

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE
AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Odilson Tadeu Valle

**CODIFICAÇÃO DE REDE NA RETRANSMISSÃO
OPORTUNISTA DE MENSAGENS EM REDES DE
SENSORES SEM FIO IEEE 802.15.4**

Florianópolis

2014

Odilson Tadeu Valle

**CODIFICAÇÃO DE REDE NA RETRANSMISSÃO
OPORTUNISTA DE MENSAGENS EM REDES DE
SENSORES SEM FIO IEEE 802.15.4**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Carlos Barros Montez, Dr. - UFSC

Florianópolis

2014

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

Valle, Odilson Tadeu

Codificação de Rede na Retransmissão Oportunista de Mensagens em Redes de Sensores Sem Fio IEEE 802.15.4 / Odilson Tadeu Valle ; orientador, Carlos Barros Montez - Florianópolis, SC, 2014.

201 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Redes de Sensores Sem Fio. 3. Codificação de Rede. 4. Redes Industriais. 5. Confiabilidade. I. Montez, Carlos Barros. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. III. Título.

Odilson Tadeu Valle

**CODIFICAÇÃO DE REDE NA RETRANSMISSÃO
OPORTUNISTA DE MENSAGENS EM REDES DE
SENSORES SEM FIO IEEE 802.15.4**

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

Florianópolis, 3 de Outubro 2014.

Prof. Carlos Barros Montez, Dr. - UFSC
Orientador

Prof. Rômulo Silva de Oliveira, Dr. - UFSC
Coordenador

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Barros Montez, Dr. - UFSC
Presidente

Prof. Luiz Affonso Henderson Guedes de Oliveira, Dr. - UFRN

Prof. Marcelo Maia Sobral, Dr. - IFSC

Prof. Bartolomeu Ferreira Uchôa Filho, PhD - UFSC

Prof. Mário Antônio Ribeiro Dantas, PhD - UFSC

Prof. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes, Dr. - UFSC

Aos meus pilares sentimentais:
Maria Clara Castro Valle
Bruno Castro Valle
Maria Cláudia de Almeida Castro

e a minha mãe, que assim me fez:
Olga Valle

AGRADECIMENTOS

Aos colegas do Departamento de Automação e Sistemas da UFSC pelo companheirismo no desenvolvimento dos trabalhos.

Aos professores da Área de Telecomunicações do IFSC, pelo apoio e liberação para esta capacitação.

Ao IFSC, UFSC e FEUP por todo o apoio e recursos.

À CAPES pelo apoio financeiro durante o doutorado sanduíche na FEUP.

Ao meu orientador Carlos Barros Montez que apoiou incansavelmente a iniciativa. Pessoa que sempre soube me amparar nos momentos de dúvidas e ajudar nas decisões sobre caminhos a tomar nas encruzilhadas encontradas.

Ao André Vicente Milack e Gustavo Medeiros de Araújo por toda a ajuda no desenvolvimento deste trabalho, sem as quais meu caminho seria muito mais árduo. Agradeço também ao companheirismo e incentivo de ambos.

Ao Gerson Fernando Budke pelas discussões técnicas e apoio técnico e material em alguns dos ensaios.

Ao Eraldo Silveira e Silva por todas as dicas durante estes longos anos de trabalho e por seu *checklist*.

A todos os que contribuíram com sugestões, críticas ou dicas de como resolver alguns dos problemas que apareceram durante o desenvolvimento dessa tese, seja técnico ou emocional.

*Eu fico
Com a pureza da resposta das crianças
É a vida, é bonita e é bonita
Viver, e não ter a vergonha de ser feliz
Cantar e cantar e cantar
A beleza de ser um eterno aprendiz...*

Gonzaguinha

RESUMO

As Redes de Sensores sem Fio (RSSF) vêm apresentando uma penetração cada vez maior nas mais distintas áreas, dados a sua versatilidade e o seu baixo custo. Mais recentemente foi proposto seu emprego no chão de fábrica, com o surgimento de diversos padrões específicos, com especial destaque ao padrão IEEE 802.15.4. O ambiente industrial possui duas características que o diferenciam dos demais ambientes de aplicação das RSSF: requisitos de tempo real na troca de mensagens e alto índice de ruído eletromagnético que provocam altas taxas de perdas de mensagens. Sendo assim, é determinante para a aplicação das RSSF no ambiente industrial que se maximize a confiabilidade na troca de mensagens com garantias temporais. Neste sentido, esta tese propõe um novo algoritmo de codificação de rede para retransmissão oportunista de mensagens, aplicado a redes de sensores sem fio no padrão IEEE 802.15.4. Essa proposta emprega técnicas de codificação de rede, cooperação e diversidade temporal objetivando aumentar a confiabilidade na troca de mensagens. A codificação de rede é utilizada em nodos retransmissores para, sempre que necessário, agrupar um conjunto de mensagens e retransmiti-las. O coordenador da rede, ao receber o conjunto de mensagens originais e mensagens codificadas, consegue aumentar significativamente a taxa de sucesso das mensagens recebidas e, conseqüentemente, minimizar o consumo energético e do uso do meio na rede. Para comprovar a eficácia dessa proposta foi realizado um conjunto de ensaios experimentais com várias plataformas de nodos, principalmente o MicaZ, e simulações no OMNeT++, em variadas topologias de rede. Com o comparativo da nova técnica com técnicas tradicionais de retransmissão de mensagens se comprovou o melhor desempenho da nova proposta. Também foram realizados ensaios experimentais que comprovaram a factibilidade da codificação de rede em nodos das RSSF.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio. Codificação de Rede. Redes Industriais. Confiabilidade.

ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (WSN) based applications have been increased in different applications areas, due to their versatility and low cost. Recently, its adoption has been proposed on factory floor, with the emergence of several specific standards, with special emphasis on the IEEE 802.15.4 standard. The industrial environment has two particular features that differs from traditional WSN application environments: (i) real-time constraints in messaging streams and (ii) high level of electromagnetic noise, which causes high rates of loss messages. Therefore, it is mandatory for industrial WSN application to maximize the reliability in messages exchanging with temporal guarantees. In this sense, this thesis proposes a new network coding algorithm for opportunistic relaying messages, applied to IEEE 802.15.4 WSN. This proposal employs network coding techniques, time diversity and cooperation in order to increase the message reliability. Network coding is adopted at relays nodes to group a set of messages and retransmit them. The network coordinator, upon receiving the set of original messages and coded messages can significantly increase the success rate of incoming messages and, consequently, minimize the energy consumption through the network. To assess the effectiveness of this proposal several studies have been conducted in different sensor nodes platforms, especially the MicaZ and simulations in OMNeT++ considering various network topologies. Simulation results show that the proposed approach outperforms traditional relaying techniques. Experimental assessment indicates the feasibility of network coding in the WSN nodes.

Keywords: Wireless Sensor Networks. Network Coding. Industrial Networks. Reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Problema.	32
Figura 2	Representação por blocos dos componentes de um nodo sensor.	37
Figura 3	Topologia estrela.	40
Figura 4	Topologia em malha.	40
Figura 5	Topologia com agrupamentos em árvore.	41
Figura 6	Topologia com agrupamento em árvore na industria.	43
Figura 7	Um exemplo da estrutura do superquadro.	52
Figura 8	Quadro de <i>beacon</i>	54
Figura 9	Um exemplo da estrutura do superquadro do IEEE 802.15.4e.	56
Figura 10	Rede borboleta.	58
Figura 11	Rede Borboleta. a) as duas etapas do roteamento, b) única etapa da codificação de rede.	61
Figura 12	Rede <i>ad-hoc</i> . a) roteamento, b) codificação de rede e c) codificação de rede na camada física.	62
Figura 13	Confiabilidade em função da perda de pacotes (ε) para os diferentes protocolos.	87
Figura 14	Arquitetura do sistema: a) Componentes, b) Funcional e c) Comunicação.	101
Figura 15	Diagrama esquemático no agrupamento em árvore.	105
Figura 16	Divisão de tempo no agrupamento em árvore.	105
Figura 17	Técnica BlockACK : a) diagrama de mensagens b) compartimentos de tempo no macrociclo.	110
Figura 18	Técnica Mestre/Escravo : a) diagrama de mensagens b) compartimentos de tempo no macrociclo.	112
Figura 19	Técnica TDMA Redundante : a) diagrama de mensagens b) compartimentos de tempo no macrociclo.	113
Figura 20	Sequência de troca de mensagens na proposta NetCOMeR	117
Figura 21	Técnica NetCOMeR : a) diagrama de mensagens b) compartimentos de tempo no macro-ciclo.	118
Figura 22	Fluxograma do coordenador.	122
Figura 23	Fluxograma do nodo sensor.	124
Figura 24	Superquadro modificado com a criação da Terceira Classe	

de serviço.	130
Figura 25 Fotografia da bancada de ensaios, com destaque aos principais elementos.	134
Figura 26 Razão entre o tempo de codificação e decodificação de 10 mensagens de 32 <i>bytes</i>	141
Figura 27 Tempo computacional para decodificação de 5 mensagens com a variação do tamanho das mensagens.	141
Figura 28 Tempo computacional para decodificação de mensagens de 8 <i>bytes</i> com a variação da quantidade de mensagens.	142
Figura 29 Cadeia de Markov de dois estados.	143
Figura 30 Taxa de sucessos: a) ensaios experimentais, b) simulações.	146
Figura 31 Uso do meio: a) ensaios experimentais, b) simulações.	148
Figura 32 Atraso no recebimento de dados: a) ensaios experimentais (atraso médio), b) simulações.	150
Figura 33 Energia consumida por um nodo sensor: a) ensaios experimentais, b) simulações.	152
Figura 34 Energia individual consumida das baterias.	154
Figura 35 Mensagens encaminhadas pelo coordenador por dado recebido.	156
Figura 36 Sensibilidade da taxa de sucesso em relação a variação da diversidade temporal do <i>beacon</i>	157
Figura 37 Sensibilidade do consumo médio de energia em relação a variação da diversidade temporal do <i>beacon</i>	158
Figura 38 Sensibilidade da taxa de sucesso em relação à variação do parâmetro G	159
Figura 39 Sensibilidade da taxa de sucesso em relação a variação do parâmetro α	159
Figura 40 Sensibilidade da taxa de sucesso em relação a variação do parâmetro β	160
Figura 41 Diagrama esquemático da topologia <i>cluster-tree</i> utilizada.	162
Figura 42 Superquadro com os SD's dedicados à cada agrupamento.	162
Figura 43 a) Taxa de sucesso individual em cada agrupamento e b) taxa de perdas equivalente.	165
Figura 44 Taxa de sucesso conjunta nos dois níveis da topologia <i>cluster-tree</i>	166
Figura 45 Carga elétrica consumida na topologia <i>cluster-tree</i>	166

Figura 46 Sistema de medição de consumo energético.....	191
Figura 47 Corrente e tensão de um nodo em diferentes estados de funcionamento.....	194
Figura 48 Curvas de descarga de um conjunto de baterias sob uso de um nodo.	195
Figura 49 Comportamento da tensão.....	197

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classes de Uso.....	46
Tabela 2	Canais e taxa de dados do IEEE 802.15.4.....	49
Tabela 3	Alguns exemplos de superquadro.....	54
Tabela 4	Resumo dos artigos com RSSF aplicados à industria. . .	80
Tabela 5	Resumo dos artigos com codificação de rede.....	94
Tabela 6	Resumo comparativo entre as técnicas.	113
Tabela 7	Regra de formação do conteúdo da mensagem BloCop. .	120
Tabela 8	Regra para distribuição dos coeficientes no corpo \mathbb{F}_2^s ...	126
Tabela 9	Arquitetura dos nodos.	138
Tabela 10	Tempo computacional para codificação e decodificação de um conjunto com tamanho e quantidades variáveis de mensagens.	139
Tabela 11	Demanda de alocação de memória para o MicaZ. Células destacadas indicam situações de transbordo de memória.	140
Tabela 12	Estimativa da vida útil média dos nodos (h).	155
Tabela 13	Definição dos parâmetros para cada agrupamento pertencente a topologia <i>cluster-tree</i>	163
Tabela 14	Levantamento do erro relativo.	199

LISTA DE ABREVIATURAS

ACK	<i>Acknowledgment</i>
AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BI	<i>Beacon Interval</i>
BO	<i>Beacon Order</i>
CAP	<i>Contention Access Period</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CFP	<i>Contention-Free Period</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DSME	<i>Distributed Synchronous Multichannel Extension</i>
ED	<i>Energy Detection</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FFD	<i>Full-Function Device</i>
GTS	<i>Guaranteed Time Slot</i>
ISA	<i>International Society of Automation</i>
LQI	<i>Link Quality Indicator</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MER	<i>Message Error Rate</i>
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>

