esta perspectiva foram [LFS97], [ZR97a] e [ZR97b]. Em [ZR97a] e [ZR97b] são analisadas diferentes estratégias de controle de erros ARQ em canais sem fio de sistemas com restrição de energia. Em [LFS97] são analisados diferentes códigos (Reed-Solomon, convolucionais) além de estratégias ARQ para pacotes de redes ATM e IP. Também é proposto um esquema adaptativo que muda o controle de erros utilizado de acordo com requisitos de QoS (qualidade de serviço) e condição de canal.

Vários trabalhos na literatura estudam controle de erros em redes sem fio tendo como principal objetivo minimizar o consumo de energia. Diferentes esquemas têm sido propostos para redes ad hoc e redes de sensores. No entanto, ainda não é consenso na comunidade quando se deve utilizar codificação de canal ou retransmissão e quais são as técnicas mais eficientes.

Em [DF03], o consumo de energia de codificação e decodificação para diferentes tipos de códigos é analisado, baseado no consumo das operações necessárias a estas tarefas. São considerados quatro tipos de sistemas de acordo com a energia transmitida por bit. O consumo dos codificadores e decodificadores é baseado nas operações básicas necessárias para executar a tarefa, como portas lógicas, flip-flop, somadores, multiplicadores, etc. O consumo de cada uma destas operações foi baseado em *data-sheets* destes elementos. Os códigos analisados foram: Hamming, Golay, Reed-Muller, Reed-Solomon, convolucionais e códigos turbo. São

apresentados o ganho e o consumo de energia para cada um dos quatro tipos definidos de transmissão. Para sistemas de potência muito baixa, nenhuma codificação deve ser usada. Em sistemas com mais potência, códigos de Hamming, Golay ou códigos convolucionais podem ser usados. Para sistemas com potência mais alta, códigos turbo são a melhor opção.

O artigo [SAM03] procura otimizar o tamanho em bits de um pacote em uma rede de sensores. Utiliza um modelo de energia que considera a energia consumida na comunicação (transmissão e recepção) e também a energia de decodificação. O modelo usa os parâmetros do transceptor RFM-TR1000. Para a energia de decodificação é considerado um circuito CMOS 2.5 V. Este trabalho define uma métrica de eficiência de energia η . São considerados códigos convolucionais e BCH, usando o algoritmo Berlekamp-Massey para decodificação BCH e algoritmo de Viterbi para os códigos convolucionais. Nas conclusões do artigo, os autores afirmam que o impacto da energia de decodificação na eficiência de energia usando estes algoritmos é insignificante, sendo que o fator determinante são os bits de paridade introduzidos pelo código. Os códigos de bloco apresentaram melhor eficiência de energia que os códigos convolucionais, mesma conclusão obtida em [SHI01].

Em [ZR04] é estudada a relação custo-benefício entre o uso de códigos e o consumo de energia em redes de sensores. São considerados três cenários de transmissão:

- 1) único salto - nó fonte (sensor) para o destino (coletor);
- 2) múltiplos saltos com decodificação apenas no destino;
- 3) múltiplos saltos com decodificação em cada nó intermediário.

É apresentado um modelo de consumo de energia considerando a energia gasta na comunicação (transmissão e recepção), bem como a energia usada na decodificação. Este modelo utiliza parâmetros dependentes do hardware. O transceptor utilizado é o μ AMPS. Nos resultados apresentados, usando códigos convolucionais, cada um dos três casos tem um melhor desempenho dependendo da potência transmitida e distância entre os nós. O caso 1 teve o menor consumo de energia para pequenas distâncias, o caso 2 para distâncias intermediárias e o caso 3 para distâncias maiores.

Baseado no modelo de eficiência de energia proposto em [SAM03], os autores de [KSP04] usam códigos DC (Manchester), além de códigos corretores de erro como BCH, Golay e SEC/DED (do inglês: *Single Error Correction/Double Error Detection*). A energia usada na

decodificação é considerada desprezível. Também utiliza os parâmetros do hardware RFM-TR1000. O código com melhor desempenho depende das condições do canal e número de saltos. Outro artigo dos mesmos autores [SPKH05] usa o mesmo modelo de energia para analisar a eficiência de estratégias de controle de erro e protocolos MAC (CSMA e nanoMAC) em redes de sensores. Os resultados mostram que quando a distância total do transmissor ao receptor é menor que o alcance do rádio uma estratégia de único salto é mais eficiente que múltiplos saltos. Em [KS06] também é usado o mesmo modelo de energia para o módulo de rádio RFM-TR1000. São analisados códigos BCH com diferentes capacidades de correção de erros. O consumo de energia da decodificação é baseado no consumo de energia das instruções executadas pelo microprocessador, medido em Joules.

Em [ZRW05] é discutido o uso de redes de sensores com um único salto. Apesar de que as redes de sensores sejam tradicionalmente com múltiplos saltos, este artigo demonstra que nem sempre esta topologia é vantajosa, como também foi observado em [SPKH05]. Entre as vantagens de um único salto está a possibilidade de usar algoritmos centralizados, roteamento mais simples e baixo atraso na rede. É proposta uma arquitetura chamada SHAS (do inglês: *Single Hop Asymmetric Structure*) com um nó chamado de base e os outros nós satélites (sensores/atuadores). É usada codificação de baixa complexidade nos sensores e a decodificação, que é mais complexa, é feita pela estação base, que não possui limite de energia. Como grande parte dos códigos é assimétrica, os sensores fazem a tarefa que consome menos energia e a base fica com as operações mais complexas. O esquema SHAS teve um melhor desempenho para distâncias de até 175 metros usando um código convolucional. O artigo sustenta que um ganho ainda maior pode ser obtido reduzindo a sensibilidade de recepção do satélite e aumentando a sensibilidade da base, fazendo o receptor do sensor quase passivo.

Outro trabalho que analisa diferentes estratégias de controle de erro é [HSI06]. O consumo de energia de vários decodificadores (analógicos e digitais) é analisado. Os códigos analisados foram: convolucionais, turbo, LDPC, Hamming e Reed-Solomon. Os resultados mostram que o uso de codificação é eficiente a partir de uma determinada distância. Para pequenas distâncias e boas condições de canal nenhum código precisa ser usado.

Em [YOKO04] é proposto o uso de códigos turbo em redes de sensores. A codificação é feita no nó sensor e enviada ao nó coletor. Os nós intermediários apenas repassam a informação e

a decodificação é feita apenas no coletor. Como a decodificação turbo é complexa, fazer esta tarefa somente no nó que não é limitado em energia pode ser uma boa estratégia. No entanto, no artigo são apresentados resultados para apenas um salto. Não fica claro no artigo como seria o desempenho dos códigos turbo se uma rede com mais saltos fosse usada como cenário. Outra proposta interessante é feita em [ZH05]: usar redundância incremental. O transmissor envia um pacote sem nenhuma codificação ao receptor, que notifica ao transmissor se a recepção foi correta (usando um código CRC para detecção de erros). Caso a recepção tenha encontrado erros, o transmissor envia somente os bits de paridade de um código para que o receptor tente corrigir os erros. Se a recepção foi correta, o transmissor não precisa enviar redundância desnecessariamente. Os códigos analisados neste trabalho [ZH05] foram códigos convolucionais “*tail-biting*” e códigos turbo.

Uma abordagem diferente é apresentada em [Cam05], usando codificação conjunta fonte-canal e agregação de dados segura. A codificação de canal é feita usando códigos turbo com múltiplas entradas (do inglês: *Multiple Input Turbo*) com entrelaçadores parciais para reduzir memória e consumo de energia. O código MIT só é usado quando a taxa de erro de bit do canal é muito ruim ou quando a decodificação é feita numa estação base.

Nem sempre usar a mesma estratégia de controle de erros para todas as transmissões na rede é a melhor opção. Sistemas adaptativos que mudam o controle de erros foram propostos em [AH02], [AHH05], [KKL05] e [MJB03]. Em [MJB03] e [KOP05] é usada uma correção de erros mais robusta em mensagens mais importantes e nenhuma ou pouca capacidade de correção de erros em mensagens menos importantes. Em [KKL05] a importância de um pacote é definida com o número de medições de sensores agregadas num pacote. Dada uma determinada importância de um pacote é escolhida uma proteção mais adequada (ARQ e códigos BCH). Os autores mostram que a eficiência do sistema pode ser melhorada com este esquema adaptativo em comparação com um não adaptativo.

Outra técnica adaptativa de controle de erros muito promissora para diminuir o consumo de energia é mudar o código de acordo com as condições de canal [AH02], [AHH05]. Em [AH02] é proposto um algoritmo adaptativo para redes sem fio baseado nas condições do canal, usando estratégias ARQ e códigos BCH. Em [AHH05] os mesmos autores propõe um algoritmo adaptativo específico para redes de sensores. A informação do estado do canal é obtida através

dos pacotes ACK. Dependendo da qualidade estimada do canal, são usados diferentes tipos de códigos Reed-Solomon. Os resultados mostraram que o algoritmo adaptativo tem eficiência melhor que outros algoritmos de correção de erros estáticos.

Além das técnicas tradicionais de correção de erros, outra estratégia pode ser usada em redes de sensores: a combinação de pacotes [FEV05], [MGE04], [MPD04], [YSKS05]. Em [YSKS05] os nós sensores são divididos em *clusters* e transmitem os pacotes para o *cluster head*. Se não há erros, o pacote é repassado. Se ocorrerem erros, é feita a fusão dos pacotes usando técnicas de combinação *Chase*. Os pacotes com erro dos vários sensores são combinados e corrigidos em apenas um pacote usando esta técnica. Códigos convolucionais também podem ser usados para facilitar a combinação [YSKS05]. Em [MGE04] são propostas técnicas conjuntas de codificação fonte-canal que utilizam a correlação entre as fontes (sensores) para maximizar a capacidade do canal. Em [FEV05] os pacotes são divididos em planos (não codificados) e paridade (com os bits de paridade). Se o receptor receber um pacote plano e um pacote paridade, é feita a decodificação (código de Hamming). Se receber dois pacotes corrompidos do mesmo tipo faz a fusão dos pacotes.

Outra abordagem para correção de erros é usar códigos de apagamento (do inglês: *erasure codes*) junto com roteamento de múltiplos caminhos [DNWH03], [KFC04]. São enviados n sub-pacotes que são reconstruídos pelo *erasure code* no receptor se quaisquer k pacotes são recebidos ($n > k$). Os pacotes são enviados por várias rotas da rede. Esta abordagem é uma das técnicas chamadas de *cross-layer*, onde há interação entre duas ou mais camadas de rede (neste caso, enlace e roteamento) [VA06]. Outra camada de rede diretamente relacionada à correção de erros e confiabilidade é a camada de transporte. Diversos protocolos para esta camada têm sido propostos [WDS06].

2.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos de redes ad hoc e de sensores sem fio, assim como os padrões IEEE 802.15 desenvolvidos para esses tipos de redes. Também foram discutidas algumas técnicas de controle de erros analisadas na literatura, que visam aumentar a confiabilidade de entrega de pacotes sem um aumento excessivo do consumo de energia. A

questão de escolher a melhor estratégia de controle de erros para redes sem fio limitadas em energia não é uma tarefa fácil. A análise desses primeiros trabalhos propostos na literatura indica que a escolha da estratégia é altamente dependente da aplicação da rede e da tecnologia utilizada. Esse estudo inicial motivou a proposta de novos modelos e esquemas de controle de erros que serão apresentados com mais detalhes nos próximos capítulos.

Capítulo 3

Modelo de Eficiência de Energia para Estratégias de Controle de Erros

Um sinal que se propaga em um canal sem fio é afetado por diversos fatores, como desvanecimento, perda de percurso e interferência co-canal. Dispositivos operando na mesma faixa de frequências podem causar interferência entre si. A mobilidade dos nós e a distância entre transmissor e receptor podem causar mudanças no desvanecimento experimentado pelo sinal de rádio. Assim, a qualidade do canal varia com o tempo e depende também da localização dos dispositivos. Em redes ad hoc e redes de sensores sem fio é importante proteger os dados usando FEC ou ARQ, como discutido no Capítulo 2. Este capítulo apresenta um modelo analítico para cálculo de probabilidade de erro de pacotes usando diferentes esquemas de controle de erros e modulações. Em seguida, é definida a eficiência de energia como métrica de otimização. Em termos gerais, quanto melhor o esquema de controle de erros, maior é a confiabilidade e também maior é o consumo de energia. Como a energia é um recurso escasso em redes de sensores, nem sempre é possível usar um esquema poderoso para correção de erros. O parâmetro de eficiência de energia proposto captura em uma única métrica esta relação custo-benefício entre os requisitos de confiabilidade e consumo de energia. Embora modelos semelhantes para eficiência de energia já tenham sido propostos na literatura, são geralmente muito dependentes de parâmetros de hardware específicos ou apenas para comunicação ponto a ponto (um salto) [SAM03] [KSP04] [SPKH05] [VA06]. Neste capítulo é apresentada uma abordagem que possa ser facilmente adaptada para outras tecnologias e que, principalmente, forneça diretrizes para a proposta de

novos esquemas adaptativos de controle de erros, como aqueles a serem descritos nos Capítulos 4 e 5. Ainda neste capítulo é apresentado um modelo de simulação e os resultados obtidos de eficiência de energia para diferentes estratégias de controle de erros, modulações e número de saltos. Parte dos resultados discutidos nesta seção foram publicados em [KB07b], [KBP07] e [KBP08].

3.1 Controle de Erros

FEC e ARQ são as duas categorias básicas de técnicas de controle de erros. ARQ é relativamente simples e tem bom desempenho se as taxas de erro não são muito altas. No entanto, pode levar a grandes atrasos na rede se as condições de canal são ruins. Os esquemas FEC têm um bom desempenho e podem manter as taxas de atraso constantes mesmo em más condições, mas para manter a confiabilidade vários padrões de erro devem ser corrigidos. Então um código muito longo é necessário, impondo uma sobrecarga de transmissão bastante alta. Outro fator é que o canal sem fio é não estacionário e as taxas de erro de bit variam com o tempo. Os códigos são estacionários e devem ser implementados para garantir um determinado desempenho para o pior caso das características do canal. Logo, são associadas a uma sobrecarga de bits desnecessária quando o canal está em boas condições.

Para compensar as desvantagens de sistemas FEC e ARQ, pode ser feita a combinação desses dois esquemas, os chamados esquemas ARQ híbridos. Neste trabalho são usados esquemas híbridos que incluem bits de paridade tanto para detecção como para correção de erros. Se o número de bits com erro pode ser corrigido pelo código, não é solicitada retransmissão. Se um erro não corrigível é detectado, o receptor descarta o pacote e solicita a retransmissão. Este processo é repetido até que a palavra código seja recebida corretamente ou o número máximo de retransmissões seja atingido.

A Figura 3.1 mostra uma rede de sensores com múltiplos saltos onde um sensor deve enviar os dados para um dispositivo central, chamado de coletor. Está sendo considerado um modelo linear de múltiplos saltos com distância D do sensor ao coletor, onde as distâncias entre os nós são as mesmas ($d_1=d_2=d_n$). O nó coletor é responsável por receber todas as informações

da rede, bem como executar tarefas de gerenciamento dos nós. A rede da Figura 3.1 é apenas um exemplo de uma rota da rede de sensores, pois podem existir outras rotas do sensor até o coletor.

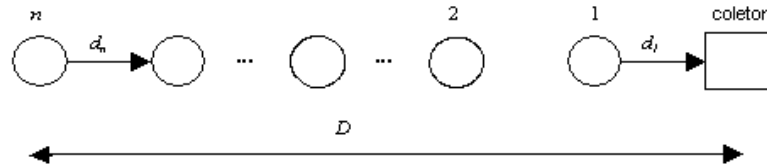


Figura 3.1: Rede de sensores com múltiplos saltos

Neste capítulo são propostos e analisados quatro esquemas de controle de erros:

- 1 – código CRC para detecção de erros sem retransmissão;
- 2 – código CRC para detecção de erros com retransmissão;
- 3 – FEC para correção de erros e código CRC para detecção de erros sem retransmissão;
- 4 – FEC para correção de erros e código CRC para detecção de erros com retransmissão.

No primeiro esquema o código CRC é usado apenas para verificação de erros. Se houver erro o pacote é descartado e não é transmitido para o próximo nó (numa rede com múltiplos saltos). Em um esquema sem CRC, o pacote seria transmitido ao próximo nó mesmo que tivesse erros. No segundo esquema, o código CRC é usado para detecção de erros e solicitação de retransmissão. É enviado um pacote para confirmar ou não a recepção, fazendo com que o transmissor reenvie o pacote de dados em caso de erros. O terceiro e quarto esquemas funcionam como os dois primeiros, com a diferença que usam adicionalmente um código corretor de erros (Hamming ou BCH). Estes quatro esquemas são comparados com um sistema sem capacidade de detecção/correção de erros ou retransmissão. É interessante notar que os esquemas 1 e 3 não têm sido abordados na literatura para controle de erros em redes de sensores com múltiplos saltos. No entanto, usar código CRC para detecção de erros e posterior descarte do pacote caso esteja corrompido pode trazer grandes economias de energia, como será visto na Seção 3.3.

O pacote de dados da camada de enlace é a unidade de comunicação entre os nós sensores da rede, consistindo de um cabeçalho de c bits, um trailer de t_r bits e d bits de dados, como mostra a Figura 3.2. O cabeçalho geralmente inclui informações de controle, como número do segmento atual, número total de segmentos no pacote correspondente da camada superior, identificador de pacote da camada superior e identificadores de fonte e destino. O pacote de

retorno no caso de retransmissão possui o mesmo formato, porém sem o campo para dados. A Tabela 3.1 mostra os tipos de pacotes utilizados neste trabalho, com as informações sobre o controle de erros utilizado, modulação e tamanho dos dados. Os códigos corretores de erros utilizados são códigos de bloco Hamming e BCH. As modulações escolhidas foram FSK, GFSK e OQPSK, que são frequentemente usadas em dispositivos para redes sem fio e de sensores. As duas últimas são as modulações utilizadas nos padrões IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4, respectivamente. Estes pacotes seguiram a seguinte notação, de acordo com o controle de erros utilizado e modulação: N quando nenhum tipo de controle de erros é utilizado, C quando é usado código CRC sem retransmissão, A para código CRC com ARQ, H para código de Hamming e B para código BCH. Ainda, F, O e G se referem às modulações FSK, OQPSK e GFSK, respectivamente. Os códigos CRC e o código corretor de erros são incluídos na parte de dados do pacote. O código CRC tem 16 bits de comprimento e o FEC é variável, dependendo do código utilizado.

Tabela 3.1: Tipos de pacotes

Tipo	Modulação	ARQ	CRC	FEC	Dados (bytes)
NF	FSK	Não	Não	Não	32/256
CF		Não	Sim	Não	
AF		Sim	Sim	Não	
AHF		Sim	Sim	Hamming	
ABF		Sim	Sim	BCH	
CBF		Não	Sim	BCH	
NO	OQPSK	Não	Não	Não	
CO		Não	Sim	Não	
AO		Sim	Sim	Não	
AHO		Sim	Sim	Hamming	
ABO		Sim	Sim	BCH	
CBO		Não	Sim	BCH	
NG	GFSK	Não	Não	Não	
CG		Não	Sim	Não	
AHG		Sim	Sim	Não	
HG		Sim	Sim	Hamming	
ABG		Sim	Sim	BCH	
CBG		Não	Sim	BCH	

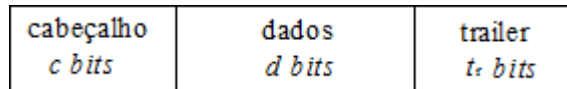


Figura 3.2: Formato do pacote da camada de enlace

3.2 Modelo Analítico

3.2.1 Cálculo da probabilidade de erro de pacote

O modelo analítico para cálculo da probabilidade de erro de pacote proposto nesta seção é baseado em [KPL04] e [VRR02]. Um pacote enviado não é aceito pelo receptor quando qualquer um dos cinco eventos acontece:

- (A) o cabeçalho do pacote enviado está corrompido;
- (B) o destino falha ao sincronizar com o trailer do pacote enviado;
- (C) os dados do pacote enviado estão corrompidos, causando a falha na verificação de CRC;
- (D) o cabeçalho do pacote de retorno está corrompido;
- (E) a fonte é incapaz de sincronizar com o trailer do pacote de retorno.

Destes cinco eventos, três (A, B e C) se referem ao canal direto, isto é, o pacote de dados que foi enviado. Como o pacote tem três campos (cabeçalho, dados e trailer), três eventos de erro podem ocorrer. Para o canal reverso apenas dois eventos (D e E) podem ocorrer, pois o pacote de retorno usado para indicar o sucesso ou insucesso de uma transmissão não possui dados, apenas o cabeçalho e trailer. É considerado que os erros são estatisticamente independentes. O cabeçalho é recebido corretamente se todos os bits são recebidos corretamente:

$$P[\overline{A}] = [1 - p(\gamma_f)]^c, \quad (3.1)$$

onde $p(\gamma_f)$ é a probabilidade de erro de bit do canal direto em função da relação sinal-ruído (SNR) instantânea γ , γ_f denota a SNR instantânea do canal direto e γ_r a SNR instantânea do canal reverso. O evento $\overline{A}$ indica o complemento do evento A e $P[A]$ é a probabilidade de ocorrência do evento A . Como o pacote de retorno ACK também tem um cabeçalho de c bits, a probabilidade para o evento D tem a mesma forma,

$$P[\overline{D}] = [1 - p(\gamma_r)]^c, \quad (3.2)$$

onde $p(\gamma_r)$ é a probabilidade de erro de bit do canal reverso. Os eventos B ou E ocorrem se qualquer bit do trailer de sincronização for recebido com erro:

$$P[\overline{B}] = [1 - p(\gamma_f)]^{l_r}, \quad (3.3)$$

$$P[\overline{E}] = [1 - p(\gamma_r)]^{l_r}, \quad (3.4)$$

O erro mais provável é o do tipo C, que ocorre quando os bits de dados são recebidos com erros. Para o caso sem nenhum tipo de código corretor de erros:

$$P[\overline{C}] = [1 - p(\gamma_f)]^d. \quad (3.5)$$

Para pacotes em que os dados são protegidos com um código corretor de erros, a probabilidade do evento C é calculada considerando a capacidade de correção do código. Para um código de Hamming de taxa 2/3 (15,10), capaz de corrigir todos os padrões de erros simples e detectar todos os erros duplos numa palavra código, tem-se que:

$$P[\overline{C}] = [15p(\gamma_f)[1 - p(\gamma_f)]^{14} + [1 - p(\gamma_f)]^{15}]^B, \quad (3.6)$$

onde B é o número de blocos de 10 bits que entram no codificador. Outro código utilizado nesta seção é um código BCH (n, k, t) , capaz de corrigir até t erros numa palavra código. É usada decodificação por decisão abrupta (*hard decision*). A probabilidade do evento C para um código BCH é dada por:

$$P[\overline{C}] = \sum_{k=0}^t \binom{n}{k} \cdot [p(\gamma_f)]^k \cdot [1 - p(\gamma_f)]^{n-k}. \quad (3.7)$$

Neste capítulo são consideradas as modulações FSK, GFSK e OQPSK. A probabilidade de erro de bit $p(\gamma)$ varia para cada tipo de modulação. Para a modulação FSK é dada por [Sk195]:

$$p(\gamma) = \frac{1}{2} e^{-\frac{\gamma}{2}} \quad (3.8)$$

Para a modulação OQPSK é dada por [Sk195]:

$$p(\gamma) = Q(\sqrt{2\gamma}), \quad (3.9)$$

onde:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (3.10)$$

Para a modulação GFSK é usado o produto tempo-largura de banda $BT = 0,5$ e índice de modulação $i=0,32$. Quando o índice de modulação do FSK é menor que $i = 0,5$, os sinais são correlacionados e a correlação é dada em [PRO01] por:

$$\rho = \frac{\sin(2\pi i)}{2\pi i}, \quad (3.11)$$

Sejam duas constantes a e b :

$$a = \sqrt{\frac{\gamma}{2}(1 - \sqrt{1 - \rho^2})}, \quad b = \sqrt{\frac{\gamma}{2}(1 + \sqrt{1 - \rho^2})} \quad (3.12)$$

Logo, a probabilidade de erro da modulação GFSK, onde $Q_1(a, b)$ é a função Q-Marcum e I_0 é a função de Bessel modificada de primeira ordem é dada em [Pro01]:

$$p(\gamma) = Q_1(a, b) - \frac{1}{2} e^{(a^2 + b^2)/2} I_0(ab). \quad (3.13)$$

Assim, a probabilidade de erro de pacote do canal direto, PER_f , e reverso, PER_r , podem ser definidas por:

$$PER_f = 1 - \int_0^\infty f(\gamma_f) P[\overline{A}] P[\overline{B}] P[\overline{C}] d\gamma_f, \quad (3.14)$$

$$PER_r = 1 - \int_0^\infty f(\gamma_r) P[\overline{D}] P[\overline{E}] d\gamma_r, \quad (3.15)$$

onde $f(\gamma_f)$ e $f(\gamma_r)$ são as funções de densidade de probabilidade do canal direto e reverso, respectivamente.

O canal sem fio é modelado usando desvanecimento Rayleigh. Esta distribuição é amplamente utilizada para a modelagem de canais sem fio [Rap99]. A função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \quad \text{para } \gamma \geq 0, \quad (3.16)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a SNR média recebida e γ é a SNR instantânea. As probabilidades de erro de pacote podem então ser calculadas usando a equação (3.16) em (3.14) e (3.15). São consideradas que as condições de propagação entre o transmissor e o receptor são as mesmas nas duas direções, ou seja, $\gamma_f = \gamma_r$.

A probabilidade de um pacote ser corretamente recebido é a probabilidade de sucesso do pacote nos canais direto e reverso. Assim, a probabilidade de erro de pacote PER é dada por:

$$PER = 1 - [(1 - PER_f)(1 - PER_r)]. \quad (3.17)$$

3.2.2 Cálculo da eficiência de energia

A probabilidade de um pacote ser corretamente recebido no nó coletor para um sistema sem ARQ é dada por:

$$P_{narq} = (1 - PER_f)^H, \quad (3.18)$$

onde H é o número total de saltos. Considere n_r o número de retransmissões de um pacote com ARQ. A probabilidade de acontecerem n_r retransmissões é o produto de falha nas $n_r - 1$ transmissões e a probabilidade de sucesso na n -ésima transmissão:

$$p_N[n_r] = (1 - PER)(PER)^{n_r - 1}. \quad (3.19)$$

Então, a equação (3.21) é usada para calcular o número médio de retransmissões $\bar{N}$ em um salto:

$$\bar{N} = \sum_{n_r=1}^{\infty} p_N[n_r] n_r. \quad (3.20)$$

Assumindo que o código CRC é capaz de detectar todos os erros e número máximo de retransmissões infinito, a probabilidade que um pacote com ARQ chegue corretamente no coletor é a soma das probabilidades de ocorrerem n_r retransmissões em H saltos:

$$P_{arq} = \left[\sum_{n_r=1}^{\infty} [p_N[n_r]] \right]^H = 1. \quad (3.21)$$

O número de pacotes recebidos com erro no coletor pode ser definido para os pacotes sem ARQ como o produto do número total de pacotes transmitidos n_{pac} e a probabilidade que o pacote chegue com erro no coletor:

$$n_{error} = (1 - P_{narq}) n_{pac}. \quad (3.22)$$

Fazendo a mesma consideração da equação (3.19) de que o código CRC é capaz de detectar todos os padrões de erro, nenhum dos pacotes ARQ é recebido no coletor com erros e assim $n_{error} = 0$:

$$n_{error} = (1 - P_{arq}) n_{pac} = 0. \quad (3.23)$$

A vazão normalizada C é dada pela confiabilidade de entrega de pacotes, ou seja, pela porcentagem dos pacotes enviados que são recebidos corretamente no coletor, e pode ser calculada da seguinte forma:

$$C = [(n_{pac} - n_{error}) / n_{pac}]. \quad (3.24)$$

Como não está sendo usado nenhum hardware específico, o consumo de energia é expresso de forma normalizada. As energias consideradas são as gastas no processo de comunicação (transmissão e recepção) e a energia gasta na decodificação. A energia gasta na codificação pode ser desconsiderada quando comparada com aquela necessária para a decodificação.

O número total de bits do pacote n_{bits} é a soma dos bits do 3 campos do pacote, incluindo os campos de cabeçalho, dados e trailer (Figura 3.2) e é dado por:

$$n_{bits} = c + \frac{d}{R} + t_r \quad (3.25)$$

onde R é a taxa do código (para um pacote não codificado, $R=1$).

É considerado o mesmo modelo de [MJB03] e [KBP05], onde a recepção de um bit consome aproximadamente 75% da energia gasta para transmitir um bit. Sendo E_b a energia gasta para transmitir 1 bit, a energia mínima normalizada E_{min}/E_b para H saltos é calculada para pacotes sem nenhum tipo de controle de erros (ARQ ou FEC):

$$E_{min} / E_b = 1,75(c + d + t_r).H.n_{pac}, \quad (3.26)$$

A energia consumida total numa rede de sensores para um pacote sem ARQ é o número total de bits transmitidos e recebidos mais a energia gasta na decodificação por pacote:

$$E / E_b = H.n_{pac}.(n_{bits} + 0,75.n_{bits} + E_{DEC} / E_b). \quad (3.27)$$

Para os pacotes com ARQ, a energia total é o número total de bits transmitidos e recebidos (incluindo as retransmissões) mais a energia gasta na decodificação:

$$E / E_b = H.n_{pac}.\bar{N}.[n_{bits} + n_{ack} + 0,75(n_{bits} + n_{ack}) + E_{DEC} / E_b], \quad (3.28)$$

onde n_{ack} é o número total de bits do pacote de retorno (ACK) e $\bar{N}$ é dado pela equação 3.20.

A energia gasta na decodificação depende do código utilizado e para códigos de baixa complexidade também pode ser desconsiderada [MJB03], [SAM03], [SPKH05]. Isto se deve ao fato de que a energia gasta para transmitir 1 bit é muitas vezes maior que a energia gasta para

executar uma instrução. Por exemplo, um nó sensor desenvolvido pela empresa Rockwell consome entre 1500 e 2700 vezes mais energia para transmitir 1 bit que para executar uma instrução [RSPS02]. Logo, a energia de decodificação do código de Hamming, por ser um código de baixa complexidade, foi considerada desprezível ($E_{DEC} / E_b = 0$).

A energia de decodificação para um código BCH (n, k, t) com 2^m elementos do corpo pode ser calculada usando o número de instruções de processador necessárias para fazer a decodificação usando o algoritmo de Berlekamp-Massey. O número de instruções n_{inst} necessárias para executar este algoritmo é dado por [DF03]:

$$n_{inst} = kt(t+1)m + 2tm + ((k+2)t(t+1) + (3t-2)n + 2(t+1)(t+3)) + (kt(t+1) + (3t-2)(n-1) + 2t(t+1)) \quad (3.29)$$

A energia gasta na transmissão de um bit é muito maior que a energia gasta pelo processador para executar uma instrução [RSPS02] [SAM03]. Neste trabalho são considerados os parâmetros de [RSPS02], onde a energia de transmissão é aproximadamente 2700 vezes maior que a energia gasta para executar uma instrução. Diferentes dispositivos podem apresentar variações neste parâmetro, mas esta aproximação é suficiente para os propósitos deste trabalho. Logo, a energia de decodificação é dada por:

$$E_{DEC} / E_b = \frac{n_{inst}}{2700}. \quad (3.30)$$

Para calcular a energia E para o caso de código CRC sem ARQ é preciso calcular o número médio de saltos que um pacote vai ter na rede sem ser descartado. A probabilidade que um pacote atinja h saltos é o produto do sucesso em $h-1$ saltos e a probabilidade de falha no h -ésimo salto, se $h < H$. Se $h = H$ a probabilidade de um pacote atingir H saltos é o produto do sucesso nos $h-1$ saltos e a probabilidade de falha no h -ésimo salto mais a probabilidade de sucesso em H saltos:

$$p_H[h] = \begin{cases} [(1-PER_f)^{h-1}(PER_f)], & \text{se } h < H \\ [(1-PER_f)^{h-1}(PER_f) + (1-PER_f)^h], & \text{se } h = H \end{cases} \quad (3.31)$$

Então o número médio de saltos $\overline{H}$ pode ser calculado:

$$\overline{H} = \sum_{h=1}^H p_H[h].h. \quad (3.32)$$

A energia total consumida E para os pacotes com CRC e sem ARQ é:

$$E / E_b = \overline{H} . n_{pac} . (n_{bits} + 0.75 . n_{bits} + E_{DEC} / E_b). \quad (3.33)$$

A Tabela 3.2 apresenta as equações correspondentes para o cálculo da energia consumida para cada tipo de controle de erros:

Tabela 3.2. Cálculo da energia consumida

Correção de erros	Equação
Sem correção	3.27
FEC	3.27
ARQ	3.28
ARQ+FEC	3.28
ARQ+CRC	3.28
ARQ+CRC+FEC	3.28
CRC	3.33
CRC+FEC	3.33

Para uma rede de sensores ser considerada eficiente em energia, o máximo número de bits de dados deve ser transmitido com o mínimo consumo de energia. O parâmetro de eficiência de energia η pode ser definido como:

$$\eta = \frac{E_{\min} / E_b}{E / E_b} C. \quad (3.34)$$

3.3 Resultados analíticos

As Figuras 3.3 a 3.9 mostram os resultados obtidos usando o modelo analítico de probabilidade de erro de pacotes e eficiência de energia para os diferentes pacotes e esquemas de controle de erros apresentados na Seção 3.1. O número de bits utilizados para o cabeçalho do pacote foi $c=32$ e para o trailer $t_r=8$ bits. Foi considerado que o código CRC é capaz de detectar todos os erros. O código BCH utilizado tem os seguintes parâmetros: $n=511$, $k=259$ e $t=30$. Nos resultados obtidos para eficiência de energia um sensor envia 100.000 pacotes ao coletor ($n_{pac}=100.000$) num canal com desvanecimento Rayleigh. Apenas um nó sensor transmite de cada vez. Os dados do pacote podem ser enviados em intervalos regulares e podem indicar a temperatura de um ambiente ou outra variável que poderia ser transmitida com poucos bytes de dados. O tamanho dos dados utilizados foi de 32 e 256 bytes. Outros tamanhos poderiam ter sido escolhidos, mas esses valores já podem indicar uma tendência do comportamento de cada pacote.

A Figura 3.3 mostra a taxa de erro de pacotes PER_f em função da relação sinal-ruído (E_b/N_o). São comparadas as modulações OQPSK, FSK e GFSK sem codificação. A PER_f da modulação GFSK é sempre mais alta que a das modulações FSK e OQPSK, pois a probabilidade de erro de bit também é maior [Pro01], [Rap99], [Skl95]. Quando comparado um pacote sem codificação (Figura 3.3) com outro que usa código corretor de erros (Figura 3.4), a PER_f de um pacote codificado é sempre mais baixa. Na Figura 3.4, o código de Hamming tem um melhor desempenho para as três modulações quando comparado ao sistema não codificado. Por corrigir mais erros, o código BCH apresenta um desempenho ainda melhor para a taxa de erro de pacotes.

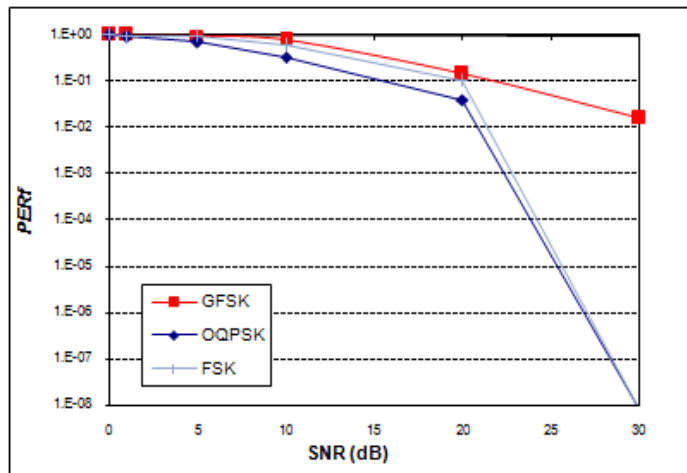


Figura 3.3: Probabilidade de erro de pacote sem codificação, 32 bytes, 1 salto

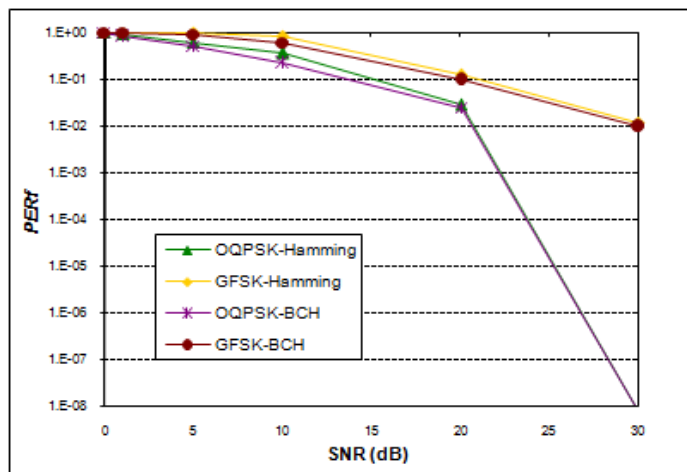


Figura 3.4: Probabilidade de erro de pacote com FEC, 32 bytes, 1salto

As Figuras 3.5 a 3.9 mostram os resultados obtidos para eficiência de energia. A modulação FSK não é apresentada nestes gráficos, mas o seu desempenho é sempre intermediário se comparado as outras duas modulações. Para melhor visualização, apenas alguns esquemas são mostrados nos gráficos. A Figura 3.5 compara estratégias de controle de erros para as modulações GFSK e OQPSK numa rede com 15 saltos e dados de 32 bytes. Com este número de saltos ($H=15$) o desempenho relativo entre os pacotes tende a estabilizar. Como esperado, a eficiência da modulação OQPSK é melhor que da GFSK quando comparadas às mesmas estratégias de controle de erros (AO e AG, por exemplo). Quando analisado o desempenho dos pacotes somente da modulação OQPSK, o pacote CO é melhor para valores altos de SNR e o pacote AO para valores menores (abaixo de 25 dB, aproximadamente). Isto porque em boas condições de canal acontecem poucas perdas de pacotes e os bits adicionais do pacote de retorno do esquema ARQ gastam energia desnecessariamente. A mesma conclusão é válida para a modulação GFSK, mudando apenas o valor que o pacote CG é mais eficiente em energia que o pacote AG (acima de 30 dB, aproximadamente). Quando a probabilidade de erro de pacote é zero, os pacotes atingem o ponto de saturação, ou seja, a máxima eficiência de energia. Pacotes sem controle de erros atingem $\eta = 1$, enquanto que os outros saturam em valores inferiores a 1, de acordo com a quantidade extra de energia necessária para transmitir/receber o pacote.

As Figuras 3.6 e 3.7 mostram a eficiência de energia para 2 saltos e 32 bytes de dados para OQPSK e GFSK, respectivamente. Com poucos saltos a melhor opção em uma ampla faixa de relação sinal-ruído é usar código CRC para detecção de erros, porém sem retransmissão (CO e CG). Apenas para valores baixos de SNR usar código BCH é a melhor opção, porém também sem retransmissão (CBO e CBG). A diferença entre os dois esquemas de modulação é que para GFSK o código BCH é mais eficiente para valores de SNR abaixo de 10 dB (Figura 3.7), enquanto que para OQPSK torna-se eficiente apenas para valores abaixo de 5 dB (Figura 3.6).

Quando o número de bytes de dados do pacote aumenta, algumas mudanças podem ser verificadas, como mostram as Figuras 3.8 e 3.9. Com 256 bytes de dados usar retransmissão sem código é a estratégia mais eficiente para valores de SNR acima de 5 dB (OQPSK - Figura 3.8) ou 10 dB (GFSK - Figura 3.9). Usar codificação de canal só é mais eficiente para valores baixos de SNR, enquanto que usar código CRC sem retransmissão (CO ou CG) não possui melhor eficiência de energia para nenhum valor de SNR. O principal fator que leva ao desperdício de

energia em sistemas ARQ são os bits adicionais enviados no pacote de retorno usado para confirmar ou não o recebimento de um pacote. Como o número de bits deste pacote de retorno é fixo, quando o tamanho dos dados aumenta, o impacto do número de bits do pacote de retorno já não é tão significativo, fazendo com que a eficiência de energia aumente.

Nos resultados obtidos pode-se observar que para cada condição de canal, número de saltos e tamanho de dados uma determinada técnica de controle de erros apresenta um melhor desempenho. Usar codificação de canal é a melhor opção apenas para valores baixos de SNR e poucos saltos ou também SNR baixa e tamanho de dados grande. As estratégias de controle de erros têm um comportamento semelhante para as duas modulações estudadas, porém o impacto de erros é sempre maior na modulação GFSK, que precisa de um valor de SNR um pouco maior que da modulação OQPSK para atingir o mesmo desempenho.

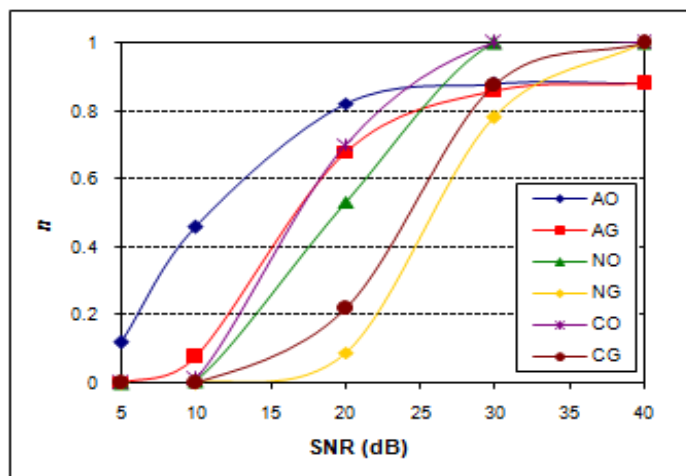


Figura 3.5: Eficiência de energia para 15 saltos, 32 bytes

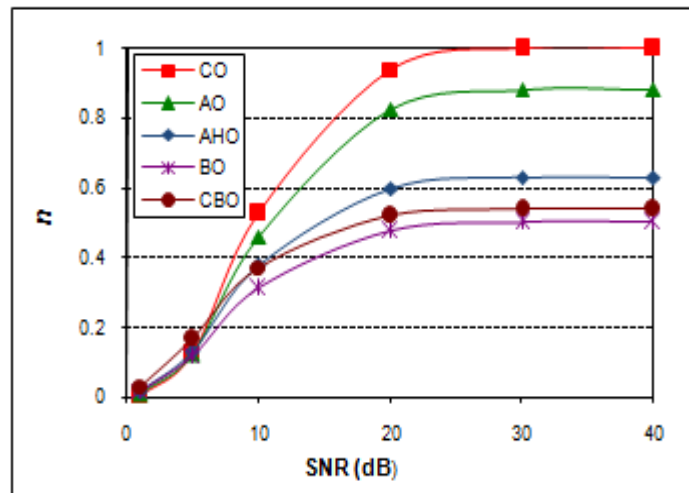


Figura 3.6: Eficiência de energia para 2 saltos, 32 bytes, modulação OQPSK

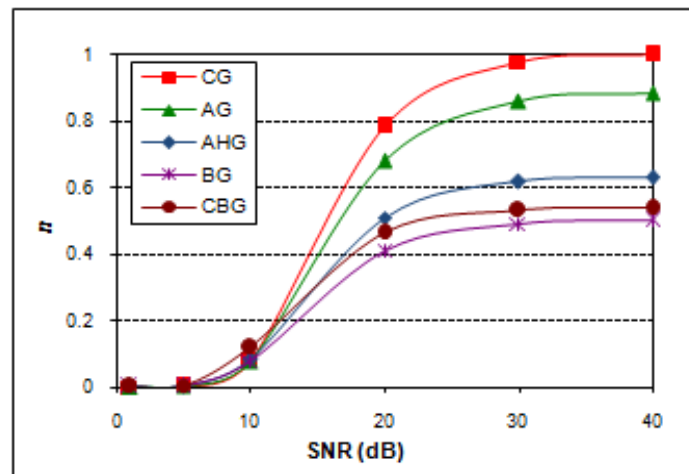


Figura 3.7: Eficiência de energia para 2 saltos, 32 bytes, modulação GFSK

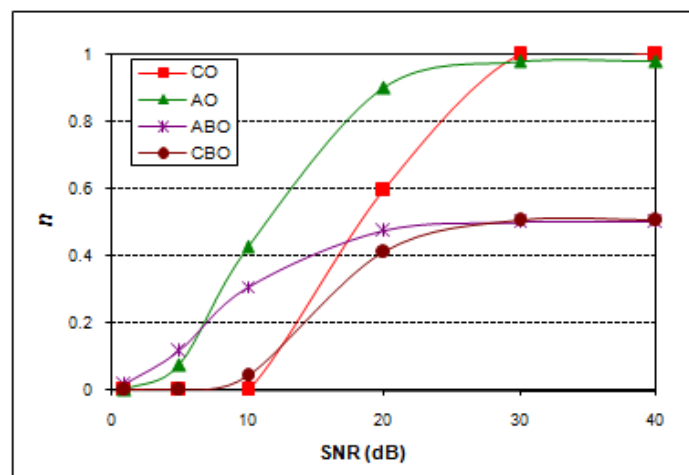


Figura 3.8: Eficiência de energia para 15 saltos, 256 bytes, modulação OQPSK

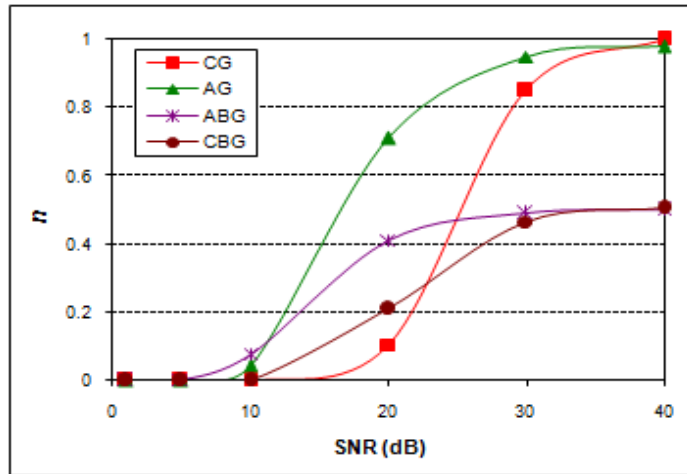


Figura 3.9: Eficiência de energia para 15 saltos, 256 bytes, modulação GFSK

3.4 Modelo de simulação

Para validar o modelo analítico proposto na Seção 3.2, foram implementadas simulações de transmissão e recepção de pacotes em redes de sensores sem fio usando o software Matlab. Os resultados obtidos nesta seção são médias obtidas através de várias simulações. A rede simulada é a mesma da Figura 3.1, onde um sensor deve enviar dados para o coletor. O pacote é gerado pelo sensor, que o envia ao próximo nó. Este nó envia ao próximo e assim sucessivamente, até que o pacote chegue ao seu destino, no coletor.