NC	<i>Network Coding</i>
NetCOMeR	<i>Network Coding in Opportunistic Message Retransmission</i>
PAN	<i>Personal Area Networks</i>
PdM	<i>Predictive Maintenance</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RFD	<i>Reduced-Function Device</i>
RLNC	<i>Random Linear Network Coding</i>
RSSF	<i>Redes de Sensores Sem Fio</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SD	<i>Superframe Duration</i>
SO	<i>Superframe Order</i>
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Networks</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 MOTIVAÇÃO	28
1.2 PROPOSTA DE TESE	31
1.2.1 Objetivo geral	31
1.2.2 Objetivos específicos	31
1.2.3 Problema	32
1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE	33
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	34
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO	36
2.1.1 Nodos	36
2.1.2 Topologias de rede	39
2.1.3 Conceitos de diversidade	42
2.2 ESPECIFICIDADES DOS AMBIENTES INDUSTRIAIS ...	45
2.2.1 Restrições temporais	46
2.2.2 Restrições do meio ambiente	47
2.2.3 Confiabilidade	47
2.3 IEEE 802.15.4	48
2.3.1 Camada física	49
2.3.2 Subcamada de controle de acesso ao meio	50
2.3.3 O adendo IEEE 802.15.4e	55
2.4 CODIFICAÇÃO DE REDE	57
2.4.1 Cooperação	59
2.4.2 Alguns casos de uso de NC	60
2.4.3 Conceituação: corpo e combinação linear	63
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	66
3 TRABALHOS RELACIONADOS	69
3.1 REDES SEM FIO EM APLICAÇÕES INDUSTRIAIS	69
3.1.1 <i>Industrial wireless networks: the significance of timeliness in communication systems</i>	70
3.1.2 <i>Towards reliable wireless industrial communication with real-time guarantees</i>	72
3.1.3 <i>Predictable real-time communications with improved reliability for IEEE 802.15.4 based industrial networks</i>	74

3.1.4	<i>A Comprehensive analysis of the MAC unreliability problem in IEEE 802.15.4 wireless sensor networks</i>	75
3.1.5	<i>Distributed DBP: a (m, k)-firm based distributed approach for QoS provision in IEEE 802.15.4 wireless sensor networks</i>	76
3.1.6	<i>Dynamic GTS scheduling of periodic skippable slots in IEEE 802.15.4 wireless sensor networks</i>	77
3.1.7	The effects of relay behavior and position in wireless industrial networks	78
3.1.8	Resumo da seção	79
3.2	IMPLEMENTAÇÕES DA TÉCNICA DE CODIFICAÇÃO DE REDE	79
3.2.1	<i>Practical network coding</i>	81
3.2.2	<i>XORs in the air: practical wireless network coding</i>	82
3.2.3	<i>AdapCode: adaptive network coding for code updates in wireless sensor networks</i>	84
3.2.4	<i>SenseCode: network coding for reliable sensor networks</i>	85
3.2.5	Optimal data spreading in sensor networks using network coding	87
3.2.6	<i>Wireless broadcast using network coding</i>	88
3.2.7	<i>Mechanism for coding-aware opportunistic retransmission in wireless networks</i>	89
3.2.8	Enhancement of lifetime using duty cycle and network coding in wireless sensor networks	90
3.2.9	Network coding over connected dominating set: energy minimal broadcasting in wireless ad hoc networks	91
3.2.10	Resumo da Seção	92
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	93
4	MODELO DO SISTEMA	97
4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	97
4.2	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	99
4.2.1	Componentes do modelo	102
4.2.2	Arquitetura funcional	103
4.2.3	Arquitetura de comunicação	104
4.3	MÉTRICAS DE DESEMPENHO	106
4.4	TÉCNICAS TOLERANTES A PERDA DE MENSAGENS	108
4.4.1	BlockACK	109
4.4.2	Mestre/Escravo	111
4.4.3	TDMA Redundante	111
4.4.4	Discussão comparativa entre as técnicas	112

4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	114
5	NETCOMER – NETWORK CODING IN OPPORTUNIS- TIC MESSAGE RETRANSMISSION	115
5.1	NETCOMER	115
5.1.1	Problema motivador	116
5.2	PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO NETCOMER	118
5.2.1	Algoritmo dos nodos	119
5.3	VIABILIDADE DO NETCOMER	123
5.3.1	Discussões sobre o <i>overhead</i> nas mensagens codifi- cadas	125
5.3.2	Discussões sobre o <i>overhear</i> na NC	127
5.3.3	Discussões sobre o <i>overload</i> na NC	127
5.4	EXPANSÃO DE CLASSES DE SERVIÇO NO IEEE 802.15.4	128
5.4.1	Motivações	128
5.4.2	Terceira Classe – 3C	129
5.4.3	Discussão sobre a terceira classe	131
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	132
6	RESULTADOS	133
6.1	MODELO DOS ENSAIOS	133
6.1.1	Ensaio experimentais	134
6.1.2	Simulações	136
6.2	ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CODIFICAÇÃO DE REDE EM RSSF	137
6.3	MODELO DE FALHAS ADOTADO	143
6.4	ANÁLISE DE DESEMPENHO	145
6.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO NETCOMER	155
6.6	NETCOMER NA TOPOLOGIA <i>CLUSTER-TREE</i>	161
6.6.1	Descrição da implementação	161
6.6.2	Resultados obtidos	164
6.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DO NETCOMER	167
6.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	167
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	169
7.1	VISÃO GERAL DO TRABALHO	169
7.2	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	170
7.3	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	171
7.4	PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESSA TESE	172
7.5	TRABALHOS FUTUROS	173
	REFERÊNCIAS	175
	APÊNDICE A – Sistema para Medição de Consumo Energético	189

1 INTRODUÇÃO

O processo fabril sempre foi dominado pela incessante busca de qualidade com a minimização de custos, onde os sistemas de controle e monitoramento automáticos possibilitam enormes avanços neste sentido. Mais recentemente, tem-se optado pela implantação de dispositivos em pontos estratégicos no chão de fábrica, objetivando um controle cada vez mais pontual mas, para isto, o custo dos dispositivos e de sua implantação deve ser compatível com o nível de penetração pretendido.

A busca de respostas para essas questões passa por propostas que integrem tecnologias de baixo custo e alta confiabilidade. Nesse sentido, as redes de sensores sem fio incrementadas com técnicas de codificação de rede podem se apresentar como uma possível solução à essas demandas.

Em 1998, foram esboçados os primeiros conceitos da Redes de Sensores Sem Fio e em 2003 foi lançada a primeira versão do padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011), com atualizações em 2006 e 2011. Este padrão teve como foco as denominadas WPAN (*Wireless Personal Area Networks*) e foi abraçado pela indústria dada a similaridade de demandas a serem atendidas (ex. comunicação com baixa taxa de bits e baixo consumo energético – *low rate, low power*). Em 2010 foi lançada, e atualizada em 2012, uma emenda a este padrão denominada de IEEE 802.15.4e (IEEE, 2010), específica para o ambiente industrial.

Inicialmente a codificação de rede visava atender a camada de rede do modelo OSI, melhorando o desempenho no uso dos enlaces por parte dos roteadores. Há predominância de trabalhos desse assunto nesta camada. No entanto, em seguida houve desdobramentos, com a aplicação desta técnica nas camadas inferiores. Havendo, portanto, a oportunidade de se explorar a codificação de rede no contexto da confiabilidade das comunicações industriais.

O foco do trabalho está no desenvolvimento de um mecanismo de retransmissão de mensagens utilizando codificação de rede. Conseqüente, há a junção de trabalho de três comunidades científicas distintas: *i*) comunidade das Redes de Sensores Sem Fio (com enfoque na redes com qualidade de serviço); *ii*) comunidade das redes industriais (principalmente a que investiga a adoção de redes sem fio na industria); e *iii*) comunidade de codificação de rede (com técnicas voltadas para melhorar a confiabilidade minimizando o tráfego na rede).

1.1 MOTIVAÇÃO

O atual cenário industrial é de extrema competitividade, onde se procura cada vez mais diminuir os custos. De acordo com o Departamento de Energia dos EUA (INDUSTRIAL_WIRELESS_COMMUNITY, 2002), o novo paradigma para as indústrias é: melhorar a qualidade dos produtos, minimizar os custos de capital, estender a vida útil dos equipamentos, simplificar operações, minimizar custos de operação e aumentar a disponibilidade dos equipamentos. Este paradigma, além das consequências diretas no processo produtivo, permite a redução de emissões de poluentes, assunto prioritário na atualidade.

Tradicionalmente os sistemas de automação industrial e controle de processos se baseiam em redes industriais cabeadas. Contudo, essas redes apresentam um alto custo de implantação e manutenção. O cabeamento estruturado pode custar de US\$ 150,00 a US\$ 300,00 por metro no caso de aplicação tradicional e pode chegar a custar até US\$ 6.000,00 por metro com cabeamento especializado para áreas de segurança intrínseca (INDUSTRIAL_WIRELESS_COMMUNITY, 2002). Os sistemas sem fio podem eliminar dezenas de milhares de metros de fiação na indústria, com a conseqüente redução de custos na implantação e manutenção. Por outro lado, a adoção de redes sem fio requer a manutenção do atendimento de serviços de tempo real e qualidade de serviço às aplicações, características já presentes nas redes industriais cabeadas. Assim sendo, existem aplicações para redes cabeadas e nichos para redes sem fio, sendo que se estima uma longa convivência entre ambas. Com o passar do tempo, a tendência é de migração de boa parte dos sistemas para redes sem fio, na proporcional medida que sua confiabilidade aumenta.

O padrão de rede IEEE 802.15.4(IEEE, 2011) objetiva atender a recente demanda de aplicações como automação industrial, controle de máquinas e processos, automotivas, monitoramento na agricultura de precisão, automação predial e residencial (YONEKI; BACON, 2005; ESTRIN et al., 2002; SHARMA; GOLUBCHIK; GOVINDAN, 2010; MAINWARING et al., 2002; AKYILDIZ, 2002).

Em cenários de automação industrial pressupõe-se ambientes com diversos sensores enviando periodicamente mensagens para centrais de controle e/ou monitoramento. Trabalhos recentes propõem a substituição de redes cabeadas por redes sem fio nos ambientes industriais (BAILLIEUL; ANTSAKLIS, 2007), onde existem diversos cenários nos quais os sensores estejam ligados ao controlador através de redes

sem fio e o controlador esteja ligado diretamente, ou através de outras redes, a um ou mais atuadores. Esses sistemas são categorizados como de Controle via Rede (*Networked Control System* – NCS).

Outra aplicação vislumbrada é o acoplamento de pequenos nodos sensores em pontos estratégicos de máquinas e equipamentos objetivando monitorar o estado das mesmas, no sentido de verificar se estão sujeitos a fadigas ou operando fora da faixa nominal. Esses sistemas são categorizados como de manutenção preventiva (*Predictive Maintenance* – PdM) (KRISHNAMURTHY et al., 2005).

Portanto, a troca de mensagens entre sensores e atuadores ou sistemas supervisórios se constitui em um desafio atual em redes sem fio, devido às necessidades de garantias temporais bem como a necessidade de robustez da rede em relação a perda de mensagens ou correteude dos dados.

Uma característica indesejável do ambiente industrial é que, em geral, ele é bastante ruidoso (ZVEI, 2009). Ainda em situações em que todos os nodos compartilhem o mesmo canal, cada enlace da fonte ao destino pode apresentar diferentes taxas de erros, independente da ausência ou não de colisões. Esses problemas têm várias fontes e incluem a distância entre origem e destino, a presença ou ausência de obstáculos entre ambos, desvanecimento por múltiplos percursos, interferência eletromagnética devido a outras fontes eletromagnéticas etc. O conjunto destes ruídos tem um comportamento que pode ser aproximado por uma função de distribuição não exponencial ou log-normal, do tipo “cauda longa” (WILLIG; MATHEUS; WOLISZ, 2005) Por outro lado, o modelo de confiabilidade de comunicações do IEEE 802.15.4 é baseado no mecanismo ARQ (*Automatic Repeat reQuest*). Mecanismos ARQ assumem que haverá o reencaminhamento das mensagens imediatamente após os insucessos, o que pode levar a um novo insucesso devido ao tipo de ruído na indústria. Outra possibilidade é encarregar a camada de transporte (não especificada no padrão IEEE 802.15.4) pela retransmissão de mensagens o que pode levar a perda do *deadline* da mensagem, já que pode transcorrer um tempo relativamente longo entre a detecção da perda e o pedido de reenvio da mesma. Sendo assim, novos modelos se fazem necessários para o tratamento da perda de mensagens com garantias temporais, alta ocupação do meio e baixo consumo dos recursos energéticos.

Esta questão de confiabilidade é exacerbada em aplicações industriais no nível das células da manufatura, onde sensores/atuadores são agrupados e, dependendo do tamanho da célula, pode haver alta taxa de ocupação do meio, com várias pequenas mensagens sendo transmi-

tidas. Neste tipo de aplicação, erros de apenas 1 bit em dispositivos tipo *on/off* podem comprometer completamente o funcionamento do sistema. Para evitar este tipo de problema, as redes convencionais para o chão de fábrica (ex. redes *fieldbus*) fazem uso de mecanismos, tais como teste cíclico de redundância e uso de sistemas redundantes.

Em síntese, a adoção de redes sem fio e, mais especificamente Redes de Sensores Sem Fio, em ambientes industriais introduz três novos problemas que vêm sendo investigados pela comunidade científica: *i*) como o meio de transmissão é ainda mais propenso a falhas que os meios cabeados, devidos aos ruídos eletromagnéticos presentes os mecanismos para mitigação destes efeitos devem ser ainda mais robustos; *ii*) nodos das redes de sensores sem fio possuem escassez de recursos (memória, capacidade de processamento, fonte energética); e *iii*) o meio de comunicação pode ser compartilhado com outros tipos de redes sem fio (principalmente no caso da adoção da frequência ISM 2,4 GHz) e mensagens de controle ou retransmissões aumentam a possibilidade de conflitos de acesso ao meio.

Importante observar que as estratégias para tratar as questões *i*), *ii*) e *iii*) necessitam assumir soluções algorítmicas que provenham algum tipo de balanceamento (*trade-off*) entre os parâmetros considerados. Isso porque, mecanismos tradicionais para aumentar a confiabilidade das redes podem sobrecarregar os nodos (que possuem recursos limitados) e o próprio meio (o qual é compartilhado), podendo causar uma espécie de “efeito dominó” na perda de confiabilidade da rede, resultando numa condição pior do que ocorreria se estes mecanismos simplesmente não fossem utilizados.

Uma técnica que vem se mostrando capaz de atender a essas questões é a codificação de redes, que surgiu no início dos anos 2000 (AHLWEDE; LI; YEUNG, 2000), como uma proposta que permite a nodos intermediários de uma rede de comutação de pacotes, além de repassar mensagens, combinar informações binárias advindas de fluxos de dados independentes aumentando, assim, a taxa efetiva de transmissão na rede. Essa técnica logo atraiu interesse da academia, e foi formada uma comunidade com propostas de uso desta técnica buscando aumentar a taxa de transferência, reduzir atrasos e/ou melhorar a segurança da rede contra ataques maliciosos.

O emprego da técnica de codificação de rede em redes IEEE 802.15.4 se apresenta promissora no sentido de reduzir o tráfego redundante na rede, prover maior confiabilidade e reduzir o consumo energético.

1.2 PROPOSTA DE TESE

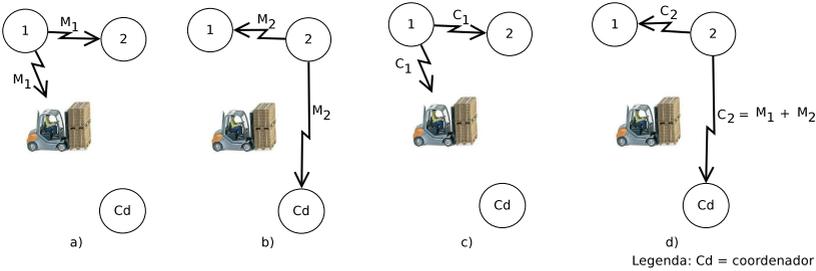
1.2.1 Objetivo geral

A proposta central dessa tese é a proposição, implementação e testes comparativos de novos protocolos para retransmissão de mensagens com base no estudo e entendimento do atual estado da arte. Os mecanismos de retransmissão de mensagens são essenciais para o aumento da confiabilidade da rede.

1.2.2 Objetivos específicos

- Implementação de técnicas de codificação de rede nas redes IEEE 802.15.4 para aumentar a confiabilidade na transmissão de mensagens. Esta implementação deverá atender todas as restrições (memória, capacidade de processamento, fonte energética) dos nodos.
- Proposição de expansão de uso do IEEE 802.15.4 em ambientes industriais. A norma IEEE 802.15.4 estabelece as camadas física e de acesso ao meio para emprego em redes WPAN. Como já foi salientado, esta apresenta algumas restrições para seu emprego no ambiente industrial, então, este trabalho propõe a expansão de seus modelos, para permitir seu emprego nas redes industriais, mantendo total compatibilidade com nodos legados. Esta expansão cria uma nova classe de nodos que terão os requisitos de confiabilidade ampliados.
- Modelar ambientes industriais com todas suas especificidades, seja em experimentos ou simulações.
- Desenvolvimento de plataforma experimental e de simulações que permitam coletar dados sobre o funcionamento das novas propostas, bem como seu comparativo com técnicas usuais. As duas plataformas serão utilizadas de maneira complementar, no sentido de ensaiar os protocolos e permitir conclusões a respeito de seus funcionamentos bem como propiciar propostas de melhorias em seus modelos, dadas as observações obtidas durante o próprio desenvolvimento das experimentações/simulações.

Figura 1: Problema.



Fonte: própria

1.2.3 Problema

Um grave problema que pode ocorrer numa rede sem fio implantada no chão de fábrica é a perda de mensagens. Isso pode levar a consequências graves aos mecanismos de controle e automação. Na Figura 1 é representada uma rede composta de 3 nodos, um deles assumindo o papel do coordenador, ao qual se destinam as mensagens dos demais nodos. Em *a)* e *b)* os nodos encaminham suas mensagens, sendo que o nodo 1 não obtém sucesso devido a presença de um obstáculo (podendo também ser entendido como ruído). Uma das maneiras de contornar esse problema é o uso da cooperação, onde um nodo ouve o meio e captura todas as mensagens que conseguir, como representado em *c)* e *d)*. Em *c)* o nodo 1 encaminha o conjunto de mensagens por ele armazenadas e em *d)* o nodo 2 faz o mesmo. Novamente o nodo 1 não obtém sucesso mas o nodo 2 sim. Nesse caso o coordenador receberá ambas as mensagens.

Essa abordagem apresenta alguns problemas:

- Todos os nodos devem permanecer constantemente ouvindo o meio, o que provoca alto consumo energético. Isso leva a necessidade de coordenação dos nodos.
- Na Figura 1 é perceptível que o nodo 1 não deveria tentar cooperar com o sistema, já que não está obtendo sucesso e seu esforço extra não traz benefícios à rede. Outro aspecto relacionado a isso é que o sistema gastou um tempo adicional para encaminhar uma mensagem inútil, levando ao desperdício de recursos e, possivelmente, à perda de *deadlines* de mensagens.

- Outro aspecto relacionado à possível perda de *deadlines* é o controle de acesso ao meio. Caso nodos tenham de disputar pelo acesso ao meio, com uso de mecanismos do tipo CSMA podem ocorrer postergações indefinidas de mensagens.
- O nodo 1 provavelmente permanecerá durante um certo tempo com o enlace para o coordenador não funcional, seja por mensagens originadas por ele ou destinadas a ele. Isso mostra a necessidade de explorar mecanismos com diversidade temporal.
- Quando a rede for composta de um número expressivo de nodos, a mensagem de cooperação pode se tornar grande e, possivelmente deverá ter de ser fragmentada. Isso leva à necessidade de emprego de mecanismos de codificação do conjunto de mensagens.

Outro aspecto a ser salientado na Figura 1, é que a diversidade espacial foi explorada em benefício coletivo da rede. Como exemplo, os dados da mensagem do nodo 1 só alcançaram o coordenador devido a cooperação do nodo 2.

Em resumo, esta proposta de tese tem como questão central:

– ***Como aumentar a tolerância a perda de mensagens em redes IEEE 802.15.4 empregadas no ambiente industrial?***

A

resposta á essa questão passa pela proposição de novos mecanismos de retransmissão de mensagens que aumentem a confiabilidade na comunicação industrial.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A principal contribuição desta tese é a proposição da técnica NetCOMeR (Network Coding in Opportunistic Message Retransmission), que faz uso da codificação de rede para aumentar a confiabilidade na troca de mensagens dentro do padrão IEEE 802.15.4, criando um novo protocolo de retransmissão oportunista de mensagens que emprega justamente a codificação de rede para maximizar o uso do meio e a taxa de sucesso na transmissão de pacotes e diminuir o consumo energético da rede.

Outra contribuição é a proposta de expansão das classes de uso no padrão IEEE 802.15.4. Nesta nova classe, podem ser empregados mecanismos para ampliar a confiabilidade na re/transmissão de men-

sagens, como por exemplo, a técnica **NetCOMeR**.

Como contribuição extra e que foi necessária para o desenvolvimento desta tese, tem-se a proposta de um método de medição do consumo energético dos nodos, bem como a descrição da metodologia para sua calibração. Este sistema foi utilizado para a medição e comparação do consumo energético entre várias técnicas de retransmissão de mensagens.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O restante deste documento está organizado da seguinte maneira: No Capítulo 2 são introduzidas as principais tecnologias relacionadas com este trabalho, cabendo destaque às Redes de Sensores Sem Fio, ao padrão IEEE 802.15.4, às redes industriais e à Codificação de Rede. O Capítulo 3 apresenta um breve apanhado de recentes trabalhos relacionados às tecnologias envolvidas nesta tese. No Capítulo 4 são apresentados os modelos de redes utilizados, as métricas de desempenho para o comparativos entre as diversas técnicas e também são apresentadas as técnicas básicas de retransmissão de mensagens que servem de base nesse comparativo. As propostas específicas desse trabalho aparecem no Capítulo 5. Este inicia com a proposta de um protocolo para retransmissão de mensagens baseado na codificação de rede, cooperação e diversidade temporal – **NetCOMeR**, bem como, faz a discussão da viabilidade de seu uso em RSSF e finaliza com a proposta de extensão do padrão IEEE 802.15.4, habilitando a criação de uma terceira classe de serviços. No Capítulo 6 é apresentado um conjunto expressivo de resultados de ensaios e simulações realizados, explorando vários aspectos pertinentes ao trabalho. Para finalizar, no Capítulo 7 são tecidas as conclusões finais, bem como elaboradas propostas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são redes formadas por pequenos sensores denominados nodos e que utilizam rádio comunicação para troca de mensagens. Basicamente, os nodos são compostos de uma fonte de energia, unidade de sensoriamento, unidade de processamento e um módulo de rádio (AKYILDIZ, 2002). Os sensores podem monitorar os mais diversos fenômenos físicos como: pressão, temperatura, umidade, composição do solo, movimento veicular, ultrassom, radiação infravermelha, vibração, nível de ruído, luminosidade, presença ou ausência de certos objetos, níveis de estresse mecânico, concentração de clorofila etc (YONEKI; BACON, 2005; ESTRIN et al., 2002; SHARMA; GOLUBCHIK; GOVINDAN, 2010; MAINWARING et al., 2002; AKYILDIZ, 2002).

Redes industriais são redes especificamente projetadas para operação com restrições de tempo real e tolerância a faltas e serem usadas predominantemente em aplicações de monitoramento e de controle e automação. Devido às restrições de tempo real, estas redes são normalmente cabeadas e somente as camadas física, enlace e aplicação do modelo de referência OSI são usadas, inibindo a comunicação em múltiplos saltos e os atrasos e indeterminismos temporais associados ao enfileiramento nos nodos intermediários (KARL; WILLIG, 2007).

No sentido de lidar com o ambiente físico, monitorando o ambiente (máquinas e equipamentos) e controlando-o, as redes industriais são similares às RSSF convencionais, no entanto algumas nuances devem ser salientadas quando do seu emprego no ambiente industrial. RSSF em geral não têm compromissos com tempo real e são focadas em aplicações que toleram longos atrasos e variações de atrasos. Por outro lado, redes industriais não têm grandes preocupações com a confiabilidade individual do nodo, com questões de auto organização e auto manutenção da rede, já que a implantação dos nodos ocorre de maneira controlada e há posterior monitoramento dos mesmos.

Os padrões de RSSF WirelessHART (IEC, 2009) e ISA100.11a (ISA, 2011) se destacam como soluções de comunicação sem fio para o ambiente industrial. Estes padrões usam parcialmente o padrão IEEE 802.15.4, principalmente na camada física. Posto de outra forma, o padrão IEEE 802.15.4 é a base para estas soluções, justificando o enfoque desta tese.

A cooperação é um conceito que tem sido empregado para aumentar a eficiência de redes de comunicação, onde tem sido larga-

mente aplicado a comunicações sem fio (NOSRATINIA; HUNTER; HEDAYAT, 2004). A codificação de rede (NC, do inglês *Network Coding*) é uma técnica que também está sendo empregada para aumentar a eficiência de redes de comunicação com um possível aumento na taxa de transmissão em redes cabeadas e, posteriormente, em RSSF (FRAGOULI; SOLJANIN, 2006). Neste sentido, nesta tese defende-se o uso das técnicas de colaboração e codificação de rede com o intuito de obter um aumento de confiabilidade na transmissão de mensagens.

Neste capítulo serão conceituadas RSSF, o padrão IEEE 802.15.4, finalizando com a conceituação da codificação de rede e cooperação.

2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO

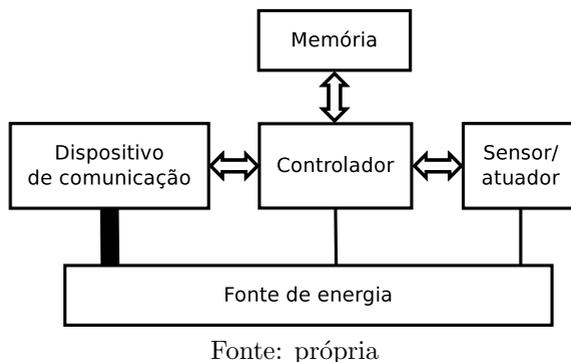
A natureza colaborativa das RSSF apresenta algumas vantagens em relação às redes tradicionais, incluindo a auto organização, rápida implantação, mobilidade, flexibilidade (GUNGOR; HANCKE, 2009) e baixo custo de manutenção (YOO et al., 2009). As RSSF são redes que se caracterizam pela capacidade de englobarem dezenas a milhares de nodos sensores com objetivos comuns (AKYILDIZ, 2002). Por outro lado, essas redes possuem nodos com escassos recursos computacionais e energéticos, o que pode torná-los não confiáveis, tornando necessários a coordenação da rede e o gerenciamento dos recursos disponíveis, objetivando aumentar a confiabilidade da rede como um todo.