As probabilidades de erro de pacote são calculadas da mesma forma que a Seção 3.2.1. A diferença é que o envio e recepção de pacotes são feitos através de simulação. A cada pacote enviado/recebido a energia consumida é atualizada, bem como se o pacote foi recebido corretamente ou não. Quando um nó recebe um pacote é verificado se ocorreram erros na recepção. Isto é feito usando a probabilidade de erro de pacote PER_f . É usada uma distribuição uniforme para gerar um número pseudo-aleatório entre 0 e 1. Se este número for maior que a probabilidade erro, o pacote foi recebido corretamente. Se o número gerado for menor que PER_f , o pacote foi recebido com erros. Se não ocorreram erros no pacote ele é enviado ao próximo nó.

Nos pacotes com ARQ, um pacote é enviado ao transmissor indicando o sucesso da transmissão (*acknowledgement*). Se erros forem detectados, três ações podem ocorrer, dependendo do tipo de pacote. Nos pacotes com ARQ é enviado ao transmissor um pacote indicando uma transmissão sem sucesso (*acknowledgement* negativo). Nos pacotes sem ARQ, o

pacote é descartado (com CRC) ou enviado ao próximo nó (sem CRC). É importante ressaltar que o pacote de retorno usado para indicar o sucesso ou não da transmissão também pode ser corrompido, embora não possua dados (apenas o cabeçalho e trailer). As Figuras 3.10 e 3.11 mostram os fluxogramas de simulação para transmissão e recepção de pacotes. A energia consumida E é atualizada a cada transmissão e recepção de pacote, usando o total de bits transmitidos/recebidos e a energia de decodificação. Quando um pacote é recebido com erros e o esquema de controle de erros do pacote não pode corrigir nem solicitar retransmissão, o parâmetro n_{error} é atualizado. No final da simulação a vazão e a eficiência de energia são calculadas. A Figura 3.12 compara os resultados obtidos para os modelos analíticos e de simulação para alguns tipos de pacotes em uma rede com 15 saltos. Os resultados da simulação foram muito próximos dos resultados analíticos, pois a eficiência de energia é quase a mesma para todos os pacotes. Este modelo de simulação será bastante utilizado nos próximos capítulos.

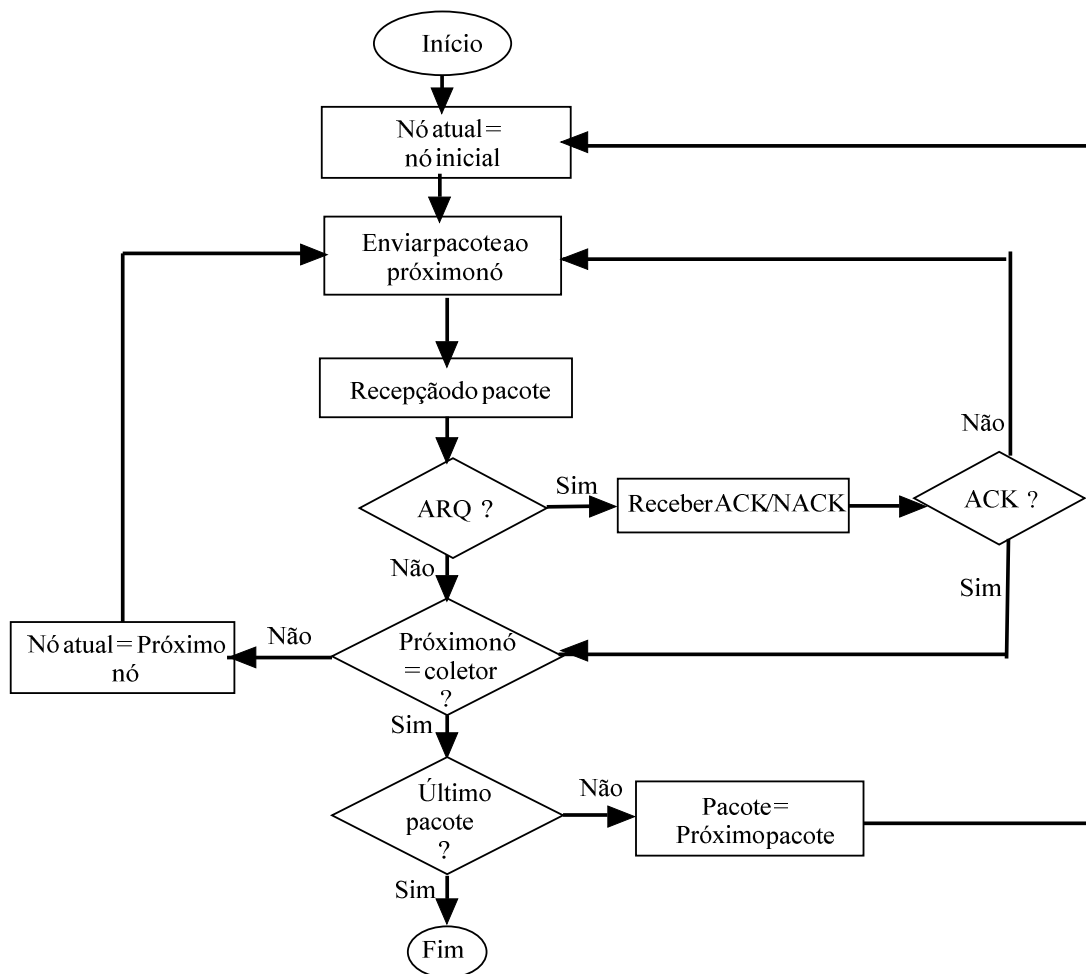


Figura 3.10: Transmissão de pacotes

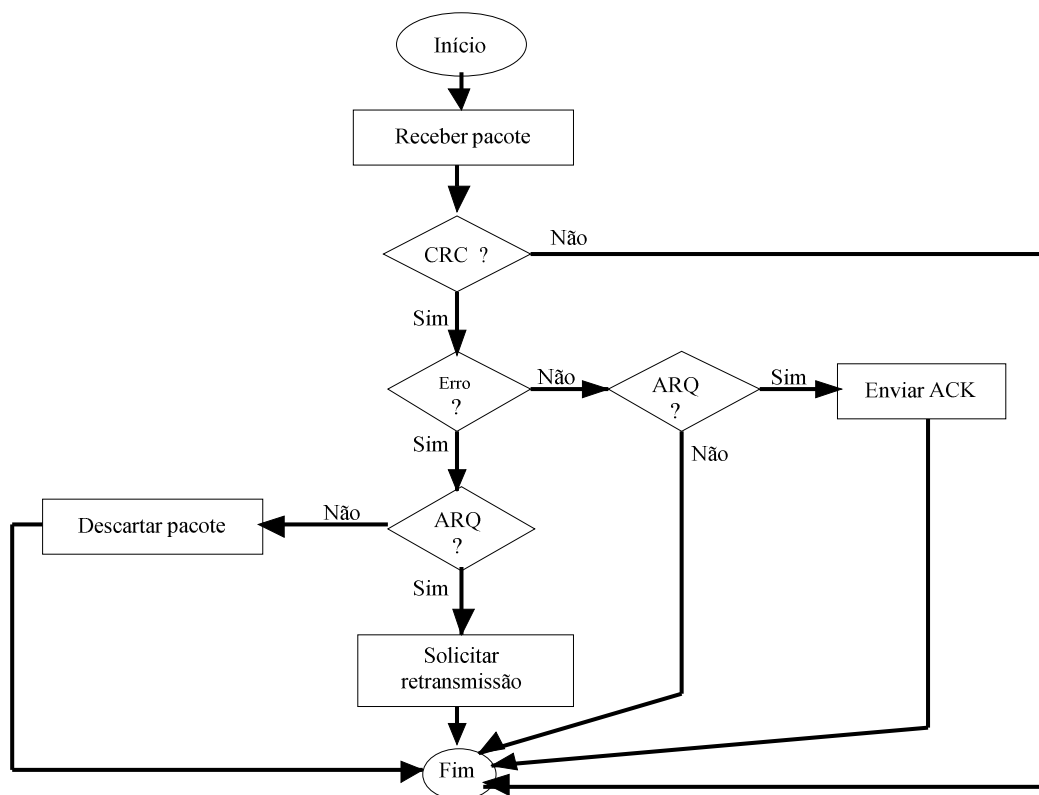


Figura 3.11: Recepção de pacotes

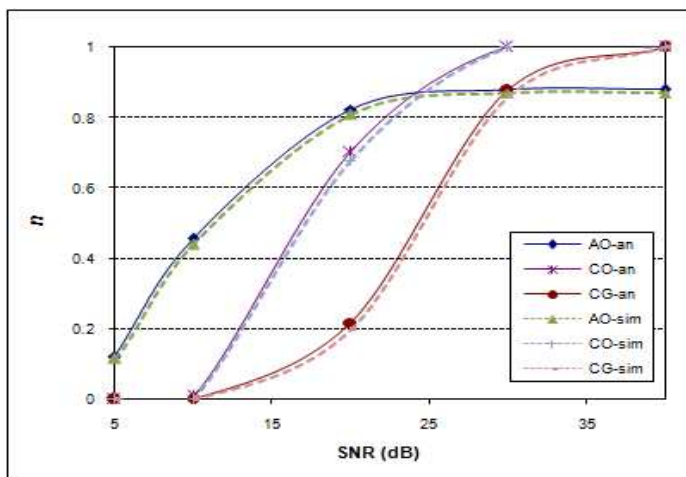


Figura 3.12: Comparação de eficiência de energia para modelo analítico e de simulação

3.5 Conclusão

Neste capítulo foram propostas e analisadas diferentes estratégias de controle de erros para redes de sensores sem fio para as modulações OQPSK, FSK e GFSK. As técnicas estudadas incluem códigos CRC, retransmissão (ARQ), códigos de Hamming e BCH e técnicas híbridas FEC/ARQ. Um modelo analítico foi apresentado para cálculo de probabilidade de erro de pacotes e da métrica de eficiência de energia em canais com desvanecimento Rayleigh. A modulação OQPSK mostrou-se mais eficiente em energia do que as modulações FSK e GFSK, pois tem menor probabilidade de erro de símbolo. Os códigos corretores de erros utilizados apresentam bom desempenho para diminuir a probabilidade de erro de pacote, porém são eficientes em energia apenas para baixos valores de relação sinal-ruído. Usar código CRC para detecção de erros sem retransmissão mostrou-se eficiente para altos valores de SNR e poucos saltos. Usar retransmissão é a melhor opção para redes com muitos saltos e/ou quando o pacote possui um grande número de bytes de dados. Os resultados obtidos podem dar indicações do tipo de modulação e estratégia de controle de erros a ser utilizada numa aplicação de sensoriamento. O modelo apresentado neste capítulo será adaptado para outras modulações e esquemas de controle de erros. No próximo capítulo os modelos analítico e de simulação são aplicados para outros esquemas de controle de erros e duas tecnologias muito utilizadas em redes ad hoc e de sensores: os padrões IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4.

Capítulo 4

Eficiência de Energia para Redes IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4

Os padrões IEEE 802.15 surgiram com a necessidade de definir tecnologias de comunicação sem fio para redes pessoais. Este capítulo adapta o modelo de eficiência de energia do Capítulo 3 para os padrões IEEE 802.15.1 (Bluetooth) e IEEE 802.15.4 (ZigBee). As principais contribuições são a análise das estratégias de controle de erros existentes na especificação, bem como a proposta de novos esquemas. Os resultados obtidos analiticamente e através de simulação para diferentes condições de canal e número de saltos são comparados e discutidos. As publicações relacionadas a este capítulo são: [KBP05], [KBP06], [KBP07] e [KBP08] (Seção 4.1) e [KB06] (Seção 4.2).

4.1 Estratégias de controle de erros para redes de sensores Bluetooth

4.1.1 Controle de erros da especificação Bluetooth

A especificação Bluetooth [Blu01] define sete pacotes de dados (assíncronos), como mostra a Tabela 4.1. Cada pacote consiste de três campos, como pode ser visto na Figura 4.1: o código de acesso, cabeçalho e o *payload*. O código de acesso é usado para sincronização e o cabeçalho possui informações como tipo de pacote, controle de fluxo e confirmação de pacotes. O código de acesso é robusto a erros, pois as palavras de sincronização têm uma distância de

Hamming grande ($d_{min} = 14$). O cabeçalho contém um código de repetição $(n,k)=(3,1)$ para verificação de erros. O payload carrega os bytes de dados, que variam de acordo com o pacote. A maioria dos pacotes é protegida por um esquema de retransmissão ARQ *Stop-and-Wait* baseado em um código CRC. A unidade receptora indica no próximo pacote de retorno (chamado NULL) se houve erro ou não. Os pacotes DMx possuem os dados protegidos por um código de Hamming de taxa 2/3 (15,10). Este código corrige todos os padrões de erros simples e detecta todos os erros duplos numa palavra código.

Tabela 4.1: Tipos de pacotes assíncronos

Pacote	Quadros de tempo	Dados (bytes)	FEC	CRC e ARQ
DM1	1	0-17	Hamming (15,10)	Sim
DH1	1	0-27	Não	Sim
DM3	3	0-121	Hamming (15,10)	Sim
DH3	3	0-183	Não	Sim
DM5	5	0-224	Hamming (15,10)	Sim
DH5	5	0-339	Não	Sim
AUX1	1	0-29	Não	Não

Código de acesso (72 bits)	Cabeçalho (54 bits)	Payload (0-2745 bits)
-------------------------------	------------------------	--------------------------

Figura 4.1: Estrutura de um pacote Bluetooth

4.1.2 Controle de erros personalizado

Além dos pacotes definidos pela especificação com seus respectivos controles de erros, pode-se implementar codificação personalizada utilizando os pacotes AUX1 [VR02]. Usando este pacote, o esquema ARQ é desativado e o dispositivo Bluetooth entrega os bits recebidos independente se eles estão corretos ou não. Enquanto os seis pacotes assíncronos padrão mantêm um enlace confiável com atraso aleatório (que se aproxima de infinito para baixos valores da relação sinal-ruído), o pacote AUX1 provê um enlace não confiável com atraso de um quadro de tempo. Os demais pacotes não permitem que sejam aplicados outros códigos corretores de erro, a não ser que fossem feitas modificações na especificação. Em [VR02] é proposta a utilização de

códigos BCH juntamente com o código CRC para detecção de erros. Neste caso, o ARQ deve ser implementado na camada de aplicação, pois é desativado no dispositivo Bluetooth. A codificação é então implementada transportando no payload um código BCH (232, k). A entrada no codificador BCH consiste dos dados da fonte e dos 2 bytes do CRC. Logo, o número de bits de dados é $K=k-16$.

Neste capítulo são propostas cinco novas modificações no pacote AUX1, que são os esquemas de controle de erros da Seção 3.1 aplicados ao Bluetooth:

- 1) Código BCH sem ARQ com CRC;
- 2) Código BCH sem ARQ e sem CRC;
- 3) Código Hamming sem ARQ com CRC;
- 4) Código Hamming sem ARQ e sem CRC;
- 5) Pacote AUX1 com CRC.

O mesmo código BCH de [VR02] pode ser aplicado, mas sem retransmissão (pacotes BCH2 e BCH3). Embora essa estratégia possa diminuir a confiabilidade e vazão dos pacotes transmitidos, em termos de consumo de energia pode ser útil, pois não é necessário enviar um pacote de retorno para indicar o sucesso da transmissão. O pacote BCH2 utiliza o código CRC para detecção de erros, sem solicitar retransmissão. Um pacote é descartado se o código CRC detectar erros. O pacote BCH3 não usa retransmissão nem CRC. A diferença entre o BCH2 e BCH3 é que no último os pacotes são transmitidos ao próximo nó mesmo se forem recebidos com erros, desperdiçando energia. No pacote BCH2 isso não acontece, mas o pacote tem 16 bits adicionais para implementação do CRC. Outra modificação proposta é usar o mesmo código de Hamming dos pacotes DMx no payload AUX1, mas sem retransmissão e com ou sem CRC (pacotes HAM e HAM2, respectivamente). Outro novo pacote é o AUX2, que é um pacote AUX1 com código CRC. A Tabela 4.2 mostra essas informações para os tipos de pacotes propostos.

Tabela 4.2: Tipos de pacotes com controle de erros personalizado

Pacote	Quadros de tempo	Dados (bytes)	FEC	ARQ	CRC
AUX2	1	0-27	Não	Não	Sim
HAM	1	0-18	Hamming(15,10)	Não	Não
HAM2	1	0-18	Hamming (15,10)	Não	Sim
BCH	1	0-17	BCH (232,156)	Sim	Sim
BCH2	1	0-17	BCH (232,156)	Não	Sim
BCH3	1	0-17	BCH (232,156)	Não	Não

4.1.3 Controle de erros adaptativo

Nem sempre usar o mesmo esquema de controle de erros para toda a rede é a melhor solução. Se em algumas situações não é um grande problema que um pacote se perca, em outras a perda de um pacote pode não ser tolerada. O uso de um esquema adaptativo pode ser implementado para verificar a importância de um pacote e escolher um código eficiente para aquele pacote em particular. No caso do Bluetooth, mudar o tipo de correção de erros significa mudar o tipo de pacote a ser transmitido.

Para determinar a importância de um pacote, e conseqüentemente, o tipo de controle de erros a ser aplicado, é usado o princípio de múltiplos saltos de uma rede de sensores. O nó sensor envia um pacote de dados, contendo a informação de temperatura de um ambiente, por exemplo, para o nó coletor (Figura 3.1). Porém, antes do pacote chegar ao nó coletor, deve passar por outros nós, que podem ser outros sensores ou algum outro tipo de nó com capacidade de roteamento. Se o pacote se perder no primeiro salto, apenas a energia para enviar o pacote do sensor ao nó 1 foi perdida. Se o pacote tiver erros depois que o nó 4 envia ao nó coletor, foi gasta mais energia para enviar o pacote pela rede. Logo, um pacote é mais importante quanto maior o número de saltos que tiver atravessado na rede até o seu destino, no coletor. Então diferentes pacotes Bluetooth podem ser aplicados ao longo do caminho. Um esquema adaptativo deve usar técnicas de controle de erros robustas em pacotes que tiveram mais saltos e técnicas com menor capacidade de correção em pacotes com poucos saltos.

No esquema de controle de erros adaptativo, cada pacote deve manter um contador com o número de saltos que o pacote teve na rede. A cada transmissão ao próximo nó este valor é

incrementado. Isto pode ser implementado como um campo no payload do pacote. Dois esquemas adaptativos são propostos e serão comparados com os esquemas das subseções 4.1.2 e 4.1.3: ADP1 e ADP2. Um pacote com pouco controle de erros é usado nos primeiros saltos e um pacote com melhor controle de erros é utilizado para os saltos restantes da rede. A Tabela 4.3 mostra os tipos de pacotes para esses esquemas. Embora apenas dois esquemas sejam apresentados aqui, outras estratégias adaptativas com diferentes tipos de pacotes também poderiam ser propostos. Os esquemas ADP1 e ADP2 foram obtidos após vários testes de outras possibilidades de pacotes para diferentes saltos. Os resultados de eficiência de energia serão discutidos na Seção 4.3.

Tabela 4.3: Esquemas adaptativos

Esquema	1º e 2º Saltos	3º, 4º e 5º Saltos	Demais Saltos
ADP1	AUX2	HAM2	DH1
ADP2	AUX2	BCH2	DH1

4.1.4 Modelo analítico

Nesta seção é apresentado o modelo analítico para cálculo de probabilidade de erros de pacotes IEEE 802.15.1 e da eficiência de energia. É usado o mesmo modelo da Seção 3.2, fazendo as adaptações necessárias ao padrão. A principal mudança é a estrutura do pacote. Da mesma forma que a subseção 3.2.1, um pacote IEEE 802.15.1 não é aceito quando qualquer um dos cinco eventos acontece:

- (A) o destino falha em sincronizar com o código de acesso do pacote enviado;
- (B) o cabeçalho do pacote enviado está corrompido (depois que o código de repetição é decodificado);
- (C) os dados do pacote enviado estão corrompidos depois que o código de Hamming ou BCH é decodificado, causando a falha na verificação de CRC;
- (D) a fonte é incapaz de sincronizar com o código de acesso do pacote de retorno;
- (E) o cabeçalho do pacote de retorno está corrompido.