2.1.1 Nodos

Um típico nodo de uma RSSF é composto por: sensor/atuador, dispositivo de comunicação, controlador/memória e fonte de energia, Figura 2 (KARL; WILLIG, 2007). Os nodos das RSSFs devem ser de pequenas dimensões e de baixo custo levando a fortes restrições em vários aspectos, dentre as quais: baixo poder computacional, baixa capacidade de armazenamento de dados e baixa disponibilidade de energia.

Nas aplicações industriais, o reduzido poder computacional e a baixa capacidade de memória não são fatores extremamente limitantes, devido ao fato da maioria das aplicações industriais demandar baixa taxa de dados (GUNGOR; HANCKE, 2009; AGHA et al., 2009). Por outro lado, a maior parte das mensagens devem ser periódicas e res-

Figura 2: Representação por blocos dos componentes de um nodo sensor.



peitar os atrasos máximos determinados para cada aplicação. Nessas aplicações não existem sérias restrições energéticas como ocorre em diversas aplicações de RSSF como, por exemplo, nas aplicações de monitoramento florestal, onde um nodo sem energia será considerado um nodo definitivamente perdido. No entanto, é um fator importante, já que a frequente troca de baterias gera, além do alto custo, problemas de logística na sua substituição, além de possível parada na produção.

Controlador e memória

O controlador é o componente mais importante de um nodo sensor. Ele recebe informações dos seus sensores, processa os dados em acordo com seus algoritmos, implementa a pilha de protocolos de rede, decide quando e o que encaminhar, recebe dados de outros nodos sensores e decide o comportamento do atuador.

Um típico nodo sensor é composto de um microcontrolador de 8 a 32 bits, com frequência de operação entre 8 a 400 MHz. As memórias internas ao processador do tipo RAM (do inglês *Random Access Memory*) variam de 4 a 16 kB, já as do tipo EEPROM (do inglês *Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) variam de 1 a 128 kB. Em alguns modelos são admitidas memórias externas do tipo FLASH que podem variar de 64 a 256 kB. O correto dimensionamento das quantidade de memórias embarcadas nos nodos, especialmente RAM, tem forte relação na determinação de possíveis aplicações, bem como no custo e consumo energético do nodo (RUIZ et al., 2004).

Fonte energética

Os nodos das RSSF devem ser pequenos e autônomos em energia para garantia de seu baixo custo, facilidade de implantação e empregabilidade. Assim sendo, não permitem a presença de baterias com alta capacidade de energia e, normalmente, nem o acoplamento em redes elétricas convencionais. Exceção feita aos nodos atuadores, que ficam acoplados a máquinas eletrificadas e, normalmente, têm fácil acesso à energia ilimitada.

O consumo de energia nos nodos das RSSFs normalmente é dividido em três domínios: sensoriamento, processamento de dados e comunicação (GUNGOR; HANCKE, 2009), sendo que o maior consumo ocorre na comunicação. A comunicação engloba três estados distintos: transmissão, recepção e escuta do meio. Todos estes três estados têm consumos energéticos próximos. O consumo típico de um nodo durante a comunicação é de 25-50 mA operando na tensão típica de 3 a 5 V . No período inativo o consumo cai para a faixa de dezenas de μA . Isto implica que o consumo da maioria dos nodos é de poucos miliwatts durante a comunicação e de poucos microwatts durante o período de inatividade (MOGHE et al., 2009).

Dispositivo de comunicação

O dispositivo de comunicação é utilizado para troca de mensagens entre os nodos. Para o caso de comunicação sem fio, as escolhas usuais são: rádio frequência, comunicação óptica e ultrassom. Certamente a mais relevante é a rádio frequência (RF, do inglês *Radio Frequency*), por sua taxa de dados, taxa de erros aceitável, consumo energético razoavelmente baixo e sem necessidade de visada direta entre os nodos comunicantes.

As faixas de frequências mais comumente utilizadas estão centradas em 868, 915 e 2450 MHz, com taxa de transmissão variando em média de 1 kbps a 1 Mbps. A comunicação ocorre no modo *half-duplex*, ou seja, a transmissão e recepção se dão em tempos distintos. Como os rádios comunicadores são um dos principais consumidores energéticos de um nodo, tenta-se minimizar este efeito habilitando a variação da potência de transmissão. Devido a restrições dos circuitos dos rádios, normalmente esta variação se dá em níveis pré-fixados e não de forma contínua. Em geral, os dispositivos contam com sensor de portadora, RSSI (do inglês *Received Signal Strength Indicator*) e/ou LQI (do inglês *Link Quality Indicator*) permitindo a avaliação do canal e do nível de sinal disponível que, dependente do protocolo, pode ser utilizado para

alterar parâmetros do rádio com respeito à intensidade do sinal emitido pelo par comunicante.

Conforme já dito, o gasto energético é praticamente o mesmo na recepção ou transmissão de dados (VALLE et al., 2013a). Apesar do objetivo final de uma RSSF ser a de implementar a comunicação de dados monitorados pelos sensores, uma boa estratégia para economia de energia é manter o rádio desligado o máximo possível.

Sensores e atuadores

Sensores monitoram grandezas do meio físico e repassam os dados equivalentes à grandeza monitorada para o controlador. Exemplos típicos de sensores passivos incluem termômetro, microfones, sensores de luz, vibração, higrômetros, fadiga mecânica, tensão em materiais, sensores químicos para determinados compostos, detetor de fumaça, câmera etc. Existem também sensores ativos, onde a medição se dá pela resposta do meio a determinado estímulo, como radar, sonar e sensores sísmicos.

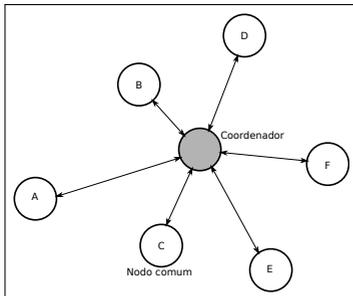
Os atuadores não são usualmente utilizados em RSSF convencionais. No entanto, em redes industriais estes usualmente desempenham papel importante nas aplicações. Do ponto de vista da arquitetura interna de um nodo, normalmente os atuadores são bem mais simples que sensores. Em geral, o sinal elétrico de uma porta é utilizado para atuar em relés que comandam motores, válvulas, lâmpadas, alarmes etc. Nesses casos, toda a complexidade do atuador é externa ao nodo.

2.1.2 Topologias de rede

As tradicionais RSSF admitem as topologias: estrela, ponto a ponto e agrupamento em árvore.

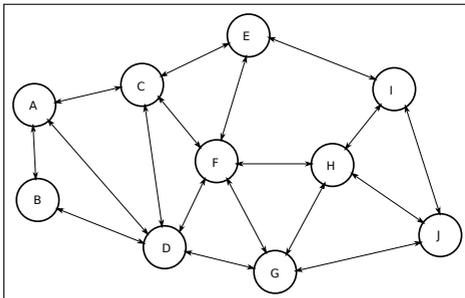
Na **topologia estrela**, Figura 3, existe um nodo central que assume o papel de coordenador da estrela. Cada nodo, ao querer se comunicar com outro, deve primeiramente mandar sua mensagem para o coordenador e este a reencaminhará ao nodo de destino (LEWIS, 2004). Fica evidente, neste tipo de topologia, que o nodo coordenador tem uma sobrecarga de atividades na rede e, em consequência, consome mais energia e pode ser um importante ponto de falha no sistema. Sendo assim, normalmente este nodo deve ter uma fonte extra de energia ou alimentação contínua, sob o risco de este ter sua energia exaurida, comprometendo todo o funcionamento da rede. Também pode ser necessário um coordenador redundante, para minimizar a pro-

Figura 3: Topologia estrela.



Fonte: própria

Figura 4: Topologia em malha.



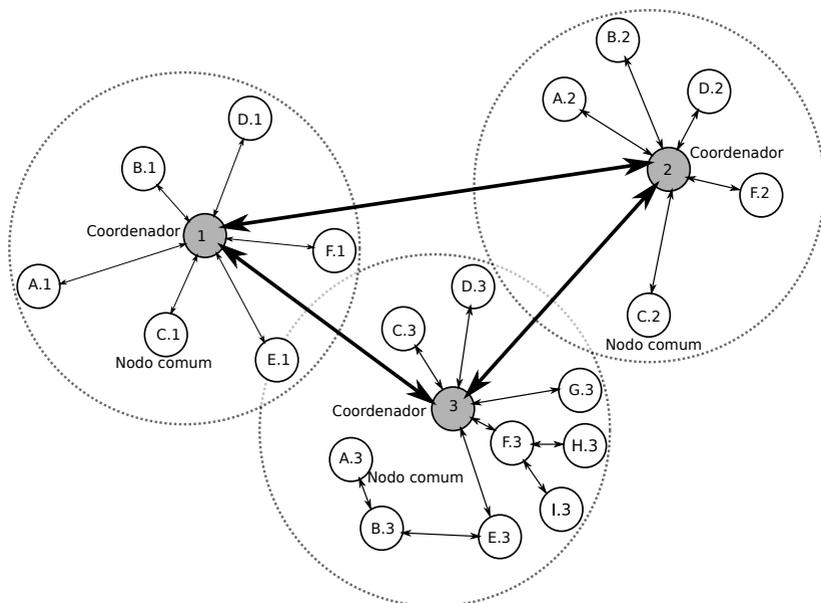
Fonte: própria

babilidade de falhas. Este tipo de rede é a que apresenta a menor latência possível na camada física, mas fica restrita a um único salto, limitando o tamanho da rede devido ao alcance do sinal de rádio.

Na **topologia em malha**, também denominada ponto a ponto, Figura 4, não existe o papel de coordenador. Cada nó tem igual responsabilidade na manutenção da rede. Quando um nó deseja se comunicar com outro, deve fazer uso de um caminho determinado por um protocolo de roteamento. Na maior parte dos protocolos de roteamento, existem vários caminhos a serem seguidos por uma mensagem, chamado de diversidade de caminhos, isto traz mais robustez à rede. O protocolo de roteamento deverá determinar o melhor caminho, segundo determinadas métricas, a ser seguido no momento do envio da mensagem. Em contrapartida, a formação e manutenção das tabelas de roteamento consome recursos computacionais de maneira proporcional ao crescimento do tamanho e da dinamicidade da rede.

A **topologia com agrupamentos em árvore** (*cluster-tree*), Figura 5, pode ser considerada um caso especial onde há a junção de várias redes estrela e/ou malha num outro agrupamento (*cluster*) entre seus coordenadores. Os níveis hierárquicos de agrupamento podem ser dois ou mais, dependente da aplicação e/ou quantidade de nós. Esta topologia também é conhecida como híbrida. Neste tipo de rede, a exemplo da topologia em estrela, existem dois tipos de nó: comum e coordenador. Os nós coordenadores podem trocar mensagens entre coordenadores do mesmo nível hierárquico, com o coordenador do nível superior e com os nós comuns pertencentes a seu agrupamento.

Figura 5: Topologia com agrupamentos em árvore.



Fonte: própria

Por exemplo, na Figura 5, se o nodo C.1 desejar enviar uma mensagem para o nodo F.2, em primeiro lugar ele deverá encaminhar sua mensagem para o coordenador 1, este a encaminhará até o coordenador 2 e este, por sua vez, a repassará ao nodo F.2. Neste tipo de rede tem-se um ligeiro aumento da latência, quando comparado à topologia estrela, mas em contrapartida aumenta-se a taxa efetiva total na rede, já que, a rede é segmentada e, em consequência, podem ocorrer comunicações simultâneas em diferentes segmentos sem a interferência mútua. Ganhos ainda maiores podem ser obtidos com uso de enlaces especiais entre os coordenadores, permitindo uma maior taxa de transferência. Além disto, pode-se ter o aumento do tamanho da rede, seja quanto a quantidade de nodos, seja quanto a abrangência espacial da mesma.

Na topologia em malha, onde a comunicação se dá por múltiplos saltos, obter garantias temporais é uma tarefa complexa. Por outro lado, permite a continuidade do funcionamento da rede mesmo com problemas em um ou mais nodos, já que, os demais nodos podem conti-

nuar roteando os pacotes. No entanto, neste tipo de rede podem ocorrer problemas pelo congestionamento da rede e, conseqüentemente, perda de pacotes e problemas de atraso com enfileiramento (WILLIG, 2008).

Na topologia estrela é relativamente fácil obter garantias de tempo, já que, as comunicações utilizam somente um salto. Em contrapartida, para a maioria das aplicações industriais, a topologia em estrela não atende a todas as demandas devido ao alto número de nodos necessários e a distância entre os mesmos, já que devem estar espalhados por todo o chão de fábrica.