A sincronização é feita correlacionando a saída do demodulador com uma cópia gravada do código de acesso. Um pacote é sincronizado se a saída do correlator excedeu um determinado limiar T . O quadro é sincronizado se pelo menos T dos 72 bits do código de acesso forem demodulados corretamente. Neste trabalho é usado $T=65$, mesmo valor usado em [VRR02]. Quanto menor o valor de T maior a probabilidade de o pacote ser sincronizado. A probabilidade de sincronização com o pacote enviado acontece se não há mais que $(72 - T)$ erros no código de acesso recebido:

$$P[\overline{A}] = \sum_{k=0}^{72-T} \binom{72}{k} \cdot [p(\gamma_f)]^k \cdot [1 - p(\gamma_f)]^{72-k}. \quad (4.1)$$

Como o pacote de retorno também tem um código de acesso de 72 bits, o evento D tem a mesma forma,

$$P[\overline{D}] = \sum_{k=0}^{72-T} \binom{72}{k} \cdot [p(\gamma_r)]^k \cdot [1 - p(\gamma_r)]^{72-k}. \quad (4.2)$$

O evento B ou E ocorre se qualquer das oito triplas do código de repetição (3,1) for decodificada incorretamente,

$$P[\overline{B}] = \{3p(\gamma_f)[1 - p(\gamma_f)]^2 + [1 - p(\gamma_f)]^3\}^{18}, \quad (4.3)$$

$$P[\overline{E}] = \{3p(\gamma_r)[1 - p(\gamma_r)]^2 + [1 - p(\gamma_r)]^3\}^{18}. \quad (4.4)$$

O erro mais provável é do tipo C. Para os pacotes DHx, AUX1 e AUX2 ocorre quando qualquer bit dos dados for recebido com erro:

$$P[\overline{C}] = [1 - p(\gamma_f)]^b, \quad (4.5)$$

onde b é o tamanho do payload do pacote em bits. Para os pacotes DMx e HAMx os dados são protegidos por um código de Hamming, onde B é o número de blocos com 10 bits. A probabilidade do evento C para os pacotes DMx e HAMx é:

$$P[\overline{C}] = [15p(\gamma_f)[1 - p(\gamma_f)]^{14} + [1 - p(\gamma_f)]^{15}]^B. \quad (4.6)$$

Os pacote BCHx contém um código BCH (232, 156) que pode corrigir até $t=10$ erros. Então, para os pacotes BCHx a probabilidade do evento C é:

$$P[\overline{C}] = \sum_{k=0}^t \binom{232}{k} \cdot [p(\gamma_f)]^k \cdot [1 - p(\gamma_f)]^{232-k}. \quad (4.7)$$

Bluetooth utiliza modulação GFSK com o produto tempo-largura de banda $BT = 0,5$ e índice de modulação i entre 0,28 e 0,5. Neste trabalho, o valor usado é $i=0,32$. A probabilidade de erro de símbolo $p(\gamma)$ para a modulação GFSK é dada pela equação (3.11).

Neste capítulo, o canal sem fio é modelado usando o desvanecimento Nakagami- m . A distribuição de Nakagami tem sido muito usada para avaliar o desempenho de sistemas de comunicações móveis e sem fio, pois possibilita uma ampla variedade de condições de desvanecimento e tem uma boa aproximação com dados reais de medição [Pro01]. Ela pode ser reduzida para uma distribuição Rayleigh (quando $m=1$) ou modelar condições de desvanecimento mais severas ($m < 1$) ou menos severas ($m > 1$) que Rayleigh. Quando $m \rightarrow \infty$, o desvanecimento de Nakagami converge para um canal AWGN. Para $m \geq 1$, um mapeamento entre o parâmetro m de desvanecimento e o fator K riciano permite uma aproximação da distribuição Rice. A função de densidade de probabilidade de Nakagami [Pro01] é dada por:

$$f(\gamma) = \frac{m^m \bar{\gamma}^{m-1}}{\Gamma(m) \bar{\gamma}^m} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \quad (4.8)$$

onde Γ é a função gama. As probabilidades de erro de pacote do padrão IEEE 802.15.4 podem então ser calculadas usando a equação (4.8) em (3.14) e (3.15), usando para as probabilidades de evento as equações (4.1 - 4.8).

O cálculo da vazão, consumo de energia e eficiência de energia são feitos usando as equações da subseção 3.2.2. A principal diferença a ser observada é na variável n_{bits} , que indica o número total de bits de um pacote. Este valor muda para cada tipo de pacote Bluetooth utilizado, considerando o código de acesso, cabeçalho e payload. Da mesma forma, a variável n_{ack} agora deve ter o número de bits do pacote de retorno (NULL) do padrão.

A eficiência de energia para um esquema adaptativo é calculada usando a equação (3.33), mas a energia E e número de pacote com erros devem ser obtidas de uma outra forma. Para o esquema ADP1 o pacote AUX2 é usado nos dois primeiros saltos, o pacote HAM2 para o terceiro, quarto e quinto saltos e o pacote DH1 para os saltos restantes da rede. A energia total E é a energia consumida pelos diferentes pacotes:

$$E / E_b = E_{aux2} + E_{ham2} + E_{dh1}. \quad (4.9)$$

A energia consumida pelo pacote AUX2 é:

$$E_{aux2} / E_b = \overline{H} \cdot n_{pac} [n_{bits} + 0,75 \cdot n_{bits}] \quad (4.10)$$

onde o número médio de saltos $\overline{H}$ pode ser calculado usando a equação (3.32) com $H=2$ e n_{bits} é o número de bits do pacote AUX2. A energia consumida pelo pacote HAM2 é dada por:

$$E_{ham2} / E_b = \overline{H} \cdot n_{pac} [n_{bits} + 0,75 \cdot n_{bits}] p_{h2}, \quad (4.11)$$

onde $\overline{H}$ é calculado usando a equação (3.32) com $H=3$, n_{bits} é o número de bits do pacote HAM2 e p_{h2} é a probabilidade que o pacote AUX2 chegue corretamente no receptor depois do segundo salto (porque o pacote será descartado se o CRC detectar erros):

$$p_{h2} = (1 - PER_f)^2. \quad (4.12)$$

A energia consumida pelo pacote DH1 é

$$E_{dh1} / E_b = (H - 5) \cdot n_{pac} \cdot \overline{N} [n_{bits} + 0,75 \cdot n_{bits}] p_{h5}, \quad (4.13)$$

onde H é o número de saltos da rede, n_{bits} é o número de bits do pacote DH1 e p_{h5} é a probabilidade que pacote HAM2 chegue corretamente no receptor depois do quinto salto, dada por:

$$p_{h5} = (1 - PER_f)^3 \cdot p_{h2}. \quad (4.14)$$

O número de pacotes transmitidos com erro é a soma dos erros ocorridos nas transmissões dos pacotes AUX2 e HAM2, pois o pacote DH1 será sempre retransmitido até que seja recebido corretamente:

$$n_{error} = n_{error_aux2} + n_{error_ham2}. \quad (4.15)$$

O número de erros do pacote AUX2 é o produto do número total de pacotes transmitidos n_{pac} pela probabilidade de erro do pacote AUX2 em dois saltos:

$$n_{error_aux2} = [1 - (1 - PER_f)^2] \cdot n_{pac}. \quad (4.16)$$

O número de erros do pacote HAM2 tem a mesma forma, mas o número de erros ocorridos no primeiro e segundo saltos usando o pacote AUX2 deve ser subtraído do número total de pacotes transmitidos n_{pac} :

$$n_{error_ham2} = [1 - (1 - PER_f)^3] \cdot (n_{pac} - n_{error_aux2}). \quad (4.17)$$

Então a vazão pode ser calculada pela equação (3.24) e finalmente, a eficiência de energia. Para o esquema ADP2, a energia total E e o número de pacotes com erro podem ser

calculados usando as mesmas equações do esquema ADP1, substituindo o pacote HAM2 pelo pacote BCH2.

4.1.5 Resultados analíticos

Nos resultados desta seção um sensor envia 100.000 pacotes ao coletor ($n_{pac}=100.000$), considerando diferentes números de saltos. Valores maiores de n_{pac} dariam os mesmos resultados. O valor do parâmetro m de desvanecimento Nakagami é $m=1$. O tamanho de dados a ser transmitido é de 17 bytes. Este valor foi escolhido por ser o número máximo de dados que os pacotes DM1 e BCH podem transmitir. Na análise com 17 bytes os pacotes DM3, DH3, DM5 e DH5 não são usados porque estes pacotes com poucos bytes seriam iguais ao DM1 ou DH1. Alguns resultados com tamanhos de dados diferentes foram apresentados em [KBP06].

As Figuras 4.2 a 4.5 mostram os resultados obtidos para eficiência de energia de alguns pacotes em função da relação sinal-ruído para diferentes números de saltos (1, 2, 10 e 25). Apenas os principais pacotes são mostrados nos gráficos. Outros gráficos com diferentes números de saltos e outros pacotes podem ser obtidos, mas estas figuras ilustram bem o comportamento da eficiência de energia dos diferentes esquemas de controle de erros. Também outras métricas podem ser analisadas, como a vazão e o consumo de energia, como apresentado em [KBP05].

Para uma rede com um único salto (Figura 4.2), o pacote AUX1 tem a melhor eficiência de energia para valores de SNR maiores que 15 dB, aproximadamente. Quando a SNR está abaixo deste valor, o pacote BCH3 é o melhor. Para dois saltos (Figura 4.3), o pacote AUX1 ainda é o melhor para altos valores de SNR, mas para aproximadamente 20 dB os esquemas adaptativos ADP1 e ADP2 tem um desempenho muito próximo ao AUX1. Para SNR abaixo de 15 dB o pacote BCH2 tem a melhor eficiência.

Com 10 saltos (Figura 4.4) o desempenho relativo entre os pacotes começa a estabilizar. O pacote AUX1 tem a melhor eficiência de energia para condições de canal acima de 30 dB. Para aproximadamente 30 dB o pacote AUX2 se torna o melhor. O esquema adaptativo ADP2 atinge o maior valor de eficiência de energia quando a SNR está perto de 20 dB e o pacote BCH é o melhor para SNR abaixo de 15 dB. Pode ser observado que quando a qualidade do canal é boa, não é necessário um esquema de correção de erros robusto e os pacotes AUX1 e AUX2 podem

ser utilizados. Se as condições de canal são ruins, um código capaz de corrigir vários erros deve ser usado. Então um pacote BCH é o mais recomendado nestas situações. Para condições intermediárias, os esquemas adaptativos ADP1 e ADP2 têm eficiência de energia maior do que os outros pacotes. O comportamento das diferentes estratégias de controle de erros é aproximadamente o mesmo para 25 saltos (Figura 4.5).

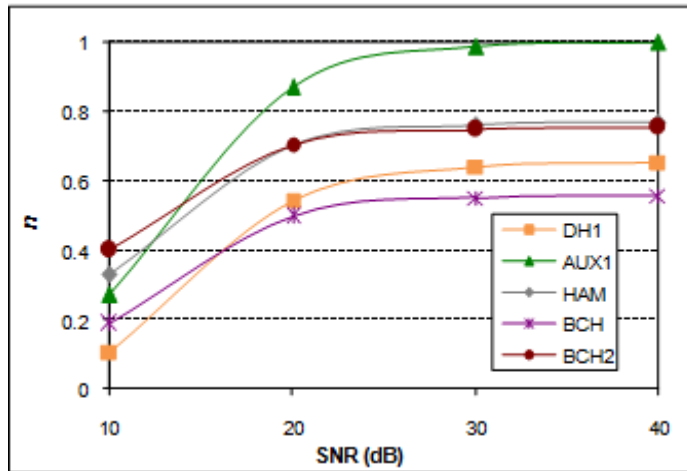


Figura 4.2: Eficiência de energia para 1 salto

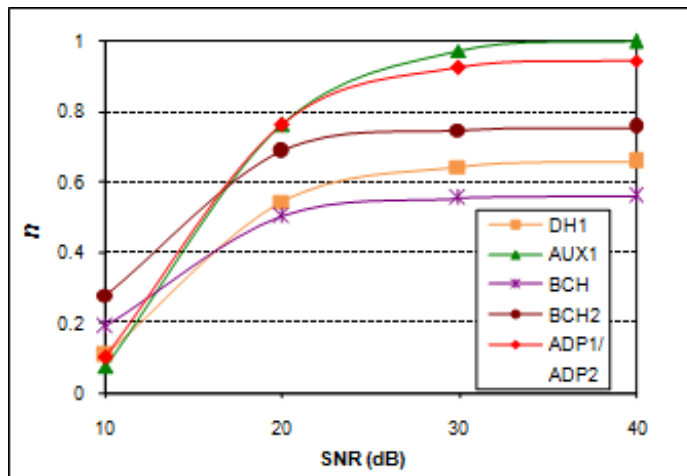


Figura 4.3: Eficiência de energia para 2 saltos

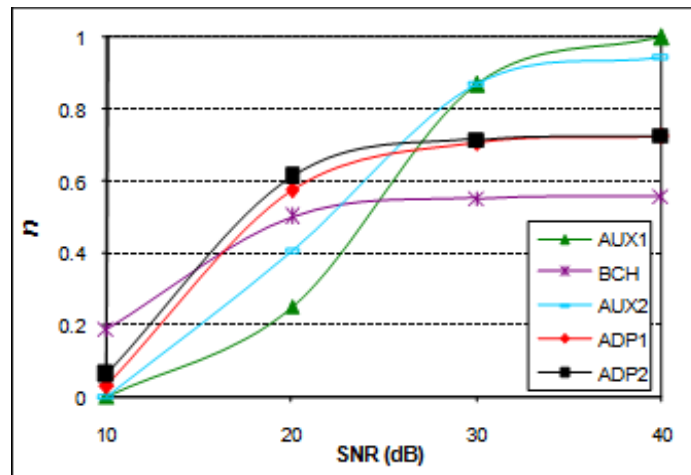


Figura 4.4: Eficiência de energia para 10 saltos

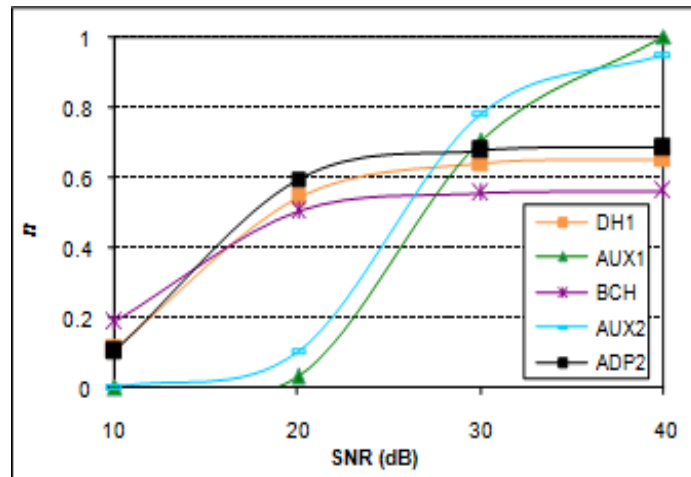


Figura 4.5: Eficiência de energia para 25 saltos

As Figuras 4.6 a 4.8 mostram a eficiência de energia η em função do número de saltos para valores de SNR de 10, 20 e 30 dB. Nestes gráficos podem ser melhor observadas algumas das conclusões tiradas das Figuras 4.2 a 4.5. Os pacotes com melhor eficiência de energia para aproximadamente 30 dB são os pacotes AUX1 e AUX2 (Figura 4.6), para 20 dB os esquemas adaptativos (Figura 4.7) e para 10 dB o pacote BCH (Figura 4.8). A observação mais interessante é que a eficiência de energia dos pacotes com retransmissão é independente do número de saltos. Enquanto que a eficiência para os pacotes sem ARQ varia com a relação sinal-ruído e o número de pacotes, a eficiência de energia dos pacotes DM1, DH1 e BCH varia apenas com a relação

sinal-ruído, permanecendo constante mesmo com o aumento do número de saltos. Esta é uma característica importante dos pacotes ARQ. Outra observação é que os esquemas adaptativos tendem a convergir para o pacote DH1 quando o número de saltos aumenta, já que o pacote DH1 sempre é usado depois do quinto salto.

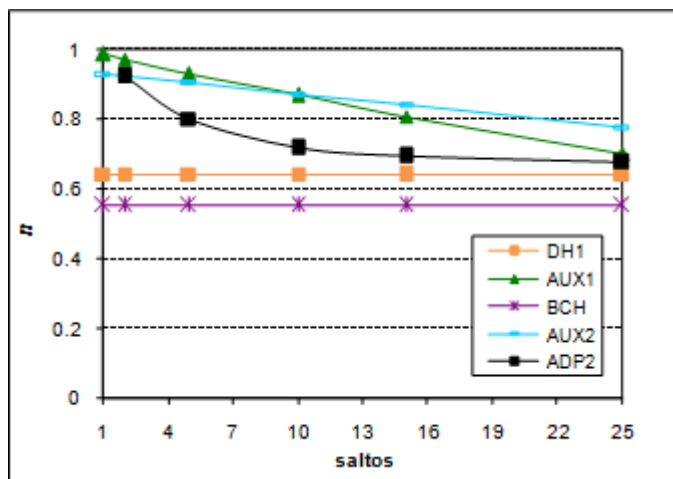


Figura 4.6: Eficiência de energia para 30 dB

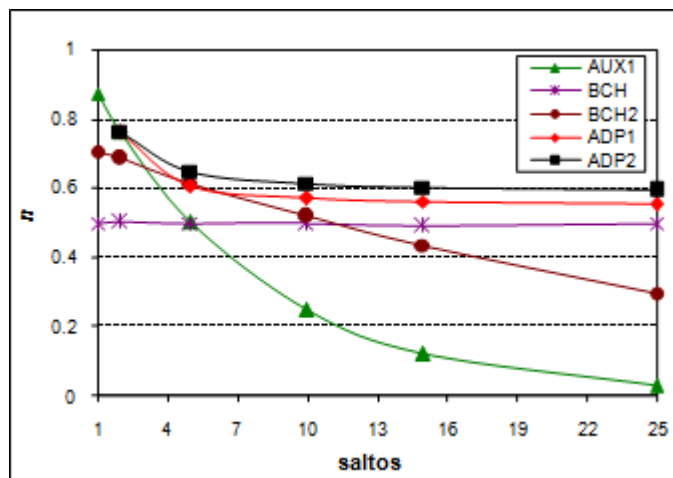


Figura 4.7: Eficiência de energia para 20 dB

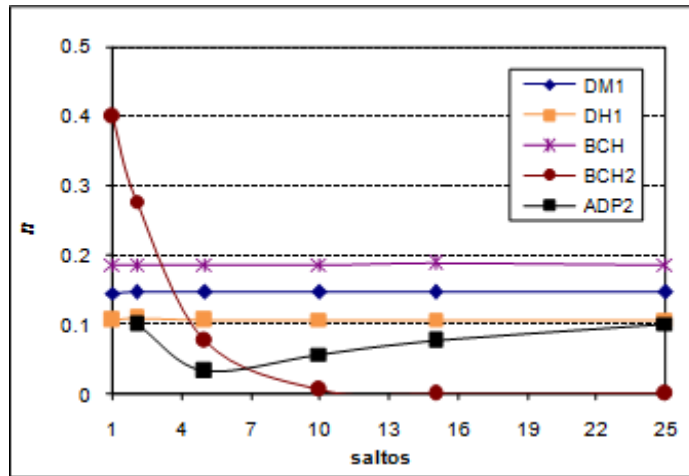


Figura 4.8: Eficiência de energia para 10 dB

4.1.6 Modelo de simulação

Assim como no capítulo 3, também foram implementadas simulações usando o Matlab para comparação com o modelo analítico. A simulação facilita a obtenção de resultados para outros esquemas adaptativos (ver Seção 4.1.8), pois não é preciso deduzir novas equações. A rede simulada é mostrada na Figura 4.9. Cada cluster da figura pode ser considerado como um ambiente com diferentes condições de canal e consequentemente, com diferentes valores de m e SNR para os enlaces. A rede tem 15 saltos do nó sensor até o coletor. Na seção anterior foi visto que a partir de aproximadamente 10 saltos (Figura 4.4) o desempenho relativo entre os pacotes tende a estabilizar. Os resultados são médias obtidas com várias simulações.

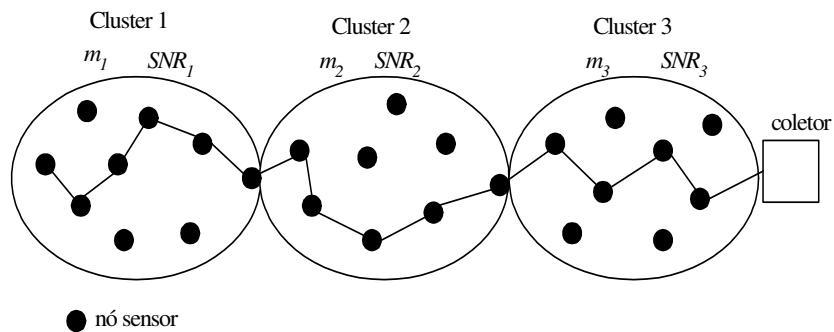


Figura 4.9: Rota de uma rede de sensores com 15 saltos

Está sendo considerado que a *scatternet* Bluetooth foi formada e que a política de escalonamento e rotas também foram definidas, usando protocolos como os propostos em [ME04] e [ZR05]. Os dispositivos Bluetooth devem estar no estado conectado. Assim como no modelo analítico, um sensor envia 100.000 pacotes ao coletor ($n_{pac}=100.000$).

O modelo de simulação é o mesmo da Seção 3.4. A transmissão e recepção de pacotes seguem os fluxogramas das Figuras 3.10 e 3.11. A diferença nesta seção é que o pacote tem a estrutura descrita na especificação Bluetooth. Por exemplo, considere uma transmissão de um pacote DH1, que tem CRC e ARQ. O nó sensor envia o pacote ao próximo nó e então recebe um pacote de retorno. Se o pacote de retorno indica falha na transmissão (*acknowledgement* negativo) o sensor envia o pacote DH1 novamente. Se o pacote de retorno indica que a transmissão foi feita com sucesso (*acknowledgement* positivo) o nó que recebeu o pacote DH1 o enviará ao próximo nó, até que chegue ao destino, no coletor. O processo é repetido para cada pacote. No receptor, o código CRC verifica se o pacote contém erros ou não. Se forem detectados erros, o receptor solicita a retransmissão do pacote DH1. Se não forem detectados erros, o receptor confirma o sucesso da transmissão. Durante a simulação, são atualizados o consumo de energia e perda de pacotes para o cálculo final da eficiência de energia.

A Figura 4.10 mostra os resultados obtidos para os modelos, analítico e de simulação, para alguns pacotes na rede da Figura 4.9 com $m=1$ e 15 saltos. Os resultados de simulação validam o modelo analítico, pois a eficiência de energia obtida é praticamente a mesma para todos os pacotes. O esquema adaptativo ADP2 tem uma diferença um pouco maior, devido às mudanças de pacote nos diversos saltos.

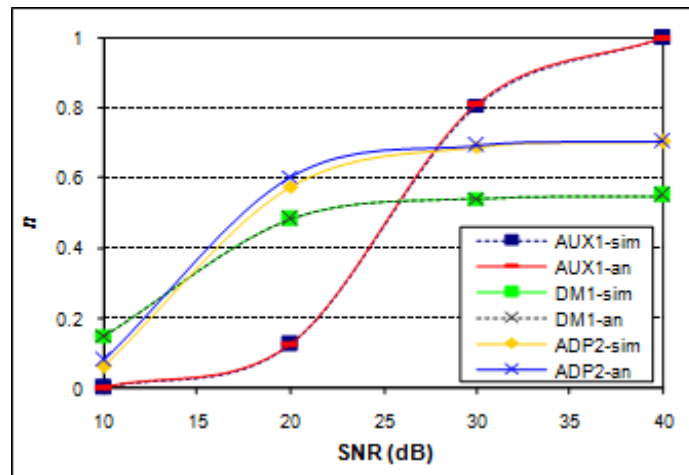


Figura 4.10: Eficiência de energia para os modelos analítico e de simulação do Bluetooth

4.1.7 Resultados para diferentes condições de canal

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram a eficiência de energia dos pacotes da rede da Figura 4.9 para diferentes valores de m usando simulação. Apenas alguns pacotes são apresentados nos gráficos. Quando o parâmetro m é baixo (Figura 4.11), o desvanecimento é mais severo e a eficiência de energia dos pacotes é ruim. Para um valor maior de m (Figura 4.12) a eficiência de energia aumenta para todos os pacotes. No entanto, o desempenho relativo dos pacotes não é o mesmo. Por exemplo, o pacote AUX1 é o melhor pacote para $m=1,5$ e $\text{SNR} > 30$ dB, aproximadamente. Para $m=0,5$ o pacote AUX1 nunca é o pacote mais eficiente em energia. Porém, pode ser observado nas Figuras 4.11 e 4.12 que quando a qualidade do canal é boa, um bom esquema de correção de erros não é necessário e os pacotes AUX1 e AUX2 podem ser utilizados. Para condições intermediárias, o esquema adaptativo ADP2 e o pacote DH1 têm a melhor eficiência. Se as condições de canal são ruins o pacote BCH é o pacote mais eficiente em energia.

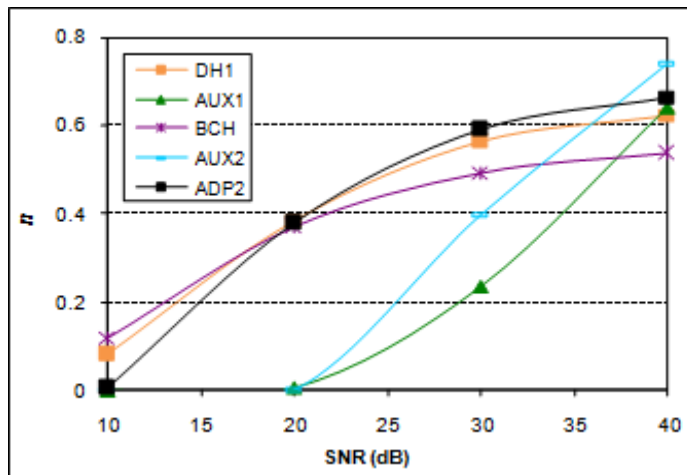


Figura 4.11: Eficiência de energia para $m_1=m_2=m_3=0,5$, 15 saltos

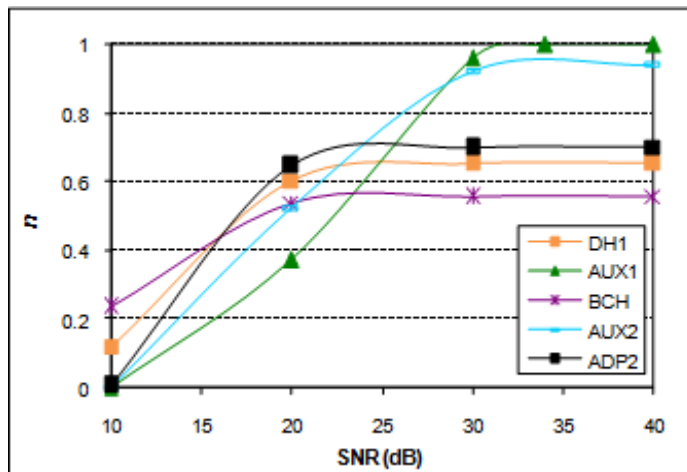


Figura 4.12: Eficiência de energia para $m_1=m_2=m_3=1,5$, 15 saltos

4.1.8 Seleção adaptativa de pacotes usando informação de estado de canal

Os resultados das seções anteriores indicam que para cada condição de canal diferente um pacote específico tem a melhor eficiência de energia. Em redes de sensores operando numa área grande as condições do canal serão diferentes para os nós sensores em diferentes regiões. Por exemplo, um cluster de sensores pode estar numa planície com os sensores próximos uns dos outros enquanto que outro cluster pode estar num terreno mais acidentado e os sensores mais distantes entre si. É claro que no segundo caso as condições do canal sem fio são bem piores.

Assim, é proposto um esquema de seleção adaptativa de pacotes baseado no estado de canal (ADPC). Para cada valor de m e relação sinal-ruído um determinado pacote e, conseqüentemente, um controle de erros diferente, será aplicado.

Para estimar os valores de SNR e m , um método como o proposto em [RCM01] ou [CB02] deve ser usado. Numa rede de sensores com baixa taxa de dados isto não é uma tarefa fácil, porque há poucas amostras de bits para serem usadas nos métodos de estimação. Mas após algumas transmissões de dados, o valor estimado tende a convergir para o valor real. O nó sensor deve possuir esta característica, que é adequado apenas para algumas aplicações de redes de sensores. A energia consumida pelos estimadores para calcular os valores de m e SNR deve ser considerada para uma aplicação real. Neste trabalho, a energia gasta pelos estimadores não foi considerada. Mesmo assim, os resultados podem servir como um padrão se a estratégia de seleção de pacotes for adotada. Se grandes ganhos podem ser obtidos com o esquema ADPC, este pode ser útil mesmo se a energia gasta pelos estimadores for considerada, já que a energia gasta no processamento de instruções é muito menor que a energia gasta na transmissão de informação [RSPS02].

A seleção de pacotes para cada condição e canal é baseada nos resultados das subseções 4.1.5 e 4.1.7. Por exemplo, para $m=1,5$ (Figura 4.12), o melhor pacote para SNR=40 dB e SNR=30 dB é o pacote AUX1, para 20 dB o pacote DH1 e para 10 dB o pacote BCH. A Tabela 4.4 mostra a seleção de pacote para cada caso. Quatro valores de SNR (10, 20, 30 e 40 db) e três valores de m (0,5, 1 e 1,5) foram escolhidos para o esquema ADPC. Estes valores captam desde uma péssima qualidade de canal até condições excelentes de canal. Pela Tabela 4.4, se a medida do estado do canal for aproximadamente $m=1$ e SNR=30 dB o pacote AUX2 será selecionado.

Tabela 4.4: Esquema de seleção de pacotes adaptativo

<i>SNR/m</i>	0,5	1	1,5
10	BCH	BCH	BCH
20	DH1	DH1	DH1
30	DH1	AUX2	AUX1
40	AUX2	AUX1	AUX1

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram a eficiência de energia para a rede da Figura 4.9 para diferentes valores de m_1 , m_2 e m_3 . Todos os resultados nesta seção foram obtidos através de simulação. O modelo analítico poderia ser usado, mas equações adicionais teriam que ser deduzidas para o esquema ADPC. A SNR média é considerada a mesma para todos os enlaces ($SNR_1=SNR_2=SNR_3$). O esquema adaptativo de canal tem a melhor eficiência de energia para todos os casos. Para algumas condições de canal seu desempenho é muito próximo dos outros pacotes, mas em outros casos a diferença é significativa. O esquema ADPC é melhor quando mais trocas de pacotes tem que ser feitas, isto é, quando as condições de canal sofrem bastante variação. Por exemplo, no cenário das Figuras 4.13 e 4.14, o esquema ADPC sempre seleciona o pacote BCH para 10 dB e o pacote DH1 para 20 dB. Neste caso o desempenho é igual aos pacotes BCH e DH1. Para 30 dB o esquema ADPC seleciona o pacote DH1 para $m=0,5$ e o pacote AUX1 para $m=1$, então o ganho na eficiência de energia é maior.

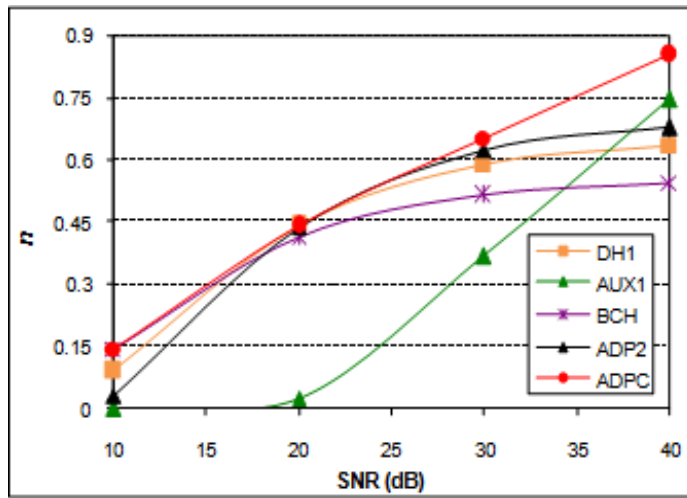


Figura 4.13: Eficiência de energia para $m_1=0,5$, $m_2=0,5$ e $m_3=1,5$

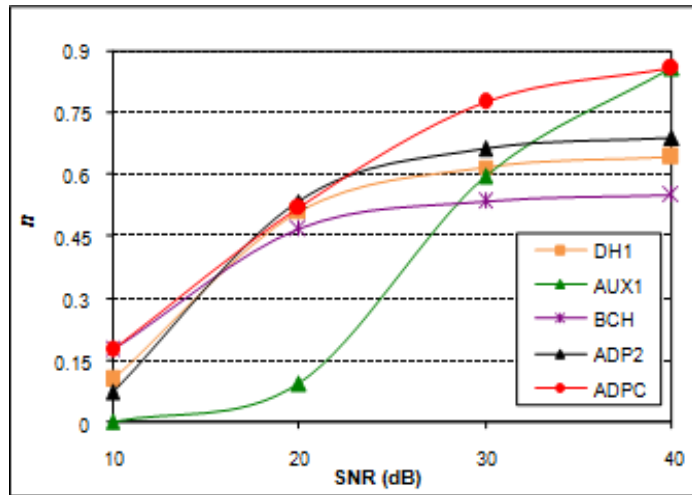


Figura 4.14: Eficiência de energia para $m_1=1,5$, $m_2=1,5$ e $m_3=0,5$

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram a eficiência de energia para diferentes valores de SNR_1 , SNR_2 and SNR_3 e valores fixos de m ($m_1=m_2=m_3$) e a Figura 4.17 para diferentes valores de m e SNR, de acordo com a Tabela 4.5. O esquema ADPC também tem a melhor eficiência de energia para todos esses casos, sendo no mínimo igual ao melhor pacote para determinada condição de canal. O aumento no valor de η do esquema ADPC é maior quando a diferença nas condições de canal dos enlaces é maior. Se o estado de canal é o mesmo para todos os enlaces, como nos resultados apresentados na subseção 4.1.5, a estratégia ADPC terá eficiência de energia igual ao melhor pacote para aquele m e SNR específicos.

Os outros pacotes têm boa eficiência de energia para determinadas condições de canal. O pacote BCH é o melhor pacote para valores baixos de m e SNR, enquanto que o pacote AUX1 tem a melhor eficiência de energia para valores altos de m e SNR. No cenário 1 da Figura 4.17 o pacote BCH e o esquema ADPC têm quase a mesma eficiência de energia. Isto porque neste cenário o canal sem fio é quase o mesmo para cada enlace (as taxas de erros de pacotes PER_f e PER_r para $m=1$, $SNR=10$ e $m=0,5$, $SNR=20$ são muito próximas). O canal no cenário 1 pode ser considerado em condições ruins, pois o pacote BCH tem eficiência de energia mais alta que os outros pacotes. Assim como no cenário 1, no cenário 4 os valores de PER_f e PER_r são quase os mesmos para todos os enlaces. No cenário 4 o esquema ADP2 atinge valores de η um pouco maiores do que o esquema ADPC. Neste cenário a qualidade do canal sem fio tem poucas variações. Nos cenários 2, 3 e 5 o esquema ADPC é superior aos outros pacotes.

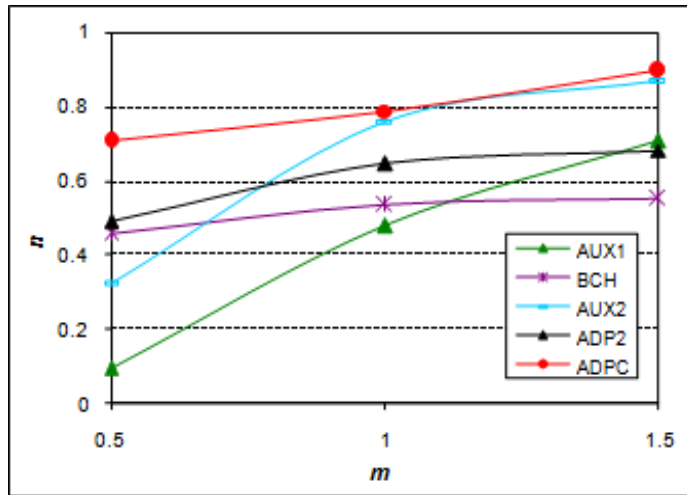


Figura 4.15: Eficiência de energia para $SNR_1=20$, $SNR_2=30$ e $SNR_3=40$ dB

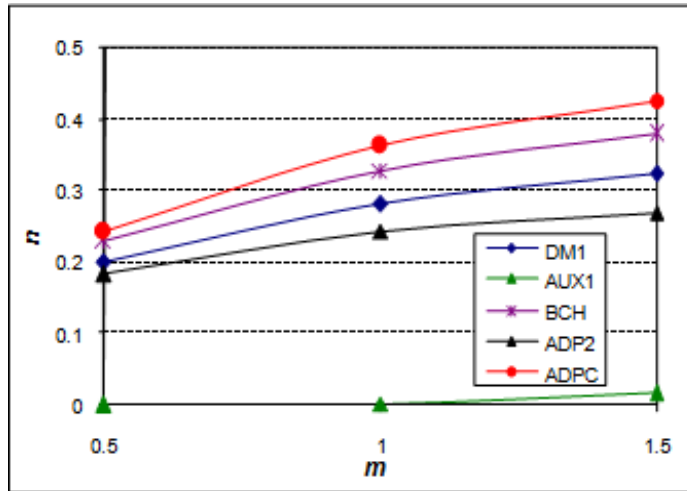


Figura 4.16: Eficiência de energia para $SNR_1=30$, $SNR_2=10$ e $SNR_3=20$ dB

Tabela 4.5: Cenários de rede

Cenário	m_1	m_2	m_3	SNR_1	SNR_2	SNR_3
1	1	0,5	1	10	20	10
2	1,5	0,5	0,5	30	10	30
3	1,5	1	0,5	30	10	20
4	1	0,5	1	20	30	20
5	1,5	1	1,5	30	40	20

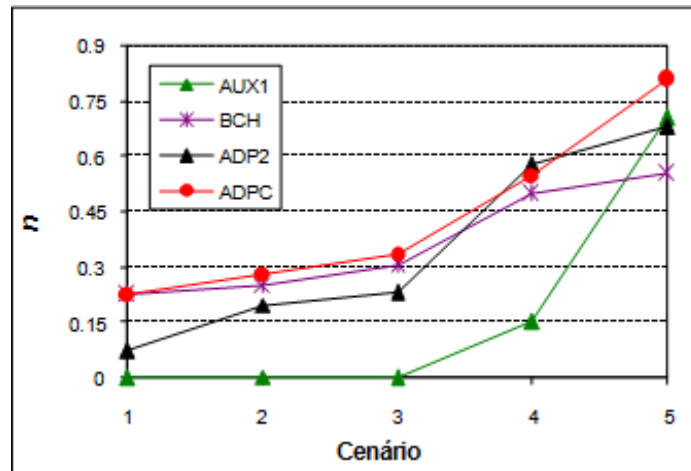


Figura 4.17: Eficiência de energia para diferentes cenários de rede

4.2 Estratégias de controle de erros para redes de sensores IEEE 802.15.4

4.2.1 Controle de erros do padrão IEEE 802.15.4

Alguns estudos têm sido feitos sobre o desempenho [MSM05] e a eficiência de energia [BCDC05] do IEEE 802.15.4, porém não analisam especificamente os esquemas de controle de erros. O padrão 802.15.4 define dois mecanismos para acesso ao meio: *beacon* e *non-beacon*. Neste trabalho é usado o modo *non-beacon*, que utiliza a técnica CSMA-CA. Duas topologias de rede são suportadas: estrela e ponto-a-ponto. Na topologia estrela a comunicação é feita entre os dispositivos e um controlador central, o coordenador da rede. Na topologia ponto-a-ponto, cada dispositivo da rede pode se comunicar com qualquer outro que esteja ao seu alcance.

Cada pacote, chamado de unidade de protocolo de dados PHY (PPDU – PHY *Protocol Data Unit*), contém um cabeçalho de sincronização (5 bytes), um cabeçalho de 1 byte com o tamanho do quadro e a unidade de dados de serviço PHY (PSDU – PHY *Service Data Unit*) de no máximo 127 bytes (Figura 4.18). O quadro PSDU pode ser de 4 tipos: *beacon*, comando MAC, ACK e de dados. O quadro *beacon* só é usado quando a rede está operando no modo *beacon*. O quadro de comando MAC pode ser usado para configuração e controle remoto dos nós. O quadro ACK é usado para informar ao transmissor se o pacote foi recebido com erros ou não. O quadro de dados é onde está o payload com a informação a ser enviada. Todos estes

quadros possuem no PSDU informação de controle de quadro, número de seqüência, endereço (menos o quadro ACK) e ainda um código CRC para detecção de erros. Nenhum tipo de código corretor de erros é suportado pelo padrão.

O uso do esquema de retransmissão disponibilizado pelo padrão é opcional. Um dispositivo que envia um pacote com o campo de requisição de confirmação do pacote igual a 0 deve assumir que a transmissão foi feita com sucesso e não deve fazer o procedimento de retransmissão. Se o campo de requisição de confirmação é igual a 1 o transmissor deve esperar por um tempo máximo para que o quadro ACK correspondente seja recebido. Se o quadro ACK é recebido dentro deste tempo máximo de duração e contém o mesmo número de seqüência de dados da transmissão original a transmissão é considerada completa. Se um quadro ACK não é recebido dentro do tempo máximo ou é recebido com uma seqüência diferente da transmissão original, é considerado que houve erro na transmissão. O dispositivo deve então repetir o processo de transmissão e esperar pelo quadro ACK um número máximo de vezes. Se o ACK não é recebido depois deste número máximo de retransmissões, o dispositivo assume que a transmissão falhou e notifica a camada de rede superior.

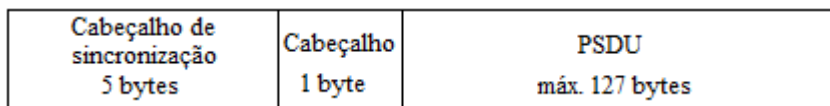


Figura 4.18: Estrutura de um pacote IEEE 802.15.4

Assim como no padrão IEEE 802.15.1, uma codificação personalizada também pode ser implementada no padrão IEEE 802.15.4 no campo payload do PSDU. Então a codificação é implementada transportando no payload um código BCH (232, k). A entrada no codificador BCH consiste dos dados da fonte e dos 2 bytes do CRC. Logo, o número de bits de dados é $K=k-16$. Neste trabalho é proposto o uso de código BCH para correção de erros. O código de Hamming não foi utilizado aqui, pois como verificado nos resultados do capítulo 3, não proporciona aumento na eficiência de energia para a modulação OQPSK. Para diferenciar as diferentes estratégias de controle de erros, foram dados nomes aos pacotes para os diferentes esquemas utilizados e tamanho de dados. Estas informações são mostradas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Tipos de pacotes para o IEEE 802.15.4

Tipo	ARQ	CRC	FEC	Dados (bytes)
A32/64	Sim	Sim	Não	32/64
N32/64	Não	Não	Não	32/64
C32/64	Não	Sim	Não	32/64
AB32/64	Sim	Sim	BCH	32/64
NB32/64	Não	Não	BCH	32/64
CB32/64	Não	Sim	BCH	32/64

4.2.2 Modelo analítico

Nesta seção é apresentado o modelo analítico para cálculo de probabilidade de erros de pacotes IEEE 802.15.4 e da eficiência de energia. É usado o mesmo modelo da Seção 3.2 e que também foi adaptado ao IEEE 802.15.1. Novamente, a principal mudança é a estrutura do pacote. Um pacote recebido não é aceito quando qualquer um dos seis eventos acontece:

- (A) o destino falha na sincronização com o pacote enviado;
- (B) o cabeçalho do pacote enviado está corrompido;
- (C) os dados do pacote enviado estão corrompidos, causando a falha na verificação de CRC;
- (D) a fonte é incapaz de sincronizar com o pacote ACK;
- (E) o cabeçalho do pacote ACK está corrompido;
- (F) os campos do PSDU do pacote ACK estão corrompidos, causando falha na verificação de CRC.

Um pacote é sincronizado se todos os bytes do cabeçalho de sincronização são recebidos corretamente:

$$P[\overline{A}] = [1 - p(\gamma_f)]^{40}. \quad (4.18)$$

Como o pacote ACK também tem um cabeçalho de sincronização de 40 bits, a probabilidade para o evento D tem a mesma forma,

$$P[\overline{D}] = P[\overline{F}] = [1 - p(\gamma_r)]^{40}. \quad (4.19)$$

O evento F ocorre quando qualquer um dos 5 bytes (40 bits) do pacote ACK são recebidos com erro e também é calculado pela equação (4.19). Os eventos B ou E ocorrem se qualquer bit do cabeçalho PHY for recebido com erro:

$$P[\overline{B}] = [1 - p(\gamma_f)]^8, \quad (4.20)$$

$$P[\overline{E}] = [1 - p(\gamma_r)]^8. \quad (4.21)$$

O erro mais provável é o do tipo C. Para os pacotes sem FEC ocorre quando qualquer um dos bits da PSDU é recebido com erros:

$$P[\overline{C}] = [1 - p(\gamma_f)]^b, \quad (4.22)$$

onde b é o tamanho da PSDU em bits. O valor de b depende da informação de endereço do dispositivo e do tamanho dos dados. Neste trabalho é considerado que o campo endereço ocupa o tamanho máximo permitido: 20 bytes. Os pacote com FEC contém um código BCH (232, 156) que pode corrigir até $t=10$ erros. Então, a probabilidade do evento C é:

$$P[\overline{C}] = \sum_{k=0}^t \binom{232}{k} \cdot [p(\gamma_f)]^k \cdot [1 - p(\gamma_f)]^{232-k}. \quad (4.23)$$

O padrão IEEE 802.15.4 usa diferentes tipos de modulação, como visto na seção anterior. Neste artigo é considerada apenas a modulação OQPSK, a mais utilizada por atingir a maior taxa de transmissão. A probabilidade de erro de bit $p(\gamma)$ para a modulação OQPSK é dada pela equação 3.9.