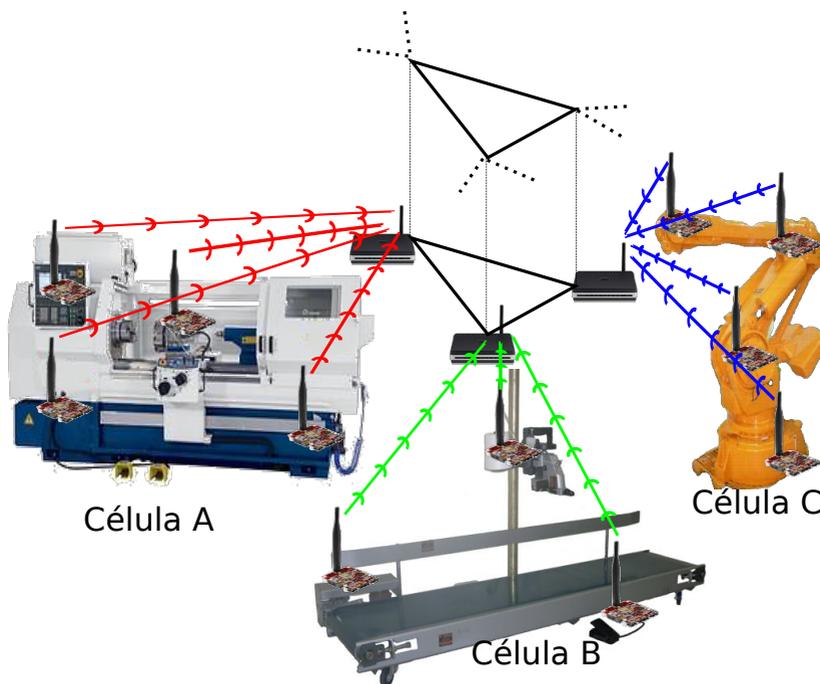
Uma das abordagens mais recomendadas para RSSF industriais é a do uso da segmentação de rede – agrupamento em árvore – sendo que em cada segmento (célula) estabelece-se comunicação em tempo real, e entre segmentos relaxa-se (aumenta-se) os requisitos de atraso de tempo (Figura 6). Com segmentos atendendo cada máquina, equipamento ou setor específico, pode-se resguardar a temporalidade das mensagens setorialmente e também num plano maior. Dependendo do nível de robustez desejado, pode-se acrescentar nodos coordenadores redundantes de tal maneira que, na ocorrência de problemas com um determinado coordenador, algum nodo redundante assuma sua função.

2.1.3 Conceitos de diversidade

Diversidade em redes sem fio, algumas vezes referida como diversidade de canal ou diversidade de enlace, está relacionada com o fenômeno em que transmissões por diferentes canais, faixa de frequência e período de tempo possuem diferentes condições de recepção, sofrendo diferentes atenuações e/ou perdas ao longo do caminho. Um esquema de diversidade procura minimizar os efeitos de tais fenômenos objetivando obter transmissões com melhor qualidade e maior confiabilidade. A seguir serão discutidos alguns tipos de diversidade, baseados em Chen, Zhang e Marsic (2009), que estão relacionadas ao presente trabalho.

Diversidade Temporal – Um sistema de comunicações sem fio pode operar em um ambiente dinâmico devido à mobilidade do par transmissor/receptor ou de algum obstáculo intermediário. Desse modo, amostras de transmissões em diferentes intervalos de tempo podem ter variações significativas no nível de atenuação, mesmo se o transmissor e o receptor estiverem estáticos. Numa situação extrema, tal variação pode ser observada mesmo com uma única transmissão. Para combater esse fenômeno, mensa-

Figura 6: Topologia com agrupamento em árvore na indústria.



Fonte: própria

gens idênticas podem ser transmitidas por múltiplos instantes de tempo, promovendo maior robustez ao sistema. Alternativamente, o mecanismo de FEC (do inglês, *Forward Error Correction*), onde dados redundantes e codificados são enviados em avanço, pode ser utilizado para espalhar a informação sobre um período mais longo de tempo de transmissão. Cabe salientar que essa é a principal forma de diversidade de canal utilizada em comunicações.

Diversidade Espacial – Entre um transmissor e um receptor podem existir múltiplos percursos para o sinal se propagar, seja com componente de linha de visada ou não. A composição desses percursos de propagação depende das exatas posições do transmissor, receptor e todos os obstáculos. Então, uma pequena mudança de posição desses elementos pode variar significativamente a assi-

natura do canal. Para utilizar a diversidade espacial, múltiplos transmissores (i.e., diversidade de transmissão) ou múltiplos receptores (i.e., diversidade de recepção) podem ser empregados para a transmissão das mensagens combinadas. Múltiplas antenas podem viabilizar esse tipo de diversidade. Sistemas de transmissão do tipo MIMO (do inglês *Multiple-Input and Multiple-Output*) e de codificação espaço-temporal são exemplos de utilização dessa técnica.

Diversidade em Frequência – A propagação de sinais em diferentes frequências experimenta diferenças na reflexão, difração e espalhamento ainda que seja considerado o mesmo instante de tempo e localização. Um canal sem fio é afetado pelo desvanecimento seletivo em frequência que é dado pela variação do ganho do canal no domínio da frequência. Por definição, o **ganho do canal** é um processo estocástico centrado em um valor médio. Medidas corretivas para esse tipo de desvanecimento incluem transmissões simultâneas por múltiplas subportadoras ou por mecanismos de aferição da atenuação dos canais e seleção do mais adequado para determinado instante de tempo ou par transmissor/receptor.

Diversidade por Multiusuário – Em uma rede sem fio com múltiplos enlaces entre pares transmissor/receptor, a programação e seleção de canais podem ser executadas de tal forma que os usuários com “melhores instâncias” são favorecidos para melhor explorar a variação do canal. Assim, o aumento global da taxa de transmissão do sistema cresce com o número de usuários e com ganho na variação do canal.

Diversidade por Multipercurso – Em uma rede sem fio de múltiplos saltos, um determinado par transmissor/receptor pode ser “conectado” por meio de múltiplos percursos na rede. As propriedades desses percursos variam de diversas maneiras, tais como comprimento do salto, largura de banda, atraso total, atraso na fila etc. Em geral, a diversidade multipercurso, apresenta uma noção global, já que contempla todo o caminho a ser percorrido por uma mensagem, e leva mais tempo para reação a eventuais erros na rede como um todo.

A diversidade, como um esquema para melhorar o transporte de informações, pode funcionar em qualquer camada da rede ou numa combinação das mesmas. Por permitir implementações relativamente simples, a diversidade temporal é amplamente adotada. A diversidade

em frequência também já apresenta relativa penetração, através da técnica denominada salto de frequência ou salto de canal (*frequency hopping*). Em contraste, a diversidade espacial só recentemente atraiu um número crescente de atividades de investigação em RSSF, referidos como comunicação cooperativa, já que o emprego de antenas do tipo MIMO em nodos ainda é inviável. Uma das principais razões por trás desse recente interesse é a melhora na capacidade de processamento digital de sinais que os atuais dispositivos móveis possuem.

2.2 ESPECIFICIDADES DOS AMBIENTES INDUSTRIAIS

Tradicionalmente os sistemas de automação industrial se baseiam em redes industriais cabeadas. Contudo, essas redes apresentam um alto custo de implantação e manutenção, inibindo seu emprego em larga escala. Além disso, existem componentes móveis, onde naturalmente o sistema cabeado é um fator indesejado, já que, esse tipo de cabeamento estruturado pode apresentar um alto custo por metro, dependendo da aplicação (INDUSTRIAL_WIRELESS_COMMUNITY, 2002).

Com os recentes avanços nas RSSF, viabiliza-se seu emprego na automação industrial de forma massiva, já que utilizam componentes de baixo custo e fácil implementação. Com pequenos nodos sensores e atuadores com comunicação sem fio, é possível disseminar o uso da automação. Os sistemas sem fio podem, finalmente, eliminar dezenas de milhares de metros de fiação na indústria.

Além da aplicação em controle e automação industrial, pequenos nodos sensores podem ser acoplados em pontos estratégicos das máquinas objetivando monitorar o estado das mesmas. Essa técnica é denominada manutenção preventiva (PdM, do inglês *Predictive Maintenance*) (KRISHNAMURTHY et al., 2005). Este monitoramento tem por objetivo verificar se máquinas e equipamentos estão sujeitos a fadigas ou operando fora das especificações, aumentando sua disponibilidade e sua vida útil.

Considerando o emprego de RSSF na automação de diversos setores da indústria, diferentes tipos de requisitos temporais e de confiabilidade precisam ser atendidos por essas redes. A própria organização *International Society of Automation* (ISA) reconhece esta questão, definindo seis classes de uso, dependentes da aplicação, para troca de mensagens num ambiente industrial, como pode ser visto na Tabela 1. As mensagens foram categorizadas de acordo com o grau de “importância” no atendimento do *deadline*, salientando a crescente importância das

Tabela 1: Classes de Uso.

Categoria	Classe	Aplicação	Descrição
Segurança	0	Ações emergenciais	(sempre crítica)
Controle	1	Circuito fechado para controle regulamentar	(muitas vezes crítica)
	2	Circuito fechado para controle de supervisão	(geralmente não crítica)
	3	Controle em malha aberta	(humano na malha)
Monitoramento	4	Alerta	Consequências operacionais de curto prazo (por exemplo, a manutenção baseada em eventos)
	5	Registro e <i>downloading/uploading</i>	Sem consequências operacionais imediatas (por exemplo, coleta de história, sequência de eventos, manutenção preventiva)

Fonte: adaptação de (ISA, 2007)

mensagens, até o limite máximo das mensagens destinadas ao controle em ações emergenciais. Segundo a própria ISA, as redes sem fio podem ser adotadas para envio de mensagens nas classes de nível 1 ao 5. Para a classe de nível 0 recomenda-se somente o emprego de redes cabeadas.

A seguir serão detalhadas as principais características que levam a restrições específicas na aplicação de redes industriais, sejam cabeadas ou sem fio.

2.2.1 Restrições temporais

Aplicações industriais normalmente estão associadas a restrições temporais, ou seja, há necessidade de se respeitar tempos máximos de atrasos nos serviços implementados. Em um sistema de tempo real a correção depende não só da correção dos próprios dados mas também do instante no qual são produzidos (FARINES; FRAGA; OLIVEIRA, 2000). De outra forma, um sistema de tempo real é um sistema computacional para o qual são definidos (pelo próprio sistema físico monitorado) prazos limites a respostas (reações). Assim sendo, boa parte das mensagens trocadas na rede devem ter seu tempo máximo de entrega conhecido.

O uso de protocolos determinísticos, com tempo de troca de mensagens conhecidos, se faz necessário nas redes industriais. As garantias de tempo real são intrinsecamente ligadas aos protocolos de acesso ao

meio e de roteamento, quando houver.

2.2.2 Restrições do meio ambiente

Um aspecto importante nos ambientes industriais são as interferências no meio sem fio devido a altos níveis de ruídos eletromagnéticos, causados por equipamentos como motores, inversores de frequência, equipamentos de solda etc. Outro importante fator de interferência são outros sistemas de comunicação sem fio, operando nas mesmas frequências (ZVEI, 2009), já que a comunicação sem fio é cada vez mais empregada nas mais diferentes áreas.

Em Willig et al. (2002) foi proposto um modelo baseado em medições de interferências típicas que podem ocorrer em redes sem fio industriais. Foi verificado que o ruído seguia uma distribuição log-normal e foi construído um modelo semi-markoviano para o mesmo. Baseado neste modelo é possível estabelecer o nível de perda de bits (BER, do inglês *Bit Error Rate*) e, a partir deste, o nível de perda de pacotes (PER, do inglês *Packet Error Rate*) (NOBRE et al., 2010).

2.2.3 Confiabilidade

Erros em dados podem trazer sérias implicações nas aplicações industriais. Erro de apenas 1 bit em dispositivos *on/off* compromete completamente seu funcionamento. Para evitar este tipo de problema faz-se uso de alguns mecanismos para verificação/recuperação de dados: *i*) teste cíclico de redundância (CRC, do inglês *Cyclic Redundancy Check*), *ii*) correção de erros em avanço – FEC, *iii*) retransmissão de mensagens por mecanismos ARQ, *iv*) uso de sistemas redundantes e *v*) uso de cabos de comunicação blindados.

O uso de mecanismos do tipo CRC permite detectar boa parte dos erros, mas não consegue corrigí-los, ou seja, serve tão somente para decidir sobre o descarte ou não do pacote. Para correção de parte da informação são utilizados os mecanismos do tipo FEC, que encaminham informações redundantes ao destino, de tal modo que este consiga recuperar certo nível de erros, dependente da robustez desejada. Ainda assim, pode haver o recebimento de mensagens irrecuperáveis, que serão descartadas pelo receptor ou simplesmente, dado o nível de ruído no meio, a mensagem enviada será entendida como ruído pelo destinatário. No caso de perda de mensagens, existe outra classe de mecanismos que

tentam mitigar este problema. O mais usual é o mecanismo ARQ, que é um método de controle de erro para transmissão de dados que usa o reconhecimento (ACK), no caso de sucesso na recepção de mensagens, e retransmissões, no caso de recepção com erro, objetivando obter a transmissão de dados mais confiáveis.

Cabe salientar que o uso desses mecanismos pode se dar de maneira cumulativa. Dependendo do nível de robustez desejado pode-se habilitar parte ou todos os mecanismos, com a consequente sobrecarga no sistema, já que eles não são incompatíveis entre si.

No caso particular das RSSF, o meio de transmissão é ainda mais propenso a falhas que os tradicionais meios cabeados e, portanto, os mecanismos para mitigação destes efeitos devem ser ainda mais robustos, com novas classes de FEC e retransmissão de mensagens. Estes mecanismos geram uma sobrecarga de processamento, ocupação de memória e banda que as RSSF precisam suportar, mesmo com a escassez de recursos dos nodos e da rede.

2.3 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011) é um padrão que define o protocolo de interconexão de dispositivos via comunicação por rádio numa rede de área pessoal (WPAN, do inglês *Wireless Personal Area Networks*). O padrão usa como mecanismo de acesso ao meio o CSMA-CA (do inglês *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) e suporta a topologia estrela, ponto a ponto e agrupamento em árvore. O acesso ao meio é baseado em contenção, entretanto, usando uma estrutura opcional de superquadro, compartimentos (*slots*) de tempo podem ser alocados por um coordenador PAN (do inglês *Personal Area Networks*) para os dispositivos. No caso do uso do modo com compartimentos, o acesso ao meio é feito sem o uso do CSMA-CA.

O padrão prevê a especificação somente das camadas física e de enlace. A especificação das demais camadas não é contemplada e fica a critério de outros padrões.

O padrão caracteriza dois diferentes dispositivos: dispositivo de função completa (FFD, do inglês *Full-Function Device*) e dispositivo de função reduzida (RFD, do inglês *Reduced-Function Device*). O FFD pode operar em três modos: coordenador PAN, coordenador ou dispositivo. Toda rede formada no padrão IEEE 802.15.4 deverá ter um, e somente um, coordenador PAN que controla e identifica a rede onde outros dispositivos se encontram associados.

Tabela 2: Canais e taxa de dados do IEEE 802.15.4.

Canais	Frequência (MHz)	Faixa de frequência (MHz)	Modulação	Taxa de dados (kbps)
0	868	868 - 868,6	BPSK	20
			ASK (opcional)	250
			O-QPSK (opcional)	100
1 - 10	915	902 - 928	BPSK	40
			ASK (opcional)	250
			O-QPSK (opcional)	250
11 - 26	2450	2400 - 2483,5	O-QPSK	250

Fonte: própria

Um RFD deve ser usado para aplicações extremamente simples, seja como sensor ou atuador. Ele é projetado para não enviar ou receber grandes quantidades de dados e pode estar associado a um único FFD num determinado tempo, consequentemente, ele pode ser implementado usando recursos mínimos.

2.3.1 Camada física

Na camada física, possíveis frequências a serem utilizadas são: 868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz, que permitem taxas nominais de transmissão de 20 a 250 kbps, conforme pode ser observado na Tabela 2. A escolha da frequência a ser utilizada depende dos órgãos regulatórios locais e, dentre as faixas permitidas, da preferência do usuário. Nas três faixas de frequência existem ao todo 27 possíveis canais a serem utilizados.

As responsabilidades da camada física são as seguintes (IEEE, 2011):

1. Ativação e desativação do transceptor de rádio, permitindo que o mesmo transmita ou receba dados, adormeça (entre no modo *sleep*) ou seja desligado.
2. Avaliação de canal livre (CCA, do inglês *Clear Channel Assessment*). Verifica se o meio de transmissão se encontra ocupado ou livre. Especifica três possíveis modos: **CCA Mode 1** que determina se a energia está abaixo de um determinado nível, **CCA Mode 2**

que verifica a existência ou não da portadora e CCA Mode 3 que é a combinação da duas anteriores.

3. Detecção de energia no canal (ED, do inglês *Energy Detection*). Este serviço pode ser utilizado pela camada de rede como parte do mecanismo de seleção de canal ou pelo CCA para determinar se o canal está ocioso ou ocupado. Ele fornece uma estimativa do nível de sinal recebido dentro da largura de banda do respectivo canal.
4. Indicador de qualidade do enlace (LQI). Caracteriza a qualidade do sinal recebido num determinado canal. Pode ser utilizado como estimativa da distância do dispositivo emissor.
5. Seleção de um dos 27 canais e o consequente ajuste da frequência no transceptor. A seleção do canal é comandada pela camada superior.

O padrão opcional de camada física denominada UWB (do inglês *Ultra Wide Band*) basicamente propõe uma nova camada física que, entre outras melhorias, prevê maior robustez, mobilidade e precisão de estimativa de posicionamento dos nodos, podendo chegar a 1 metro de erro na determinação da posição de um nodo, através do emprego de algoritmos do tipo triangulação ou trilateração.

O UWB possui um espectro que habilita a implementação de dispositivos que podem prover melhorias na resistência ao desvanecimento de múltiplos caminhos, para melhorar o desempenho com uma potência de transmissão muito baixa, além de permitir uma mobilidade em “alta velocidade”. Além disso, as habilidades de economizar energia são incrementadas com uma modulação híbrida, que ainda permite uma arquitetura muito simples de receptor.

2.3.2 Subcamada de controle de acesso ao meio

A Subcamada MAC (do inglês *Medium Access Control*) do padrão IEEE 802.15.4 provê uma interface entre a camada física e as camadas superiores das WPAN. Tem resumidamente as funções (que serão detalhadas na sequência):

- Gerar os *beacons* de rede, caso seja um dispositivo coordenador,
- Sincronização com os *beacons* da rede,
- Apoio na associação e dissociação da PAN,

- Apoio na segurança de dispositivos,
- Emprego do mecanismo CSMA-CA para o acesso ao canal,
- Provisão e manutenção do mecanismo GTS (do inglês *Guaranteed Time Slot*),
- Proporcionar um canal confiável entre pares de entidades MAC.

Um dos grandes problemas desta camada é decidir quem terá direito de transmitir e em que momento, já que o meio físico é compartilhado. Para resolver este problema é utilizado o protocolo CSMA-CA e GTS.

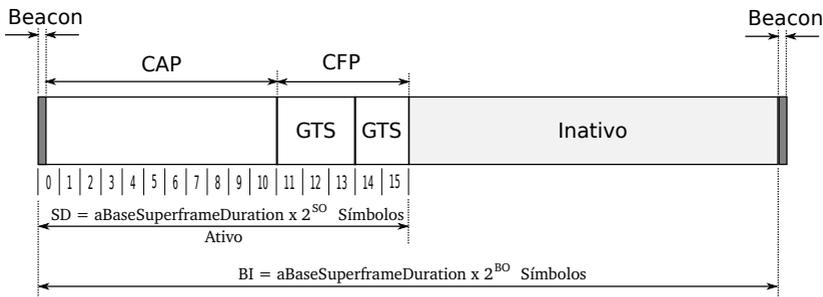
O protocolo CSMA-CA habilita o dispositivo a ouvir o meio (*carrier sense*) e verificar se o mesmo encontra-se ocupado ou não. Caso o meio esteja livre o dispositivo inicia sua transmissão, porém ela pode colidir com a transmissão de outro dispositivo que tenha iniciado a transmissão simultaneamente. Por questões de custos e técnicas, mecanismos de detecção de colisão normalmente não são implementados em nodos das RSSF, como também ocorre na maior parte dos sistemas cujo meio de transmissão é sem fio, assim sendo, implementa-se mecanismos de prevenção de colisões (*collision avoidance*).

A subcamada MAC suporta dois modos de operação: com e sem *beacon*. A escolha do modo é feita pelo coordenador PAN. Em ambos os casos o mecanismo CSMA-CA é fracionado em micro-compartimentos (*backoff*). Um micro-compartimento tem duração de 320 μs para operações na faixa de frequência de 2,4 GHz.

No modo CSMA-CA, sempre que um nodo quiser transmitir dados, ele determina o limite do próximo micro-compartimento, verifica se o meio está livre, se estiver inicia sua transmissão, se não estiver aguarda por um número aleatório de micro-compartimentos e faz nova verificação do meio. Se ainda assim o canal estiver ocupado, o dispositivo aguarda por um novo número aleatório de micro-compartimentos antes de tentar acessar o meio novamente. Se o canal estiver livre, o dispositivo inicia sua transmissão no limiar do próximo micro-compartimento disponível. Mesmo assim colisões poderão ocorrer e não serão detectadas pelos dispositivos transmissores, já que dois ou mais nodos que tenham dados a transmitir podem iniciar suas transmissões simultaneamente, no início de um micro-compartimento.

Caso deseje-se a confirmação do recebimento do quadro, o padrão prevê o envio, pelo dispositivo receptor, de um quadro de reconhecimento (ACK, do inglês *Acknowledgment*), que deverá ser encaminhado imediatamente após o recebimento do quadro contendo dados. Caso habilitado, o envio do ACK não utiliza o mecanismo CSMA-CA, já que, o padrão prevê um tempo ocioso no meio logo após o envio de

Figura 7: Um exemplo da estrutura do superquadro.



Fonte: própria

quadro de dados, reservado justamente para envio do ACK.

O número de tentativas de acesso ao meio é dado pelo parâmetro `macMaxCSMABackoffs`, que tem valor variando entre 0 e 5 e como padrão o valor 4. Após este número de tentativas uma mensagem de falha no canal é gerada e direcionada à aplicação. Este é um fator limitante e que, juntamente com outras características do MAC, pode levar a sérios problemas na confiabilidade da rede, já que em redes densas a probabilidade de falhas de canal aumenta significativamente, muitas vezes mesmo com canal com pouco uso (ANASTASI; CONTI; Di Francesco, 2011).

A parte ativa, Figura 7, pode ser sub-dividida em outras duas partes: CAP e CFP (do inglês *Contention-Free Period*) que corresponde a 16 compartimentos iguais. Os últimos compartimentos, até no máximo sete, podem ser alocados exclusivamente para determinados nodos, ou seja, serão do tipo GTS. O conjunto de GTS forma o período denominado CFP.

No modo com *beacon* as PAN usam o mecanismo de acesso ao meio CSMA-CA para disputa ao meio na transmissão de mensagens durante o CAP (do inglês *Contention Access Period*), onde os micro-compartimentos são alinhados com o início da transmissão do *beacon*, ou seja, os micro-compartimentos de todos os dispositivos são alinhados com o coordenador da PAN. Quadros de ACK e *beacon* são emitidos sem o uso do mecanismo CSMA-CA.

Beacons são gerados periodicamente pelo coordenador PAN, com objetivo de sincronizar e identificar a PAN. Neste modo é criada uma estrutura chamada de **superquadro**. Um exemplo do mesmo pode ser

visto na Figura 7. Seu formato é definido pelo coordenador e pode ser dividido em duas partes: ativa e inativa.

Para aplicações de baixa latência ou que requeiram largura de banda específica, deve-se fazer uso do CFP, cabendo ao coordenador PAN dedicar porções do superquadro ativo para as mesmas. Estas porções são os GTS que correspondem aos últimos compartimentos do superquadro. O dispositivo que necessitar usar um ou mais períodos de GTS deve fazer uma solicitação de reserva do mesmo, através de mensagens enviadas ao coordenador PAN, durante o período CAP. Se o PAN ainda dispuser de GTS livres a demanda será atendida. Os GTS são utilizados somente para a comunicação entre o dispositivo detentor do mesmo e o coordenador PAN.

Para a formação do superquadro o coordenador deve definir os períodos ativo e inativos pelas equações:

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

e

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

onde: SD é (do inglês) *Superframe Duration* e BI é (do inglês) *Beacon Interval*.

Estes atributos determinam a ordem da estrutura do superquadro, baseados no parâmetros BO (do inglês *Beacon Order*) e SO (do inglês *Superframe Order*). O parâmetro `aBaseSuperframeDuration` denota a duração mínima do superquadro, correspondendo a $SO = 0$. O padrão IEEE 802.15.4 fixa esta duração em 960 símbolos, onde um símbolo corresponde a 4 bits. Este valor é equivalente a 15,36 *ms*, assumindo a taxa de dados de 250 *kbps* na frequência de 2,4 *GHz*. Variando-se os parâmetros BO e SO, nas Equações 2.1 e 2.2, pode-se fazer algumas análises rápidas, apresentadas na Tabela 3.

Analisando a Tabela 3 é possível concluir que:

- O tamanho do superquadro pode variar de 15,36 *ms* a aproximadamente 4 min (251658,24 *ms*).
- O tamanho do compartimento pode variar de 0,96 *ms* a aproximadamente 16 *s* (15728,64 *ms*), com a transmissão de dados que varia de 30 *bytes* a 480 *kB*.
- Quanto maior a diferença entre os parâmetros BO e SO, maior será a inatividade da rede e, em consequência, maior será a economia de energia na mesma.

Tabela 3: Alguns exemplos de superquadro.

BO	SO	BI (ms)	SD (ms)	Compartimento (ms)	(bytes)	Comentários
0	0	15,36	15,36	0,96	30	Menor superquadro
1	0	30,72	15,36	0,96	30	Período ativo e inativo iguais
8	8	3932,16	3932,16	245,76	7680	–
14	0	251658,24	15,36	0,96	30	Maior período de inatividade
14	14	251658,24	251658,24	15728,64	491520	Maior compartimento

Fonte: própria

Figura 8: Quadro de *beacon*.