Assim, a probabilidade de erro de pacote do canal direto, PER_f , e reverso, PER_r , podem ser definidas por:

$$PER_f = 1 - \int_0^\infty f(\gamma_f) P[\overline{A}] P[\overline{B}] P[\overline{C}] d\gamma_f, \quad (4.24)$$

$$PER_r = 1 - \int_0^\infty f(\gamma_r) P[\overline{D}] P[\overline{E}] P[\overline{F}] d\gamma_r. \quad (4.25)$$

O canal sem fio é modelado usando desvanecimento Nakagami. Está sendo considerado que o código CRC é capaz de detectar todos os erros e que o número máximo de retransmissões é infinito ($aMaxFrameRetries \rightarrow \infty$). Assim como no padrão IEEE 802.15.1, o cálculo da vazão, consumo de energia e eficiência de energia são feitos usando as equações da subseção 3.2.2. É importante ressaltar que a variável n_{bits} agora deve conter o número de total de bits de cada pacote

da Tabela 4.6, considerando o cabeçalho de sincronização, cabeçalho PHY e PSDU. Da mesma forma, a variável n_{ack} deve ter o número de bits do pacote de retorno.

4.2.3 Resultados

Nos resultados obtidos para eficiência de energia apresentados nesta seção um sensor envia 100.000 pacotes ao coletor ($n_{pac}=100.000$). Apenas um nó sensor transmite de cada vez. O parâmetro de desvanecimento m é igual a 1. Assume-se que a rede IEEE 802.15.4 está formada e operando no modo *non-beacon* com uma rota já estabelecida. São usados os pacotes definidos na Tabela 4.6.

As Figuras 4.19 a 4.21 mostram a eficiência de energia em função da relação sinal-ruído para pacotes com 32 bytes de dados e diferentes números de saltos. Quando a SNR diminui, a eficiência de energia também diminui. No entanto, os diferentes esquemas têm desempenho diferente quando o número de saltos varia. Para 1 salto (Figura 4.19) sempre é mais vantajoso não usar nenhum tipo de retransmissão (N32). Para 5 saltos (Figura 4.20), não usar retransmissão (N32 e C32) tem melhor eficiência de energia quando a SNR está acima de 15 dB. Abaixo desse valor o esquema de retransmissão (A32) tem maior eficiência, pois como a qualidade do canal está pior, algum tipo de controle de erros é necessário. O pacote C32 sempre é melhor que N32. Em redes com múltiplos saltos é mais eficiente usar código CRC para detectar erros e descartar os pacotes errôneos do que não usar nenhum tipo de detecção de erros, pois os pacotes com erro são repassados ao próximo nó, gastando energia desnecessariamente.

Para 25 saltos (Figura 4.21), o uso de retransmissão (A32) tem melhor eficiência de energia para valores de SNR abaixo de aproximadamente 25 dB e acima deste valor o pacote C32. Com o aumento do número de saltos aumenta também a necessidade de controle de erros. Usar código BCH com retransmissão é o mais eficiente em energia apenas para valores de SNR abaixo de 6 dB. A eficiência de energia do padrão IEEE 802.15.4 só se beneficia do uso de códigos corretores de erros para muitos saltos e valores muito baixos de SNR. No entanto, a probabilidade de erro de pacotes diminui e, consequentemente, a vazão aumenta com o uso de FEC.

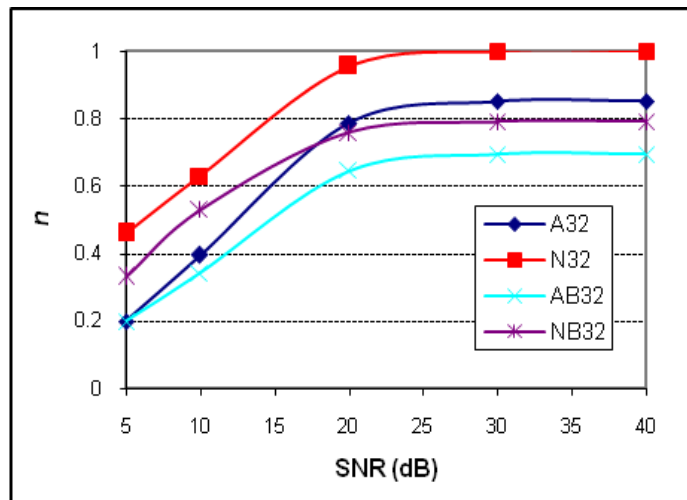


Figura 4.19: Eficiência de energia para 1 salto, 32 bytes

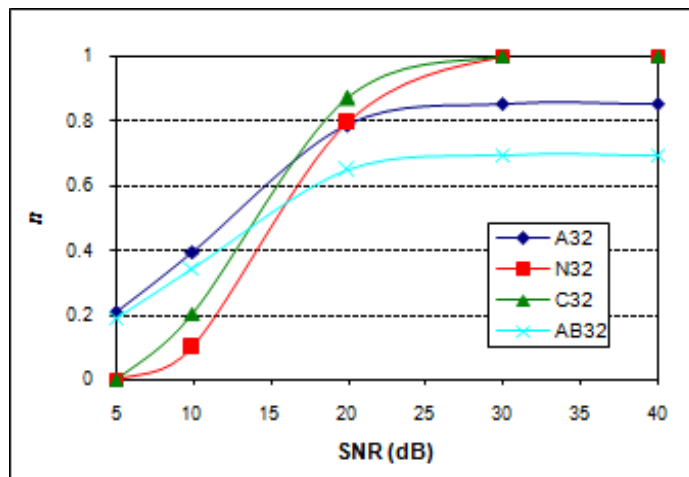


Figura 4.20: Eficiência de energia para 5 saltos, 32 bytes

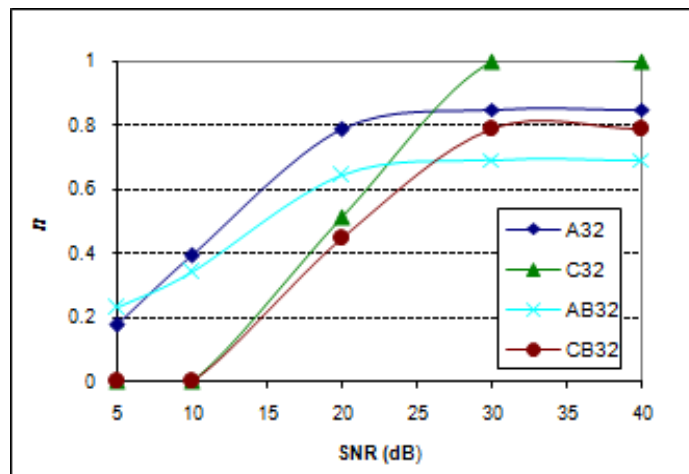


Figura 4.21: Eficiência de energia para 25 saltos, 32 bytes

As Figuras 4.22 a 4.24 mostram a eficiência de energia para pacotes com 64 bytes de dados para 1, 5 e 25 saltos, respectivamente. O desempenho dos esquemas de controle de erros para 64 bytes é muito parecido com os obtidos para 32 bytes. Para poucos saltos e boas condições de canal (SNR acima de 25 dB), a melhor opção é não usar retransmissão (N64). Quando a rede tem mais saltos ou o valor da SNR não é muito alto (abaixo de 20 dB), usar retransmissão tem melhor eficiência de energia. Usar código BCH só mais eficiente para 25 saltos e SNR abaixo de 10 dB (Figura 4.24). A principal diferença entre pacotes com 32 e 64 bytes de dados é que com 64 bytes a estratégia de retransmissão é melhor para uma faixa mais ampla de SNR. Para 5 saltos, por exemplo, o esquema de retransmissão A64 tem a maior eficiência de energia para valores de SNR até 15 dB, para 32 bytes (Figura 4.20), e até aproximadamente 18 dB, para 64 bytes (Figura 4.23).

As Figuras 4.25 a 4.27 mostram a eficiência de energia em função do número de saltos da rede para 10, 20 e 30 dB de relação sinal-ruído. Estes gráficos reforçam as conclusões tiradas das Figuras 4.18 a 4.24. A observação mais interessante é que a eficiência dos pacotes com retransmissão (A32 e AB32) diminui apenas com a SNR, permanecendo constante com o aumento do número de saltos. Enquanto que a eficiência de energia para os demais esquemas (N32, C32, NB32 e CB32) praticamente tende a zero com a degradação da relação sinal-ruído e do número de saltos (Figura 4.27), as estratégias de retransmissão (A32 e AB32) conseguem manter a eficiência de energia em um valor razoável mesmo para uma condição de canal muito severa. Assim como no IEEE 802.15.1, o padrão IEEE 802.15.4 também se beneficiaria de um esquema adaptativo baseado na condição de canal. Baseado nos resultados obtidos e considerando que a partir de 15 saltos o desempenho relativo dos pacotes estabiliza, a seleção de pacotes para redes com vários saltos seria a seguinte: AB32/64 para condições muito ruins de canal, A32/64 para condições intermediárias e C32/64 para um canal com SNR alta.

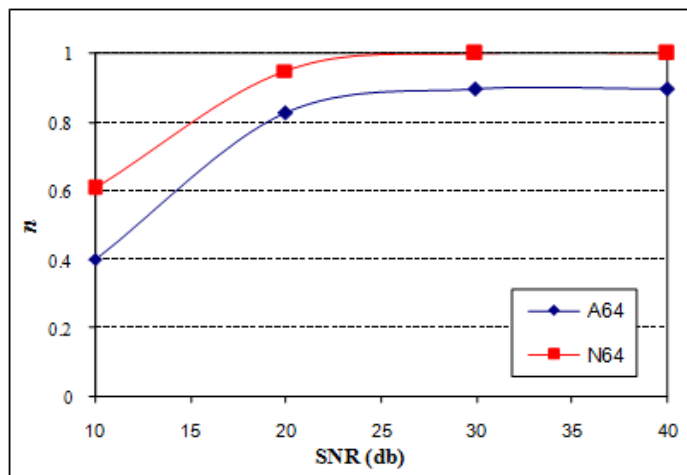


Figura 4.22: Eficiência de energia para 1 salto, 64 bytes

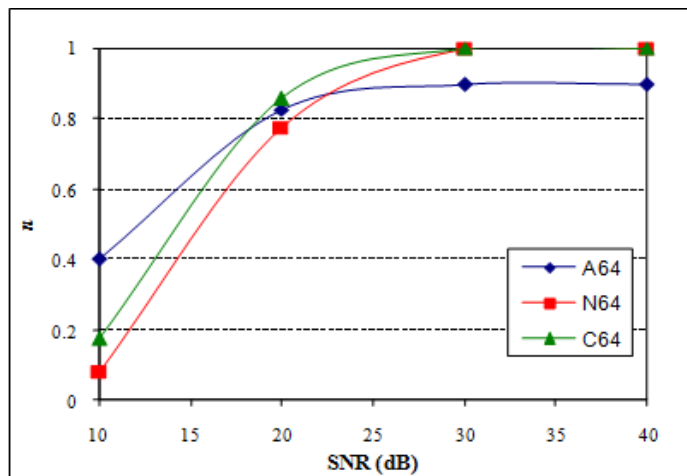


Figura 4.23: Eficiência de energia para 5 saltos, 64 bytes

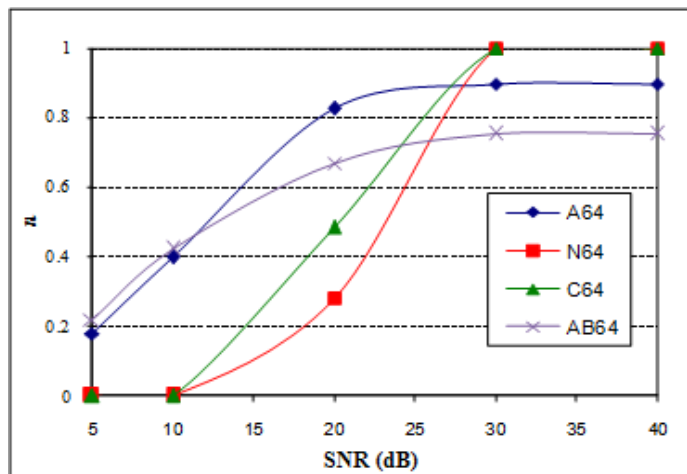


Figura 4.24: Eficiência de energia para 25 saltos, 64 bytes

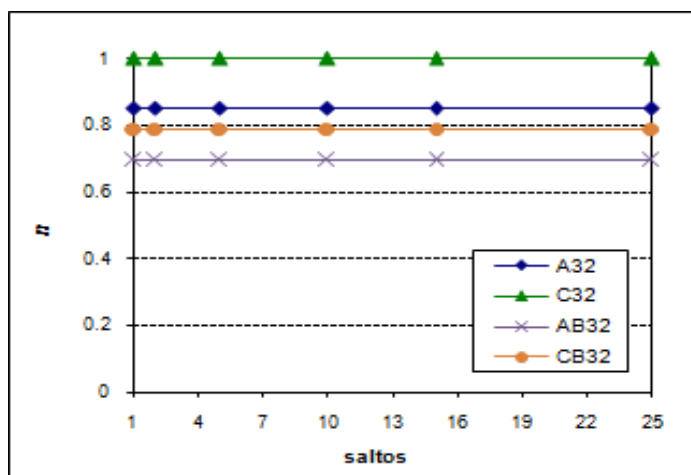


Figura 4.25: Eficiência de energia para 30 dB

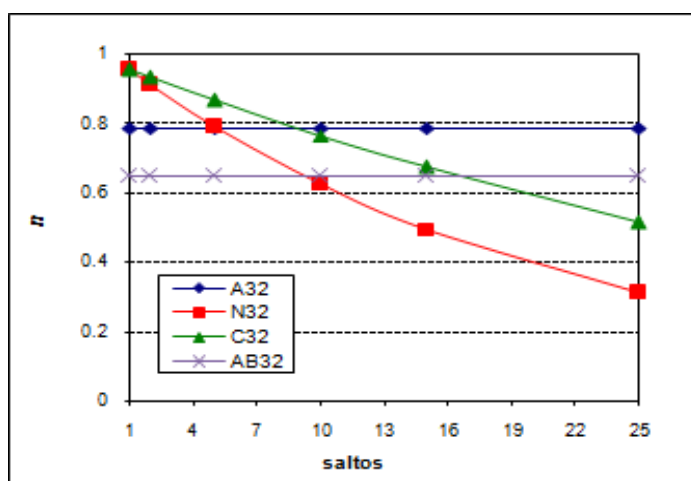


Figura 4.26: Eficiência de energia para 20 dB

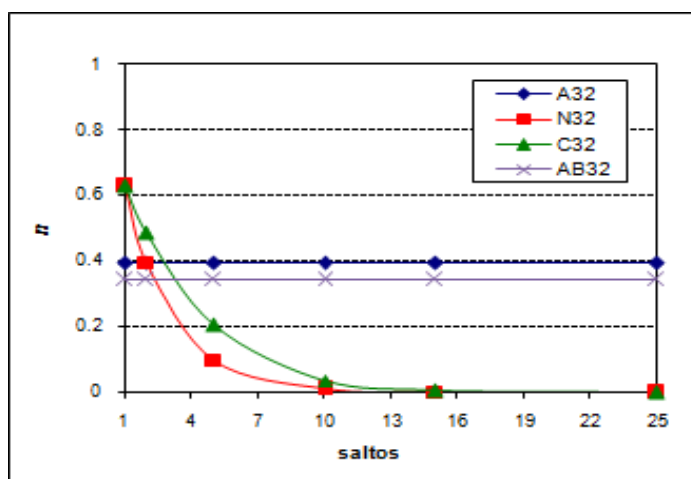


Figura 4.27: Eficiência de energia para 10 dB

4.3 Conclusão

Este capítulo analisou a eficiência de energia de diferentes estratégias de controle de erros para redes IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4. Foram propostos novos esquemas adaptativos de controle de erros. Os resultados mostraram que as condições de canal e o número de saltos afetam o desempenho da rede e dão indicações de qual pacote usar numa aplicação real de sensoriamento. Para o Bluetooth, os pacotes AUX1 (Tabela 4.1) e AUX2 (Tabela 4.2) apresentaram a melhor eficiência de energia para boas condições de canal. Em situações intermediárias, os esquemas propostos ADP1 e ADP2 (Tabela 4.3) tiveram o melhor desempenho e para condições de canal ruins o pacote BCH. Se as condições do canal entre os enlaces sofrem muita variação, o esquema ADPC é a melhor escolha.

As conclusões para o IEEE 802.15.4 são parecidas. Para cada situação de canal, determinada estratégia tem a melhor eficiência de energia: usar código BCH com ARQ em um canal ruim, usar ARQ em condições intermediárias e apenas código CRC em boas condições. Uma diferença importante é que o 802.15.4 se beneficia menos de um código corretor de erros que o 802.15.1. Só para valores muito baixos de m e SNR que fica vantajoso, em termos de eficiência de energia, usar FEC. Isto devido à modulação utilizada, OQPSK, ter probabilidade de erro de bit bem menor que a modulação GFSK. No entanto, se o objetivo for diminuir a probabilidade de erros de pacote e aumentar a vazão, sem considerar o consumo de energia, usar FEC traz grandes vantagens para ambos os padrões. Os modelos e esquemas propostos neste capítulo podem ser adaptados para outras tecnologias de redes de sensores, como o padrão IEEE 802.15.3 [IEE03a].

Capítulo 5

Controle de Erros usando Valor de Informação de Mensagens

Os capítulos 3 e 4 mostraram diversas estratégias de controle de erros visando o aumento da eficiência de energia. Neste capítulo, as técnicas de controle de erros serão aplicadas de forma a aumentar a vazão de pacotes que possuem alto valor de informação. Como ilustração, considere uma rede de sensores responsável pelo monitoramento da qualidade do ar de uma região. Periodicamente deve enviar as medidas de diversas grandezas físicas que auxiliem no monitoramento. Se as variáveis monitoradas permanecem estáveis, a quantidade de informação de uma nova mensagem enviada pelo sensor é pequena. Se acontece uma variação muito rápida em alguma delas, a quantidade de informação é maior, e uma determinada ação pode ser tomada. Esta mensagem contém mais informação do que as outras. Logo, este pacote é mais importante e deve ser transmitido de forma mais confiável, usando um controle de erros mais eficiente. Neste capítulo são propostas duas abordagens para calcular o valor de informação de um pacote: baseadas na área de cobertura dos sensores e entropia. Baseadas neste valor de informação, são propostas estratégias de controle de erros adaptativas. Parte dos resultados deste capítulo foram publicadas em [KB08a] e [KB08b].

5.1 Valor de informação

Considere um sensor de temperatura numa determinada região. Se a temperatura se mantém constante, a quantidade de informação carregada pelo pacote é pequena, pois a probabilidade de ocorrência deste evento é grande. Mas se há uma variação brusca na temperatura a quantidade de informação aumenta, devido à probabilidade de ocorrer uma variação grande ser menor. Se um sensor é o único a observar determinada área ele contribui com mais informação do que um sensor que está numa área coberta por vários sensores. Um sensor que reporta um início de incêndio contribui com bastante informação, pois este é um evento inesperado. Logo, deve-se usar um controle de erros mais eficiente nas mensagens com maior valor de informação. A melhor maneira de quantificar o valor de informação é ter conhecimento da aplicação da rede. Como as redes de sensores têm inúmeras aplicações, o valor de informação varia para cada uma delas. Nesta seção é proposto um método para cálculo do valor de informação que pode ser usado e adaptado para diversas aplicações.

A definição do valor de informação não é uma tarefa fácil sem conhecimento específico da aplicação [KKL05]. Uma rede de sensores que monitora condições atmosféricas, por exemplo, tem características diferentes de uma rede que monitora a qualidade da água de um rio. Alguns métodos de quantificar a informação são baseados em medidas de contagem, área ou entropia. Medir o valor de informação baseado em contagem pode ser definido como número de leituras de sensores agregadas em um pacote. Esta abordagem é fácil de calcular e não precisa de nenhuma informação adicional da rede. Quando um sensor 1 envia uma leitura de dados para um sensor 2, o valor de informação V é 1. Se o sensor 2 agregar no pacote a sua leitura de dados, o valor de informação passa a ser 2. Se o sensor 2 apenas repassar a informação do sensor 1 para o próximo nó, o valor de informação continua sendo 1. A cada agregação de dados V é aumentado em uma unidade. Essa foi a abordagem utilizada em [KKL05] para cálculo de V .

No entanto, a medida do valor de informação baseada em contagem possui desvantagens. Se os sensores estão distribuídos aleatoriamente numa região, algumas áreas podem ser observadas por muitos sensores e outras por poucos sensores. A Figura 5.1 mostra um caso onde os sensores não estão distribuídos de maneira uniforme. A rede possui oito sensores, porém cinco cobrem uma região pequena e apenas três cobrem outra região de área maior.

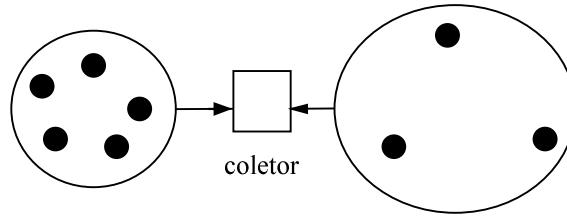


Figura 5.1: Rede com sensores distribuídos de forma desigual

Se a medida de V baseada em contagem fosse usada, o lado esquerdo da rede da Figura 5.1 contribuiria com mais informação. No entanto, isto não é verdade, pois o lado direito cobre uma região maior com menos sensores e isso deveria influenciar o valor de informação. Uma opção para este problema é medir o valor V baseado na área observada pelos sensores. A primeira proposta desta seção para cálculo de V é usar o conceito de densidade espacial, definida pelo número de sensores n_s numa dada área A :

$$d_s = \frac{n_s}{A}. \quad (5.1)$$

O valor de informação V_k da k -ésima medida de um sensor é dado por:

$$V_k = \frac{1}{d_s}. \quad (5.2)$$

Por exemplo, considere uma região de área 100 m^2 sendo monitorada por 50 sensores. A área total é dividida em sub-áreas que são monitoradas por uma determinada quantidade de sensores. Se a sub-área 1 de 20 m^2 é coberta por 5 sensores, $d_{s1} = n_{s1}/A_1 = 5/20 = 0.25$. Uma sub-área 2 de 15 m^2 monitorada por 20 sensores tem $d_{s2} = n_{s2}/A_2 = 20/15 = 1.33$, e assim por diante. Quanto mais sensores estiverem cobrindo uma área, maior será a densidade espacial e menor o valor de V . Um controle de erros mais robusto será aplicado quando V for alto e menos controle de erros quando V for baixo.