Octets: 2	1	4/10	0/5/6/10/14	2	variable	variable	variable	2
Frame Control	Sequence Number	Addressing fields	Auxiliary Security Header	Superframe Specification	GTS fields	Pending address fields	Beacon Payload	FCS
MHR				MAC Payload				MFR

Fonte: (IEEE, 2011)

- Apesar destes mecanismos permitirem certa flexibilidade, eles não permitem liberdade total na configuração dos tamanhos do superquadro e seus compartimentos.

A Figura 8 mostra a estrutura do quadro de *beacon*. O conjunto de campos denominado *MAC Payload* contém a especificação do superquadro (BO e SO entre outros), campos do GTS, listagem de nodos em processo de associação à PAN (*Pending Address Fields*) e o campo *Beacon Payload*. O *MAC payload* é precedido pelo *MAC header* (MHR) e sucedido pelo *MAC Footer* (MFR). O MHR contém o campo de controle do quadro MAC, o número de sequência do *beacon* (BSN), campos de endereço e, opcionalmente, um cabeçalho de segurança auxiliar. O MFR contém um FCS (do inglês *Frame Check Sequence*) de 16 bits.

Um detalhe relevante para o presente trabalho é o mecanismo de retransmissão de mensagens tipo ARQ adotado pelo padrão. Se uma tentativa de transmissão direta falhar e o campo denominado *Acknowledgment Request* (localizado no cabeçalho da mensagem) estiver com valor 1, o dispositivo vai repetir a transmissão dos dados e aguardar por um ACK, até o máximo de `macMaxFrameRetries` ten-

tativas. O `macMaxFrameRetries` varia entre 0 a 7 e seu valor padrão é 3. As tentativas de retransmissão somente podem ocorrer se puderem ser completadas dentro da mesma porção do superquadro, i.e. o CAP ou GTS, onde a transmissão original ocorreu. Se um ACK não é recebido após `macMaxFrameRetries` tentativas de transmissão, a subcamada MAC deve assumir que a mesma falhou e deverá notificar a camada imediatamente superior sobre esta falha.

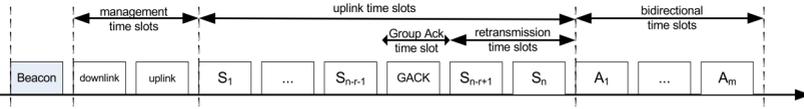
2.3.3 O adendo IEEE 802.15.4e

O IEEE 802.15.4e (IEEE, 2012) é um adendo ao padrão IEEE 802.15.4 destinado a atender, entre outras, à demanda industrial. É uma emenda que estende as topologias de rede, acrescentando a topologia estrela de baixa latência, com uma estrutura de superquadro que suporta comunicação com baixa latência entre o coordenador PAN e seus dispositivos sensores/atuadores. Um quadro MAC curto, com 1 octeto de cabeçalho MAC, é utilizado para acelerar o processamento do quadro e reduzir o tempo de transmissão.

O acesso ao meio se dá pela técnica TDMA, através de um superquadro de tamanho fixo. O superquadro é sincronizado com o *beacon* transmitido periodicamente pelo coordenador PAN e é dividido em compartimentos. Para acesso determinístico, cada dispositivo recebe um compartimento único de tamanho fixo. Podem ser configurados compartimentos para grupos, que permite acesso para um grupo de nodos, com a duração de um número arbitrário de compartimentos dedicados, até, no máximo, o superquadro inteiro. Dentro do grupo existe o denominado dono de grupo, que transmite seus dados diretamente. Se um nodo, membro do grupo mas não o dono, quiser transmitir ele disputará o compartimento usando o protocolo CSMA-CA ou ALOHA, dependendo do que estiver pré-configurado.

Demonstrando uma estreita relação com a automação industrial, o superquadro TDMA é dividido em três partes (Figura 9): compartimentos para gerenciamento do superquadro, compartimentos para sensores (*uplink time slots*) e compartimentos para atuadores (*bidirectional time slots*). Sendo que, na parte dedicada aos sensores, podem haver alguns compartimentos dedicados à retransmissão de quadros. A retransmissão pode ser solicitada por meio do mecanismo de *Group ACK* (G_{ACK}), que é um quadro especial enviado pelo coordenador PAN em um compartimento dedicado, contendo um bit para cada nodo sensor. Estes bits informarão se o quadro de cada sensor, respectivamente, foi

Figura 9: Um exemplo da estrutura do superquadro do IEEE 802.15.4e.



Fonte: (IEEE, 2012)

ou não corretamente recebido. No caso de uma confirmação negativa, os respectivos nodos sensores retransmitirão seus quadros nos compartimentos dedicados à retransmissão.

Além disto, esta proposta de padrão prevê vários outros mecanismos que apresentam benefícios diretos no contexto industrial, cabendo destaque:

ECFP – O *Extended CFP* propõe a criação de mais compartimentos dedicados dentro de um superquadro. Isto vem ao encontro com a possibilidade de ter mais de 7 compartimentos sem contenção (tipo TDMA) – GTS. Na proposta, o número de compartimentos dedicados é duplicado.

Multi-superframe – Esta é uma estrutura opcional que pode ser montada pelo coordenador PAN. Além dos parâmetros BO e SO, é criado um terceiro, denominado *Multi-superframe Duration* (MD). Com isto, é criada uma estrutura que pode conter vários superquadros ordinários entre dois *beacons*, sendo que cada um destes pode ter uma formação diferenciada, ou seja, pode ter tempos de CAP e CFP diversos. Isto pode ser útil para criar alternativas para mensagens periódicas com tempos distintos entre si.

CAP reduction – Também opcional, este mecanismo, em conjunto com o *multi-superframe*, permite a eliminação completa do período CAP em cada um dos superquadros de um *multi-superframe*, a exceção do primeiro período CAP, que jamais poderá ser eliminado.

Channel hopping – A exemplo do WirelessHART e ISA 100.11a, a proposta de padrão IEEE 802.15.4e permite que os nodos utilizem o mecanismo opcional de salto de canais. Neste caso, cada DSME-GTS (do inglês *Distributed Synchronous Multichannel Extension*) salta por canais de frequência previamente definidos. A série de

canais utilizadas em cada DSME-GTS é referida como a sequência de saltos. A mesma sequência de saltos deverá ser repetida sobre todo o conjunto de DSME-GTS. Isto melhora a diversidade em frequência.

A seleção de canais e compartimentos para a comunicação é planejada em uma instância de gestão da rede. O coordenador PAN determina o “mapa da rede”, quem são os sensores e atuadores etc., baseado nestas informações.

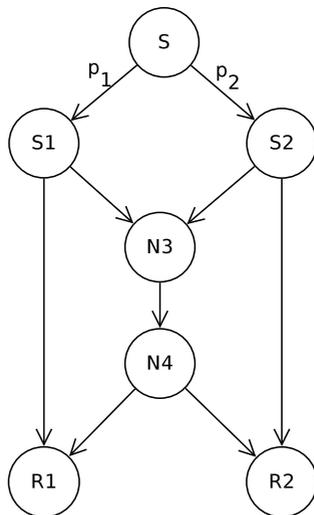
2.4 CODIFICAÇÃO DE REDE

Atualmente o método mais comum de envio de informação de um ponto a outro em uma rede é através de técnicas de roteamento, que, em suma, baseiam-se na escolha de um caminho da fonte até o destino para cada pacote. Existem várias técnicas para calcular o melhor caminho de uma fonte até o destino que são baseadas em algoritmos de roteamento, por exemplo o algoritmo vetor de distâncias e o algoritmo estado de enlace.

As limitações da taxa de transmissão são impostas pelas taxas máximas de transmissão dos enlaces. Entretanto, quase sempre alguns enlaces compartilham vários fluxos de diferentes fontes para diferentes destinos fazendo com que não seja possível atingir a capacidade de transmissão fim-a-fim. A capacidade de transmissão fim-a-fim pode ser calculada na forma de grafos através do teorema de Fluxo Máximo/Corte Mínimo de Ford-Fulkerson (WEST, 2000). O método atual de roteamento não atinge a capacidade de transmissão em vários tipos de topologias. Como exemplo, na Figura 10 é apresentada uma topologia conhecida como rede borboleta, onde a fonte **S** necessita enviar os mesmos dois pacotes (p_1 e p_2) para **R1** e **R2**. Segundo o já citado teorema, a capacidade de transmissão *multicast* da fonte **S** para os destinos **R1** e **R2** é de 2 pacotes por unidade de tempo, onde cada unidade representa o tempo de entrega de um pacote a qualquer destino por qualquer rota. Com roteamento, é possível entregar apenas 1 pacote para um destino e dois para outro em cada unidade de tempo, ou seja, a taxa é de 1,5 pacotes por unidade de tempo.

O fato de algumas técnicas de roteamento aumentarem as taxas de transmissões através da descoberta de novas rotas, que passam por enlaces de menor uso, não aumenta a sua capacidade de transmissão mediante determinada topologia. Para o pior caso, utilizando roteamento, numa rede onde todos os enlaces estejam saturados, não

Figura 10: Rede borboleta.



Fonte: própria

há solução para melhorar o tráfego sem o aumento da capacidade dos enlaces. Uma maneira para alcançar as capacidades teóricas é utilizar alguma técnica de codificação de rede.

A área de codificação de rede propõe que em muitas situações é possível aumentar a taxa de transmissão fim-a-fim sem aumentar a taxa de transmissão ponto-a-ponto em uma rede. O princípio básico é realizar combinações entre pacotes de tal modo que o destino consiga decodificá-los. Com a transmissão de um pacote combinado, que contém vários outros, se observa que haverá menos pacotes trafegando no mesmo período de tempo, porém com a mesma quantidade de informação, o que provoca um aumento na taxa de transmissão.

No artigo Ahlswede, Li e Yeung (2000) foi introduzido pela primeira vez o conceito de codificação de rede (NC, do inglês *Network Coding*). Uma observação simples, mas muito importante, é que os nós da rede podem, além de repassar mensagens, processar fluxos entrantes independentes. Por exemplo, na camada de rede, nós intermediários podem fazer adições binárias em fluxos de bits independentes, bem como, na camada física de redes ópticas, nós intermediários podem sobrepor sinais ópticos entrantes. Posto de outro modo: fluxo de dados que são independentemente produzidos e consumidos não necessaria-

mente devem ser mantidos separados em seu transporte através da rede, existem meios de combinar, transmitir a combinação e, posteriormente, extrair as informações originais.

Esta mudança de paradigma pretende revolucionar a maneira como se administra, opera e entende-se a organização das redes, bem como trazer um profundo impacto em várias áreas como: entrega confiável, compartilhamento de recursos, controle eficiente de fluxos, monitoramento de redes e segurança (FRAGOULI et al., 2007).

Este novo paradigma surgiu na virada do milênio e imediatamente atraiu interesse das comunidades de pesquisa nas áreas da Engenharia Elétrica e Ciência da Computação.

O processamento computacional está cada vez mais barato, seguindo a lei de Moore e, conseqüentemente, o gargalo passa a ser a taxa de transferência nas redes de comunicação para dar suporte a vazão a todos os dados gerados ou requisitados. A codificação de rede utiliza o poder computacional para aumentar a taxa de transferência nas redes. É importante lembrar que este não é exatamente o caso para nodos de RSSF, neste caso é necessário um extremo cuidado na aplicação da codificação de rede, dado o baixo poder computacional dos nodos.

A codificação de rede em corpos finitos (explicação na Seção 2.4.3) possibilita a codificação de diversas mensagens numa única. A diversidade cooperativa permite o uso de nodos vizinhos na rede no sentido de colaborar entre si para aumentar a tolerância a perda de mensagens e aumentar a taxa de transferência efetiva da rede como um todo. Na seqüência, esses conceitos são explicados.

2.4.1 Cooperação

Numa comunicação sem fio cooperativa, os agentes comunicantes podem incrementar sua qualidade de serviço efetiva (medida na camada física como taxa de erro de bits, taxa de erro de blocos, ou probabilidade de falha no enlace) por meio da cooperação mútua. Em um sistema de comunicação cooperativo, cada usuário pode transmitir seus próprios dados bem como atuar como um agente de cooperação para outro usuário (NOSRATINIA; HUNTER; HEDAYAT, 2004).

Cooperação leva a compensações interessantes entre taxas de código e energia de transmissão. No caso da energia consumida, por um lado pode-se argumentar que mais energia é necessária já que cada usuário, quando em modo cooperativo, está transmitindo em benefício próprio e também de outros usuários. Por outro lado, a base da energia

de transmissão para ambos os usuários será reduzida devido às diversidades obtidas. Diante deste *trade-off*, a expectativa é de uma redução no consumo energético total da rede.

Questões similares surgem para a taxa de transmissão efetiva no sistema. Na comunicação cooperativa cada usuário transmite seus próprios *bits*, bem como algumas informações para seus parceiros; pode-se pensar que isto causa diminuição na taxa do sistema, no entanto, a eficiência espectral de cada usuário aumenta devido ao aumento da diversidade de cooperação (NOSRATINIA; HUNTER; HEDAYAT, 2004).