As medidas baseadas em área tentam calcular a informação adicional que um sensor contribui e tem a desvantagem de necessitarem de informação geográfica. Medidas do valor de informação baseadas em entropia são provavelmente as melhores medidas, porque tentam calcular precisamente este valor de informação adicional [KKL05]. Essa afirmação é feita em [KKL05], mas nenhuma medida baseada em entropia é proposta pelos autores, que usaram apenas a medida baseada em contagem. A segunda proposta de cálculo de valor de informação

nesta seção é usar o conceito de entropia. De acordo com a teoria da informação [Skl95], a quantidade de informação pode ser calculada usando a probabilidade de ocorrência de evento. O valor de informação V_k da k -ésima medida de um sensor é calculado da mesma maneira:

$$V_k = I_k = \log_2 \frac{1}{p_k}. \quad (5.3)$$

onde p_k é a probabilidade de ocorrência do evento k , ou seja, a probabilidade que a k -ésima medida tenha determinado valor X_k .

Deve-se agora definir como calcular a probabilidade de tal evento. Seja X_k o valor da k -ésima medida do sensor e X_{k-1} o valor da medida anterior. A variação Δ é dada por:

$$\Delta = |X_k - X_{k-1}|. \quad (5.4)$$

Um sensor de qualquer grandeza física como temperatura, pressão, umidade, dentre outras, tem um valor mínimo l_{min} e um valor máximo l_{max} que pode medir desta grandeza. Pode-se então definir a faixa de operação F_o do sensor:

$$F_o = l_{max} - l_{min}. \quad (5.5)$$

Logo, a probabilidade de ocorrência de um evento p_k será dada pela variação Δ em relação a faixa de operação:

$$p_k = \frac{F_o - \Delta}{F_o}. \quad (5.6)$$

O valor da probabilidade p_k será mais próximo de 1 (um) quando houver uma pequena variação da grandeza medida e mais próximo de 0 (zero) quando houver uma grande variação no valor medido pelo sensor. O valor de informação V_k aumenta quanto menor for o valor da probabilidade p_k . Logo, será maior quanto maior for a variação no valor da grandeza física na k -ésima medida em relação a medida anterior. Assim como na medida baseada em área, um controle de erros mais robusto deve ser aplicado quando V for grande e um controle de erros mais fraco quando V for pequeno.

5.2 Controle de erros adaptativo usando valor de informação

De acordo com o valor de informação V , uma proteção de erros diferente será escolhida para a mensagem. Quanto maior o valor de V , maior deve ser a capacidade de correção de erros. Existe uma relação entre o valor de informação e a proteção escolhida $V \rightarrow P(V)$. O problema está em como fazer este mapeamento, já que as propriedades de P não são conhecidas. Basicamente, pode ser feito de três maneiras: usando uma função, heurística ou tabela.

Usar uma função poderia ser uma solução. Esta função receberia como parâmetro o valor V e retornaria o valor de proteção P desejado, indicando que deveria ser usado um código com capacidade de correção de P erros, por exemplo. No entanto, encontrar uma função adequada não é uma tarefa simples. Outra opção é usar uma heurística para aumentar a proteção P de acordo com uma regra local do nó sensor, que considere a relação custo-benefício do consumo de energia/confiabilidade.

A última opção é usar tabelas que façam o mapeamento $V \rightarrow P(V)$. Para cada valor ou faixa de valores V , determinada proteção de erros é aplicada. Esta é a abordagem utilizada nesta seção para escolher o controle de erros. Cada aplicação pode ter uma tabela diferente, de acordo com as suas necessidades. Antes do nó sensor enviar os dados, calcula o valor de informação V e procura na tabela a proteção P correspondente. Esse é o controle de erros a ser utilizado no pacote. São usados dois tipos de controle de erros: códigos BCH e retransmissão (ARQ).

Para o controle de erros adaptativo usando valor de informação baseado em área, foram definidos três tipos de regiões:

- 1) Região muito densa: $d_s \geq 1$;
- 2) Região densa: $0,5 < d_s < 1$;
- 3) Região pouco densa: $d_s \leq 0,5$.

Cada pacote de dados originado por um sensor de uma região terá um controle de erros diferente, baseado na densidade espacial d_s . O sensor deve ter essa informação geográfica. Baseado na densidade d_s , o valor de informação V pode ser calculado. Três esquema adaptativos são propostos, usando códigos BCH, ARQ e híbrido (BCH/ARQ), como mostra a Tabela 5.1. Quanto maior o valor de V , mais robusta deve ser a correção de erros. No código BCH, isto é feito aumentando a capacidade de correção de erros t . Para ARQ, é feito aumentando o número

máximo de retransmissões. Achar o mapeamento ótimo $V \rightarrow P(V)$ não é uma tarefa trivial. Foram feitas várias simulações com diferentes estratégias. Os resultados foram analisados e os esquemas adaptativos foram sendo melhorados baseados nesses resultados obtidos, até chegar aos esquemas da Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Controle de erros adaptativo para V baseado em área

Valor de informação	Controle de erros		
	BCH adaptativo	ARQ adaptativo (retransmissões)	BCH/ARQ adaptativo (código / retransmissões)
$V \leq 1$	sem código	1	BCH (127,120,1) / 1
$1 < V < 2$	BCH (127,99,4)	5	BCH (127,106,3) / 4
$V \geq 2$	BCH (127,64,10)	10	BCH (127,64,10) / 10

Para o controle de erros adaptativo usando valor de informação baseado em entropia, foram definidas dez faixas de valores de informação onde serão aplicadas diferentes estratégias de controle de erros. Estas faixas de V indicam de pequenas a grandes variações na grandeza física medida. Aplicações específicas podem definir valores diferentes. No controle adaptativo com código BCH, para cada faixa de valores V mostrada na Tabela 5.2 a capacidade de correção t também aumenta em 1. Para ARQ, o número máximo de retransmissões também aumenta em 1, até o máximo de 10 retransmissões. Para o esquema adaptativo híbrido BCH/ARQ, foram feitas várias simulações até chegar no esquema da Tabela 5.1, que apresentou bons resultados (discutidos na próxima Seção). Esta tabela mostra o mapeamento usado neste trabalho. Cada aplicação pode fazer o seu ajuste para $V \rightarrow P(V)$. Tanto o cálculo de V quanto a escolha do esquema de correção de erros pode ser feita localmente pelo nó sensor. Esta estratégia adaptativa de acordo com V_k não garante a confiabilidade de entrega de cada pacote, mas tenta garantir a confiabilidade de evento. Eventos importantes da rede, como mudanças bruscas na grandeza física medida terão sua vazão aumentada.

Tabela 5.2: Controle de erros adaptativo para V baseado em entropia

Valor de informação	Controle de erros		
	BCH adaptativo	ARQ adaptativo (retransmissões)	BCH/ARQ adaptativo (código / retransmissões)
$0 \leq V < 0,0145$	sem código	1	BCH (127,120,1) / 1
$0,014 \leq V < 0,029$	BCH (127,120,1)	2	BCH (127,120,1) / 1
$0,029 \leq V < 0,059$	BCH (127,113,2)	3	BCH (127,120,1) / 1
$0,059 \leq V < 0,120$	BCH (127,106,3)	4	BCH (127,106,3) / 4
$0,120 \leq V < 0,217$	BCH (127,99,4)	5	BCH (127,106,3) / 4
$0,217 \leq V < 0,321$	BCH (127,92,5)	6	BCH (127,106,3) / 4
$0,321 \leq V < 0,514$	BCH (127,85,6)	7	BCH (127,64,10) / 10
$0,514 \leq V < 0,731$	BCH (127,78,7)	8	BCH (127,64,10) / 10
$0,731 \leq V < 1$	BCH (127,71,9)	9	BCH (127,64,10) / 10
$V \geq 1$	BCH (127,64,10)	10	BCH (127,64,10) / 10

5.3 Resultados para valor de informação baseado em área

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos através do modelo de simulação apresentado no Capítulo 3. Os pacotes são enviados dos nós sensores diretamente para o coletor (1 salto). As simulações foram feitas com os seguintes parâmetros: modulação OQPSK, canal Rayleigh, $n_{pac}=100.000$, pacotes com 24 bits de cabeçalho, 8 bits de trailer e 120 bits de dados. A rede de sensores simulada possui três regiões com densidades espaciais diferentes. Uma região R_1 possui $d_{s1} \geq 1$; região R_2 com $0,5 < d_{s2} < 1$ e R_3 com $d_s \leq 0,5$, caracterizando regiões muito densas, densas e pouco densas. O valor de n_{pac} é o total de pacotes das três regiões, sendo que cada região gera 1/3 desse total.

As Figuras 5.2 a 5.7 apresentam os resultados obtidos. A Figura 5.2 compara a vazão para pacotes com valor de informação $V \geq 2$ de diferentes esquemas usando código BCH, BCH adaptativo e BCH/ARQ adaptativo (de acordo com a Tabela 5.1). Estes pacotes são os que contém informações mais importantes. Pode-se observar que a vazão é maior quando usada a estratégia BCH/ARQ adaptativo. Para uma relação sinal-ruído de 5 dB, por exemplo, um pacote

sem correção de erros teria pouco mais de 30% de chances de ser recebido corretamente no coletor. Com BCH adaptativo, a vazão normalizada aumenta para mais de 50% e para o BCH/ARQ adaptativo para mais de 90%. Para valores altos de SNR, acima de 20 dB, a vazão de todas as estratégias é muito parecida por existirem poucos erros no canal. A Figura 5.3 mostra a vazão para pacotes com valor de informação $V_k \geq 2$ de diferentes estratégia ARQ. Foram usadas estratégias com no máximo 2 retransmissões (ARQ-2), 5 retransmissões (ARQ-5), esquema ARQ adaptativo e esquema BCH/ARQ adaptativo. Os dois esquemas adaptativos são os que possuem a melhor vazão.

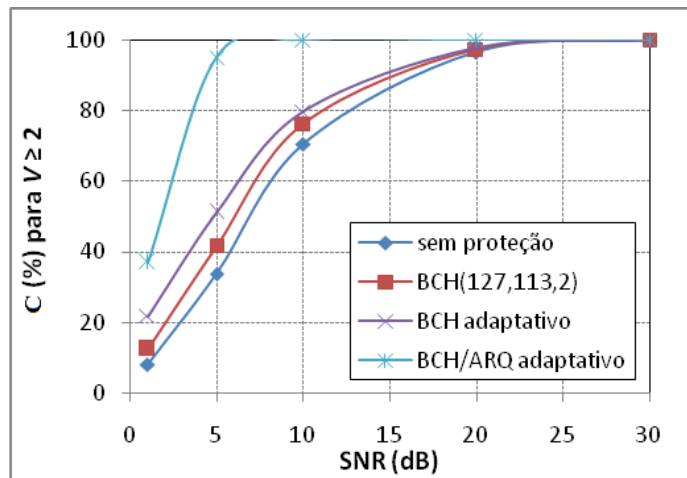


Figura 5.2: Vazão de esquemas BCH para $V \geq 2$

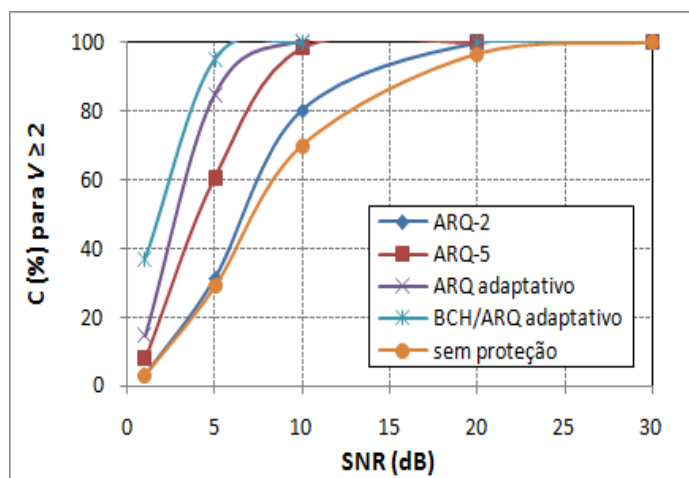


Figura 5.3: Vazão de estratégias ARQ para $V \geq 2$

No entanto, os esquemas adaptativos têm um consumo de energia maior, como pode ser visto nas Figuras 5.4 e 5.5. Esta energia é a energia total consumida na rede, incluindo os pacotes com qualquer valor V . A vantagem do BCH adaptativo é aumentar a vazão de pacotes com V alto sem aumentar de forma muito significativa o consumo de energia, se comparado com o código BCH com $t=2$, por exemplo. O esquema BCH/ARQ adaptativo tem um consumo de energia bem maior que as demais estratégias para valores baixos de SNR neste cenário de simulação. Porém, o consumo de energia dos esquemas adaptativos é dependente da porcentagem do total de pacotes (n_{pac}) que possuem V alto. Se poucos pacotes tiverem $V \geq 2$, o consumo de energia cai bastante, enquanto que a vazão permanece alta. Isto porque os esquemas adaptativos gastam mais energia (usando correção de erros robusta) apenas em pacotes com valor de informação alto. A desvantagem de um esquema adaptativo pode ser visto nas Figuras 5.6 e 5.7, que mostram a vazão para pacotes com $V \leq 1$. Como os pacotes tem V baixo, o esquema adaptativo não usa códigos com grande capacidade de correção de erros. Mas como são pacotes menos importantes a sua perda não traz problemas para a aplicação.

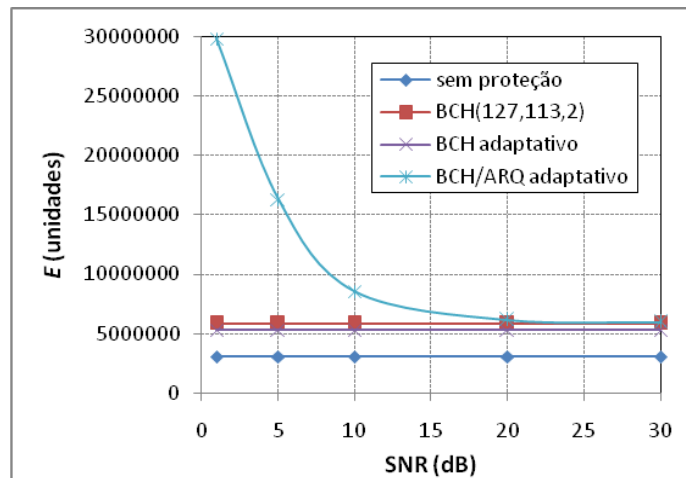


Figura 5.4: Energia consumida de esquemas BCH

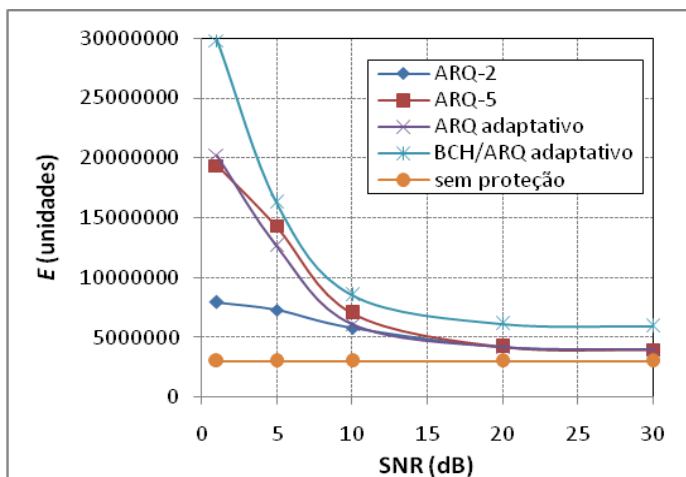


Figura 5.5: Energia consumida de estratégias ARQ

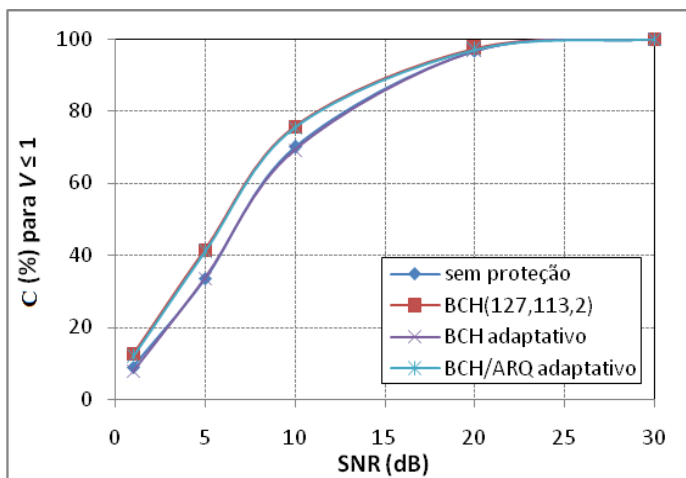


Figura 5.6: Vazão de esquemas BCH para $V \leq 1$

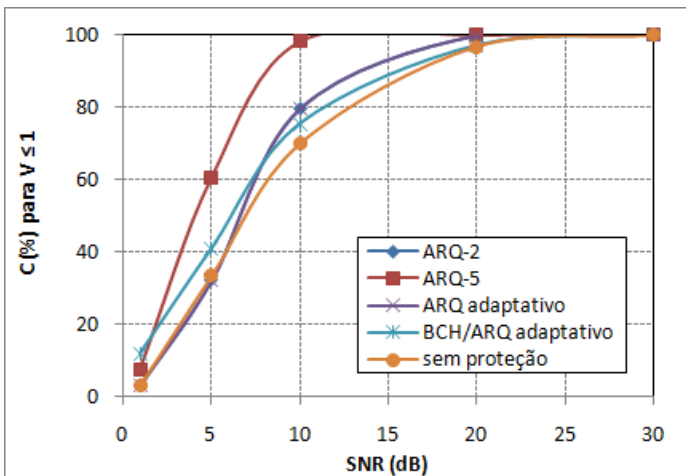


Figura 5.7: Vazão de estratégias ARQ para $V \leq 1$

5.4 Resultados para valor de informação baseado em entropia

As simulações foram feitas com os mesmo parâmetros da Seção 5.3: modulação OQPSK, canal Rayleigh, 1 salto, $n_{pac}=100.000$, pacotes com 24 bits de cabeçalho, 8 bits de trailer e 120 bits de dados. Foram considerados dados de temperatura, numa variação de -10°C a 40°C , ou seja, $l_{min} = -10$ e $l_{max} = 40$. Os valores de temperatura totalizam 100.000 medições. A partir destes valores foi calculado o valor informacional V para cada medição. Aproximadamente 78,6% das medições têm $V < 0,059$, 14,2% com $0,059 \leq V \leq 0,5$ e 7,2% têm $V > 0,5$. Diferentes medições teriam porcentagens diferentes de cada faixa de valor de informação.

As Figuras 5.8 a 5.11 apresentam os resultados obtidos através de simulação. A Figura 5.8 mostra a vazão para pacotes com valor de informação $V > 0,5$ para códigos BCH com diferentes capacidades de correção de erros e para o esquema BCH adaptativo (de acordo com a Tabela 5.2). Estes pacotes são os que contém informação mais importante. Pode-se observar que a vazão é maior quando usado código BCH (127,85,6) e BCH adaptativo. Para uma relação sinal-ruído de 5 dB, por exemplo, um pacote sem correção de erro teria pouco mais de 30% de chances de ser recebido corretamente no coletor. Com BCH adaptativo, a vazão normalizada aumenta para mais de 50%. Para valores altos de SNR, acima de 15 dB, a vazão de todas as estratégias é muito parecida por existirem poucos erros no canal. O código BCH (127,85,6) tem uma vazão muito próxima do BCH adaptativo.

No entanto, o consumo de energia é maior, como pode ser visto na Figura 5.9. Esta energia é a energia total consumida na rede, incluindo os pacotes com qualquer valor V . O consumo é maior quanto maior for a capacidade de correção do código. A energia consumida é constante com o aumento da SNR porque o número de bits transmitidos e recebidos permanece o mesmo. O esquema BCH adaptativo tem um consumo de energia menor que o código BCH (127,85,6) e maior que sem proteção ou código BCH (127,113,2). A vantagem do BCH adaptativo é aumentar a vazão de pacotes com V alto sem aumentar de forma muito significativa o consumo de energia, como acontece com o código BCH com $t=6$. Da mesma forma que na seção anterior, um esquema adaptativo não tem uma vazão muito boa para pacotes com V baixo. Mas como são pacotes com menos informação não tem problemas se forem recebidos com erros. A vazão dos pacotes para o BCH adaptativo é quase a mesma de não usar nenhuma proteção.

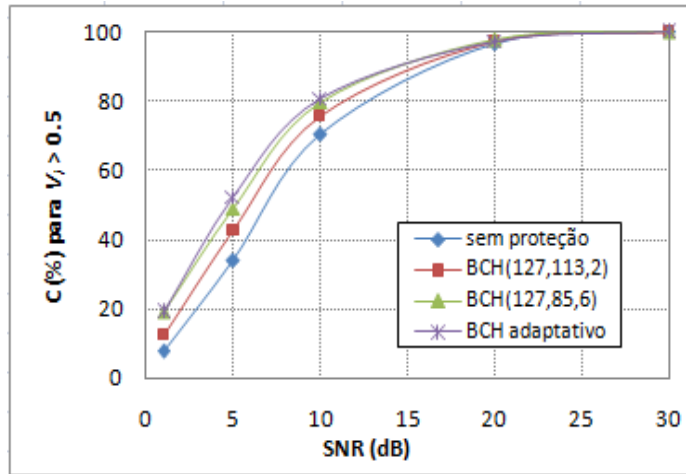


Figura 5.8: Vazão de códigos BCH para $V > 0,5$

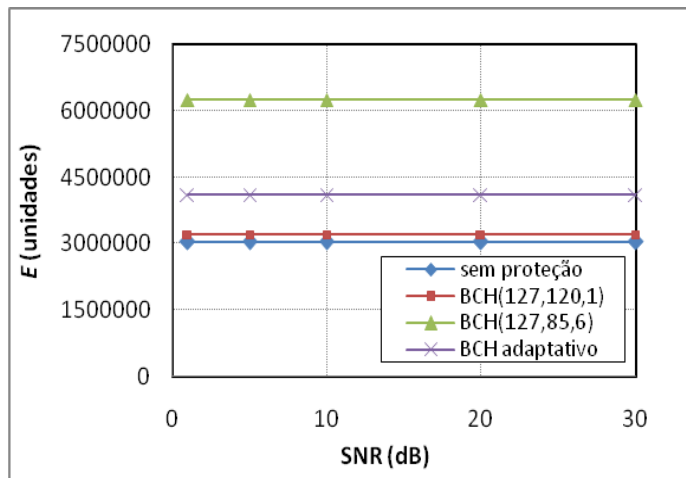


Figura 5.9: Energia consumida para códigos BCH

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram a vazão e energia para diferentes estratégias ARQ. Foram usadas estratégias com no máximo 2 retransmissões (ARQ-2), 5 retransmissões (ARQ-5), 10 retransmissões (ARQ-10) e o esquema ARQ adaptativo (conforme Tabela 5.2). A Figura 5.10 mostra que o ARQ adaptativo e ARQ-10 têm a melhor vazão para pacotes com $V > 0,5$. Por exemplo, para 5 dB, a vazão sem correção de erros é de apenas 30% e para ARQ-5 é de 60%. O ARQ adaptativo aumenta a vazão normalizada para aproximadamente 80% e ARQ-10 para mais de 80%. No entanto, o ARQ adaptativo tem a vantagem de gastar menos energia do que ARQ-10, como mostra a Figura 5.11. Ao contrário dos pacotes BCH, a energia consumida para os pacotes

ARQ varia de acordo com a SNR. Isto ocorre porque com uma SNR menor, são necessárias mais retransmissões, gastando mais energia.

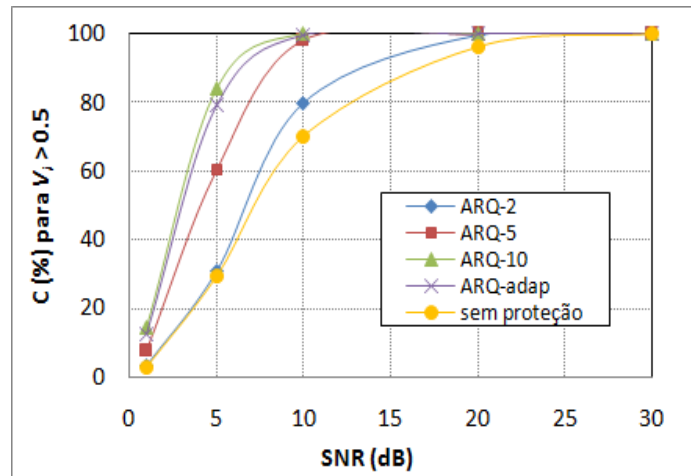


Figura 5.10: Vazão de estratégias ARQ para $V > 0,5$

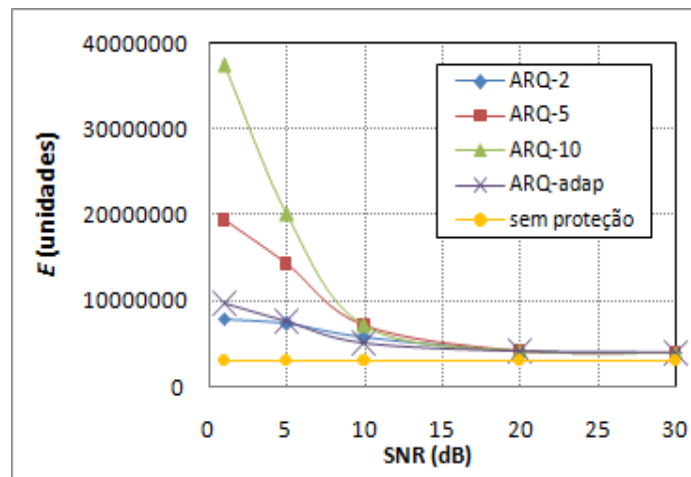


Figura 5.11: Energia consumida para estratégias ARQ

A Tabela 5.3 faz uma comparação dos três esquemas adaptativos: BCH, ARQ e híbrido BCH/ARQ. A estratégia BCH/ARQ é melhor que o BCH e ARQ adaptativo para proteger os pacotes com V alto, porém com maior consumo de energia. Por acontecerem muitas retransmissões quando o canal está ruim, a energia consumida aumenta. Para SNR de 5 dB, por exemplo, atinge quase 95% de confiabilidade. Porém, a energia consumida é quase o dobro do adaptativo BCH, que atinge 52% de confiabilidade. No entanto, se numa aplicação o número de

pacotes com valor de informação alto for pequeno, o esquema adaptativo ARQ/BCH terá um consumo de energia menor.

Tabela 5.3: Comparação entre esquemas adaptativos

	BCH adaptativo			ARQ adaptativo			BCH/ARQ adaptativo		
SNR	E	C $V < 0,059$	C $V > 0,5$	E	C $V < 0,059$	C $V > 0,5$	E	C $V < 0,059$	C $V > 0,5$
1	4102160	8,52	19,17	972940	2,15	12,57	12589764	12,03	36,18
5	4102160	35,80	52,43	7539000	22,68	79,38	7991102	41,39	94,86
10	4102160	71,47	80,76	5052400	63,57	99,72	5356562	75,37	100
20	4102160	96,49	97,29	4094000	95,31	100	4599258	100	100
30	4102160	100	100	4000000	100	100	4521200	100	100

5.5 Conclusão

Neste capítulo foram propostas estratégias adaptativas de controle de erros usando valor de informação de mensagens. Eventos com maior probabilidade de ocorrência têm valor de informação menor que eventos menos prováveis. Os esquemas adaptativos BCH, ARQ e BCH/ARQ aumentam a vazão de pacotes com alto valor de informação quando comparados com controle de erros estáticos, sem um grande aumento na energia consumida na rede. As estratégias propostas podem ser utilizadas e adaptadas para diversas aplicações de redes de sensores para aumentar a vazão de mensagens consideradas mais importantes na rede.

Capítulo 6

Conclusão

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais da tese, as propostas de trabalhos futuros e os trabalhos publicados.

6.1 Considerações finais

Nesta tese foram estudadas as principais estratégias usadas para detecção e correção de erros em redes de sensores sem fio, que incluem codificação de canal e sistemas de retransmissão. A escolha do controle de erros utilizado em redes sem fio limitadas em energia deve ser feita com cuidado, pois embora possa aumentar a vazão, o consumo de energia adicional destes esquemas pode não compensar o seu uso. Foram feitas análises tendo como métricas a vazão, consumo de energia e eficiência de energia. As principais contribuições da tese são: modelos analítico e de simulação para esquemas de controle de erros FEC e ARQ para redes de sensores sem fio (Capítulo 3); adaptação destes modelos para os padrões IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4 (Capítulo 4); proposta de esquemas de codificação personalizada e controle de erros adaptativo para estes padrões (Capítulo 4); proposta de cálculo de valor de informação de mensagens e novas estratégias adaptativas de controle de erros (Capítulo 5).

Uma conclusão geral da tese é que não existe o melhor código corretor de erros ou estratégia de retransmissão que devam ser utilizados como padrão para redes de sensores sem fio. A escolha de tal esquema depende da aplicação e da tecnologia utilizada. Baseado nas análises e

resultados obtidos na tese foi verificado que a modulação OQPSK é mais eficiente em energia que as modulações FSK e GFSK. Para estas modulações, usar código CRC para detecção de erros sem retransmissão mostrou-se eficiente para altos valores de SNR e poucos saltos. Usar retransmissão é a melhor opção para redes com muitos saltos e/ou quando o pacote possui um grande número de bytes de dados. Entretanto, determinar quais são os valores de m e SNR que indicam um canal ruim e que deva ser usado controle de erros é dependente da modulação, ou seja, da tecnologia/hardware utilizado.

Devido ao consumo de energia das técnicas de controle de erros ser relativamente alto (principalmente por causa dos bits adicionais a serem transmitidos), a melhor maneira de aplicá-las em redes de sensores é usando estratégias adaptativas de controle de erros, que usam FEC e/ou ARQ apenas quando for realmente necessário. Para o padrão IEEE 802.15.1 foram propostas estratégias adaptativas ADP1 e ADP2 baseadas no número de saltos e a estratégia ADPC que muda o pacote de acordo com a qualidade do canal. Em situações de canal intermediárias, os esquemas ADP1 e ADP2 tiveram a melhor eficiência de energia. Os pacotes AUX1 e AUX2 são os mais eficientes para boas condições de canal e o pacote BCH para condições de canal ruins. Se as condições do canal entre os enlaces sofrem muita variação, o esquema ADPC é a melhor escolha. Para o padrão IEEE 802.15.4 a estratégia com melhor eficiência de energia é usar código BCH com ARQ em um canal ruim, ARQ em condições intermediárias e apenas código CRC em boas condições de canal.

O valor de informação de mensagens também pode ser usado para definir quando usar FEC/ARQ em redes de sensores. Se o canal estiver ruim mas os dados a serem transmitidos não são importantes, pode não ser necessário usar controle de erros. Assim, o consumo de energia adicional para controle de erros será empregado apenas em pacotes com alto valor de informação. Os esquemas adaptativos propostos no Capítulo 5 (BCH, ARQ e BCH/ARQ) aumentam a vazão de pacotes com alto valor de informação sem gerar um aumento significativo no consumo de energia.

6.2 Trabalhos futuros

Tendo a vista os resultados obtidos na tese, algumas sugestões de trabalhos futuros podem ser feitas. Uma primeira abordagem seria adaptar os modelos de eficiência de energia para o padrão IEEE 802.15.3, analisando os controles de erros existentes no mesmo. Outros códigos podem ser analisados e implementados nos padrões IEEE 802.15, como, por exemplo, códigos de Golay e BCH com decodificação por decisão suave. Também podem ser analisados códigos turbo, pois embora o consumo de energia destes códigos seja alto, seria interessante analisar sua eficiência de energia em redes de sensores. Outras métricas de desempenho também podem ser analisadas, como o atraso dos pacotes, que pode ser importante para aplicações específicas de redes de sensores. Uma abordagem promissora e que merece ser explorada é estudar as técnicas de controle de erros FEC/ARQ para serem utilizadas junto com protocolos de transporte e roteamento. Para os padrões IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4 seria interessante estudar o impacto dos esquemas propostos nestas camadas de redes superiores. Ainda, o conceito de valor de informação pode ser adaptado para outras aplicações de redes de sensores, como redes de sensores e atuadores, e outros códigos podem ser utilizados para os esquemas das Tabelas 5.1 e 5.2.

6.3 Publicações

Os trabalhos publicados no período de elaboração da tese incluem um capítulo de livro [KB07a], artigo em revista internacional [KBP08] e artigos em simpósios nacionais [KB07b], [KB08a] e internacionais [KBP05], [KB06], [KBP06], [KBP07] e [KB08b].

Referências Bibliográficas

- [AH02] J. Ahn e J. Heidemann. An adaptive FEC algorithm for mobile wireless networks. *USC/ISI Technical Report 555*, Março 2002.
- [AHH05] J. Ahn, S. Hong e J. Heidemann. An adaptive FEC code control algorithm for mobile wireless sensor networks. *Journal of Communications and Networks*, vol. 7, pp. 489-499, 2005.
- [ASSC02] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam e E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, pp. 102-114, Agosto 2002.
- [BCDC05] B. Bougard, F. Catthoor, D. Dailly, A. Chandrasakan e W. Dehaene. Energy efficiency of the IEEE 802.15.4 standard in dense wireless microsensor networks: modeling and improvement perspectives. *IEEE Design, Automation and Test*, Munique, Alemanha, Março 2005.
- [Blu01] Bluetooth SIG, *Specification of the Bluetooth System – Core, Version 1.1*. Fevereiro 2001. <http://www.bluetooth.com>
- [Blu03] Bluetooth SIG, *Specification of the Bluetooth System – Core, Version 1.2*. Novembro 2003. <http://www.bluetooth.com>
- [Cam05] H. Cam. Secure data aggregation and source-channel coding with MIT code for wireless sensor networks. *IEEE Performance, Computing and Communications Conference*, Phoenix, EUA, Abril 2005.
- [CA02] C. M. Cordeiro e D. P. Agrawal. Mobile Ad Hoc Networking. *XX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, Búzios, Maio 2002.
- [CB02] J. Cheng, N. C. Beaulieu. Generalized moment estimators for the Nakagami fading parameter. *IEEE Communication Letters*, vol. 6, pp. 144-146, 2002.
- [DF03] C. Desset e A. Fort. Selection of channel coding for low-power wireless systems. *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, Jeju, Coréia do Sul, Abril 2003.

- [DNWH03] S. Dulman, T. Nieberg, J. Wu e P. Havinga. Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, New Orleans, EUA, Março 2003.
- [FEV05] H. D. Ferrière, D. Estrin e M. Vetterli. Packet combining in sensor networks. *ACM SenSys*, San Diego, EUA, Novembro 2005.
- [HSI06] S. L. Howard, C. Schlegel e K. Iniewski. Error control coding in low-power wireless sensor networks: when is ECC energy-efficient? *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2, pp. 1-14, Março 2006.
- [IEE02] IEEE Std. 802.15.1. IEEE standard for wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks, 2002.
- [IEE03a] IEEE Std. 802.15.3. Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for high-rate wireless personal area networks (WPANs). Setembro 2003.
- [IEE03b] IEEE Std. 802.15.4. IEEE standard for wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs), 2003.
- [KSP04] H. Karvonen, Z. Shelby and C. Pomala-Ráez. Coding for energy efficient wireless embedded networks. *International Workshop on Wireless Ad hoc Networks*, Junho 2004.
- [KBP05] J. H. Kleinschmidt, W. C. Borelli e M. E. Pellenz. Controle de erros para redes de sensores Bluetooth. *XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Campinas - SP, Brasil, Setembro 2005.
- J. H. Kleinschmidt, W. C. Borelli e M. E. Pellenz. Power efficient error control for Bluetooth-based sensor networks. *IEEE Conference on Local Computer Networks*, Sydney, Austrália, Novembro 2005.
- [KB06] J. H. Kleinschmidt e W. C. Borelli, Análise da eficiência de energia de estratégias de retransmissão em redes de sensores IEEE 802.15.4. *5th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS 2006)*, Cuiabá – MT, Dezembro 2006.
- [KBP06] J. H. Kleinschmidt, W. C. Borelli e M. E. Pellenz. Custom error control schemes for energy efficient Bluetooth sensor networks. *SBrT/IEEE International Telecommunications Symposium*, Fortaleza, Ceará, Setembro 2006.

- [KB07a] J. H. Kleinschmidt e W. C. Borelli. Enabling technologies for pervasive computing. *Encyclopedia of Mobile Computing and Commerce*, Hershey, Pennsylvania, USA: IGI Global, 2007, v. 1, p. 272-276.
- [KB07b] J. H. Kleinschmidt e W. C. Borelli. Análise de estratégias de controle de erros para redes de sensores com modulação OQPSK e GFSK. *XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Recife – PE, Brasil, Setembro 2007.
- [KBP07] J. H. Kleinschmidt, W. C. Borelli e M. E. Pellenz. An analytical model for energy efficiency of error control schemes in sensor networks. *IEEE International Conference on Communications*, Glasgow, Escócia, Junho 2007.
- [KB08a] J. H. Kleinschmidt e W. C. Borelli. Controle adaptativo de erros para redes de sensores sem fio usando informação de área de cobertura. *II Workshop on Pervasive and Ubiquitous Computing*, Campo Grande – MS, Brasil, Outubro 2008.
- [KB08b] J. H. Kleinschmidt e W. C. Borelli. Controle de erros adaptativo para redes de sensores sem fio usando valor de informação de mensagens baseado em entropia. *7th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS 2008)*, Foz do Iguaçu – PR, Dezembro 2008.
- [KBP08] J. H. Kleinschmidt, W. C. Borelli e M. E. Pellenz. An energy efficiency model for adaptive and custom error control schemes in Bluetooth sensor networks. *Elsevier AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2008.
- [KFC04] S. Kim, R. Fonseca e D. Culler. Reliable transfer on wireless sensor networks. *IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, Santa Clara, EUA, Outubro 2004.
- [KKL05] A. Köpke, H. Karl e M. Löbbers. Using energy where it counts: Protecting important messages in the link layer. *Proc. of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks*, Istambul, Turquia, Janeiro 2005.
- [KPL04] J. H. Kleinschmidt, M. E. Pellenz e L. A. P. Lima Jr. Evaluating and improving Bluetooth piconet performance over Nakagami-*m* fading channels. *The Ninth IEEE International Symposium on Computers and Communications*, Alexandria, Egito, Junho 2004.

- [KS06] Z. H. Kashani e M. Shiva. BCH coding and multihop communication in wireless sensor networks. *Third IEEE IFIP Int. Conference on Wireless and Optical Communications Networks*, Bangalore, Índia, Abril 2006.
- [KSP04] H. Karvonen, Z. Shelby e C. Pomala-Ráez. Coding for energy efficient wireless embedded networks. *International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks*, 2004.
- [LDB03] M. Leopold, M. D. Dydensborg e P. Bonnet. Bluetooth and sensor networks: A reality check. *1st ACM Conference on Sensor Systems*. Los Angeles, EUA, Novembro 2003.
- [LFS97] P. Lettieri, C. Fragouli e M. B. Srivastava. Low power error control for wireless links. *ACM/IEEE Conf. on Mobile Computing and Networking*, Budapeste, Hungria, 1997.
- [LC04] S. Lin e D. J. Costello. *Error control coding: Fundamentals and applications*. Pearson Education, 2nd edition, 2004.
- [LMZG97] H. Liu, H. Ma, M. El Zarki e S. Gupta. Error control schemes for networks: an overview. *Mobile Networks and Applications*, vol. 2, pp. 167-182, Junho 1997.
- [LNRM03] A. F. Loureiro, J. M. Nogueira, L. B. Ruiz, R. A. Mini, E. F. Nakamura e C. M. Figueiredo. Redes de Sensores sem Fio. *XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, Natal – RN, Maio 2003.
- [ME04] V. Mehta e M. El Zarki. Bluetooth based sensor network for civil infrastructure health monitoring. *Wireless Networks*, Kluwer Academic Publishers, vol. 10, pp. 401-412, Julho 2004.
- [MGE04] A. D. Murugan, P. K. Gopala e H. El Gamal. Correlated sources over wireless channels: cooperative source-channel coding. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no 6, Agosto 2004.
- [MJB03] J. Meer, M. Nijdam e M. Bijl. Adaptive error control in a wireless sensor network using packet importance valuation. Hardware/software co-design, Enschede, Holanda, 2003.
- [MPD04] S. Mukhopadhyay, D. Panigrahi, e S. Dey. Data aware, low cost error correction for wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Atlanta, EUA, Março 2004.
- [MSM05] J. Misić, S. Shafi e V. B. Misić. The impact of MAC parameters on the performance of 802.15.4 PAN. *Ad Hoc Networks*, vol. 3, pp. 509-528, Setembro 2005.
- [Pro01] J. Proakis. *Digital Communications*. New York, NY: McGraw-Hill, 4th edition, 2001.

- [Rap99] T. S. Rappoport. *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice-Hall PTR, 1999.
- [RCM01] A. Ramesh, A. Chockalingam e L. B. Milstein. SNR estimation in generalized fading channels and its application to turbo decoding. *IEEE International Conference on Communications*, Helsinquei, Finlândia, Junho 2001.
- [RSPS02] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park e M. B. Srivastava. Energy aware wireless micro sensor networks. *IEEE Signal Processing*, pp. 40-50, Março 2002.
- [SAM03] Y. Sankarasubramanian. I. F. Akyildiz e S. W. Mc Laughlin. Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks. *Proc. of Sensor Network Protocols and Applications*, Anchorage, EUA, Maio 2003.
- [SHI02] E. Shih et al. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy efficient wireless sensor networks. *Proc. ACM Mobicom*, Roma, Itália, Julho 2001.
- [Skl95] B. Sklar. *Digital Communications*. Prentice-Hall, 1995.
- [SPKH05] Z. Shelby, C. Pomalaza-Ráez, H. Karvonen e J. Haapola. Energy optimization in multihop wireless embedded and sensor networks. *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 12, no. 1, pp. 11-21, Janeiro 2005.
- [VA06] M. C. Vuran e I. F. Akyildiz. Cross-layer analysis of error control in wireless sensor networks. *IEEE SECON*, 2006.
- [VR02] M. C. Valenti e M. Robert. Custom coding, adaptive rate control and distributed detection for Bluetooth. *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, Vancouver, Canadá, Setembro 2002.
- [VRR02] M. C. Valenti, M. Robert e J. H. Reed. On the throughput of Bluetooth data transmissions. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Orlando, EUA, Março 2002.
- [WDS06] C. Wang, M. Daneshmand, B. Li e K. Sohraby. A survey of transport protocols for wireless sensor networks. *IEEE Network*, vol, 20, pp. 34-40, Junho 2006.
- [YOKO04] T. Yamazato, H. Okada, M. Katayama e A. Ogawa. A simple data relay process and turbo code application to wireless sensor networks. *Int. Symposium on Wireless Communication Systems*, Mauritius, Setembro 2004.

- [YSKS05] S. Yi, A. Sadjadi, S. Kalyanaraman e V. Subramanian. Error control code combining techniques in cluster-based cooperative wireless networks. *IEEE International Conference on Communications*, Seul, Coréia do Sul, Maio 2005.
- [ZH05] J. Zangl e J. Hagenauer. On the efficiency of channel coding in uncoordinated sensor networks. *IEEE Globecom*, St. Louis, EUA, Novembro 2005.
- [Zig05] Zigbee Alliance. Specifications of Zigbee. <http://www.zigbee.org>, 2005.
- [ZR05] X. Zhang e G. Riley. Energy-aware on-demand scatternet formation and routing for Bluetooth-based wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, pp. 126-133, Julho 2005.
- [ZR97a] M. Zorzi e R. R. Rao. Error control and energy consumption in communications for nomadic computing. *IEEE Transactions on Computers*, vol. 46, no. 3, pp. 279-289, Março 1997.
- [ZR97b] M. Zorzi e R. R. Rao. Energy-constrained error control for wireless channels. *IEEE Personal Communications*, vol. 4, no. 6, pp. 27-33, Dezembro 1997.
- [ZR04] M. Zorzi e R. R. Rao Coding tradeoffs for reduced energy consumption in sensor networks. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Barcelona, Espanha, Setembro 2004.
- [ZRW05] L. C. Zhong, J. M. Rabaey e A. Wolisz. Does proper coding make single hop wireless sensor networks reality: the power consumption perspective. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Los Angeles, EUA, Março 2005.