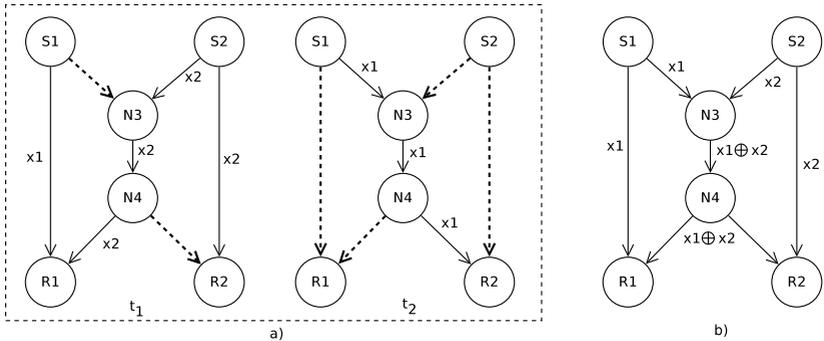
A cooperação que se tem demonstrado mais eficaz é a do tipo “decodifica e reencaminha” (do inglês *decode-and-forward*), onde cada agente intermediário deve primeiramente decodificar a mensagem e se esta for perfeitamente interpretada, a mesma poderá ser reencaminhada; caso contrário, será descartada.

Habilitando um conjunto de dispositivos parceiros para reencaminhar as informações recebidas, explora-se a diversidade espacial obtida pelas antenas distribuídas pertencentes aos múltiplos dispositivos na rede, e, conseqüentemente, pode-se estender a abrangência dos sistemas de comunicações sem fio. Uma dessas aplicações é um sistema de comunicação sem fio cooperativo, onde vários nodos que tenham intenção de transmitir informações para um nodo destinatário, além de transmitir suas próprias mensagens, cooperam entre si, no sentido de encaminharem as mensagens que ouvirem de seus vizinhos, aumentando assim a probabilidade de sucesso na entrega de mensagens.

2.4.2 Alguns casos de uso de NC

O objetivo principal da codificação de rede é o aumento da taxa de transferência no núcleo da rede. Em Ahlswede, Li e Yeung (2000) foi apresentado a rede borboleta, que é um exemplo básico do ganho na taxa de transferência que pode ser obtido na utilização da NC. A Figura 11 representa uma rede de comunicação na forma de um grafo direcionado, onde os vértices representam os nodos da rede e os arcos os canais. A rede borboleta é composta de duas fontes – S1 e S2 – e dois receptores – R1 e R2 – de mensagens. Cada fonte pode enviar somente 1 bit por período de tempo. Na Figura 11a) apresenta-se o comportamento tradicional da rede, onde os dois bits – x_1 e x_2 – levam dois períodos de tempo para chegarem aos seus destinos devido ao uso compartilhado do canal N3-N4. Neste caso consegue-se uma taxa de 1

Figura 11: Rede Borboleta. a) as duas etapas do roteamento, b) única etapa da codificação de rede.



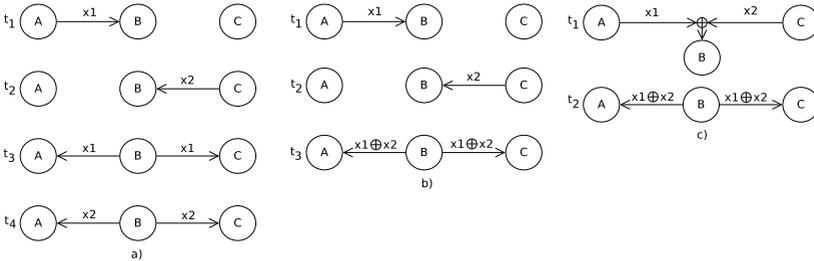
Fonte: própria

bit por período de tempo. Já na Figura 11b) observa-se que os dois bits – x_1 e x_2 – são enviados simultaneamente ao nó N3 e este faz uma simples operação XOR (adição no campo binário, denotada por \oplus) com os mesmos e os reencaminha ao nó 4, e este repassa aos nós receptores – R1 e R2. Estes, de posse dos bits vindos diretamente das fontes (x_1 para R1 e x_2 para R2) e da combinação dos mesmos ($x_1 \oplus x_2$), conseguem decodificar ambos os bits aplicando o XOR sobre os dados recebidos. Neste caso consegue-se uma taxa de 2 bits por período de tempo.

Este é um caso típico de emprego em redes cabeadas na camada de rede, onde os roteadores, além de suas funções tradicionais de decisão de porta de saída e encaminhamento, fazem operações de adição binária nas mensagens entrantes, ganhando desempenho na rede. Deve-se atentar para o fato que a operação de adição binária pode ser feita com mensagens de tamanhos diferentes, desde que se acrescente zeros à mensagem de menor tamanho e depois da decodificação extraia-se os mesmos.

Outro exemplo de uso da NC se dá em redes sem fio (FRAGOULI et al., 2007), onde o meio é eminentemente *broadcast*. A NC pode ser usada para oferecer benefícios em termos de tempo de vida das baterias, banda passante e menores atrasos. Considere uma rede sem fio *ad-hoc*, onde os dispositivos A e C querem trocar dados binários x_1 e x_2 usando o dispositivo B como retransmissor. Assume-se que o tempo é compartimentado, e que um dispositivo somente pode trans-

Figura 12: Rede *ad-hoc*. a) roteamento, b) codificação de rede e c) codificação de rede na camada física.



Fonte: própria

mitir ou receber uma mensagem durante um compartimento de tempo. A Figura 12a) mostra as trocas de mensagens na abordagem tradicional, ou seja, roteamento. Pode-se observar que são necessários quatro compartimentos de tempo para realizar toda a operação.

Na Figura 12b) tem-se a representação das trocas de mensagens fazendo uso da técnica de codificação de rede, onde o dispositivo *B* faz a operação XOR (codifica) entre as duas mensagens entrantes e, em seguida, transmite a mensagem codificada. Os dispositivos receptores, de posse de sua informação original, tem condições de decodificar as mensagens e, portanto, obter a mensagem desejada. A decodificação é feita novamente aplicando a operação XOR entre a própria mensagem e a mensagem recebida. Três compartimentos de tempo são necessários para completar a operação.

Na Figura 12c) é apresentado a codificação de rede na camada física. Técnica que explora a natural superposição de ondas eletromagnéticas que ocorre nas comunicações sem fio e aplica os princípios da codificação de rede. Dessa forma, as fontes transmitem suas mensagens simultaneamente ao nó intermediário, que recebe os sinais sobrepostos. Em seguida, o nó intermediário extrai do sinal recebido uma combinação linear, sem a necessidade de obter as mensagens individualmente, de forma explícita, e procede de forma semelhante à técnica de codificação de rede (ZHANG; LIEW; LAM, 2006). Todo o processo requer somente dois compartimentos de tempo.

Nota-se que para estes tipos simples de codificação de rede é necessário que todos os nós tenham conhecimento da topologia da rede. Assim sabe-se quando será possível realizar combinações e como

será realizada a decodificação. Muitos aperfeiçoamentos e possíveis aplicações foram surgindo na área de codificação de rede, algumas delas são apresentadas na próxima seção.

2.4.3 Conceituação: corpo e combinação linear

Um conceito importante sobre codificação de rede é que cada pacote transmitido por um nodo intermediário deve ser função dos pacotes que foram recebidos neste nodo. Esta função pode ser representada por combinações lineares dos pacotes de entrada. Em Li, Yeung e Cai (2003) é demonstrado que ao se utilizar codificação de rede linear, ou seja, combinação de pacotes de forma linear, não haverá prejuízos teóricos e os processos de codificação e decodificação se tornam mais fáceis.

Essas combinações lineares devem ser realizadas dentro de um corpo finito F_{2^n} onde n pode ser qualquer inteiro positivo. Resumidamente, um corpo finito é um conjunto com um número finito de elementos, o qual é fechado em duas operações, comumente \oplus (soma em corpos finitos) e \cdot (multiplicação em corpos finitos). Isso significa que realizar qualquer destas duas operações entre dois elementos do corpo finito resultará em um elemento também pertencente ao corpo. Os bits dos pacotes são agrupados de n em n para serem representados dentro de \mathbb{F}_{2^n} .

No exemplo da rede borboleta, apresentado na Figura 11, trabalha-se com codificação de rede sobre \mathbb{F}_{2^1} . Assim, as combinações lineares de saída (p_{saida}) em cada nodo podem ser definidas como:

- $p_{saida} = 1 \cdot p_{entrada}$, para ambas saídas dos nodos S1, S2 e N4;
- $p_{saida} = 1 \cdot p_{entrada_1} \oplus 1 \cdot p_{entrada_2}$, para o nodo N3.

Observa-se que todos os coeficientes de codificação são unitários. Isso limita o número de combinações lineares possíveis. Entretanto para \mathbb{F}_{2^1} , o outro coeficiente seria 0 e isso anularia a informação transmitida. Para aumentar o número de combinações lineares possíveis é necessário então aumentar o tamanho do corpo finito.

Os destinos R1 e R2 precisam saber o valor de todos os coeficientes de codificação referentes aos pacotes codificados que estão chegando, caso contrário não é possível a decodificação. Uma solução para esse problema é encaminhar em cada pacote codificado os coeficientes e os pacotes originais combinados. Contudo ainda há um problema: a correta escolha dos coeficientes. Se todos os nodos utilizarem sistematicamente os mesmos coeficientes os destinos podem não conseguir

decodificar os pacotes de origem, dado a alta probabilidade de pacotes redundantes que gerariam sistemas linearmente dependentes. Por exemplo, tem-se em uma rede qualquer uma fonte que enviou 3 pacotes (p_1, p_2 e p_3) a um destino com apenas um enlace de chegada. Essa rede utiliza coeficientes de codificação fixos. Suponha que o destino recebeu $(1 \cdot p_1) \oplus (2 \cdot p_2) \oplus (3 \cdot p_3)$. Não há como decodificar sem receber no mínimo mais 2 pacotes linearmente independentes do primeiro. Ou seja, se os próximos pacotes que o destino receber também forem $(1 \cdot p_1) \oplus (2 \cdot p_2) \oplus (3 \cdot p_3)$, devido aos coeficientes fixos, não há como extrair a informação original.

Uma possível solução para esse novo problema é dada pela codificação de rede linear randômica (RLNC, do inglês Random Linear Network Coding), apresentada em Ho et al. (2006). Com a RLNC, os coeficientes de codificação são gerados aleatoriamente dentro de \mathbb{F}_{2^n} em cada nodo. Quanto maior for o corpo finito menor é a probabilidade de pacotes linearmente dependentes nos destinos.

Por definição, todos os pacotes (\mathbf{x}) que trafegam pela rede são vetores de tamanho m sobre um corpo finito \mathbb{F}_{2^n} ($\mathbf{x}_i = [\mathbf{x}_{i1} \dots \mathbf{x}_{im}]$, $\mathbf{x}_{ij} \in \mathbb{F}_{2^n}$). Cada nodo fonte produz k pacotes originais, definidos como $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_k$. Os nodos que fazem a codificação, constroem novos pacotes executando combinações lineares (sobre \mathbb{F}_{2^n}) (codificação) dos pacotes recebidos: $\mathbf{x}_{cod} = c_1 \cdot \mathbf{x}_1 \oplus \dots \oplus c_n \cdot \mathbf{x}_n$, com $c_1, \dots, c_n \in \mathbb{F}_{2^n}$, onde $[c_1 \dots c_n]$ são chamados **vetor de codificação local**. O conjunto de todos os vetores de codificação local é definido como código de rede na descrição local.

No destino t (no caso da topologia estrela, o coordenador, no caso da rede borboleta R1 e R2), os pacotes recebidos são:

$$X^{(t)} = G^{(t)} X \quad (2.3)$$

onde X é a matriz cujas linhas são os k pacotes originais da fonte, ou

seja, $\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_k \end{bmatrix}$ e $X^{(t)}$ é a matriz cujas linhas são os k pacotes recebidos pelo

nó destino t , ou seja, $X^{(t)} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1^{(t)} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_k^{(t)} \end{bmatrix}$.

O destino recupera os pacotes originais X resolvendo o sistema linear. A total resolução é factível se e somente se $rank G^{(t)} = k$ ($rank$ é igual ao posto da matriz). Neste caso, diz-se que o código de rede

é viável. A questão é: “para quais problemas a codificação linear é suficiente?”:

Teorema 2.4.1 ((LI; YEUNG; CAI, 2003)) *Sejam: k = o número de pacotes transmitidos pela fonte, C_p = a capacidade de multidifusão (multicasting) da rede e q = o tamanho do corpo finito, para cada rede existe um código linear viável para multidifusão se e somente se: $k \leq C_p$ e q suficientemente grande.*

Complementando, para cada rede, se existir um código de rede linear sobre \mathbb{F}_{2^n} que seja viável para multidifusão, então um código randômico será viável com uma “boa” probabilidade, mais detalhes podem ser obtidos em (HO et al., 2006).

Na prática, ao assumir-se que um conjunto de pacotes, $\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_k$, deva ser codificado, deve-se adotar os seguintes procedimentos para a resolução desta tarefa:

1. Determinar o tamanho do corpo finito – \mathbb{F}_q – que atenda as demandas da aplicação. Por exemplo, \mathbb{F}_2 , \mathbb{F}_{2^4} ou \mathbb{F}_{2^8} . Sabendo-se que, quanto maior o tamanho do corpo finito maior a probabilidade de obtenção de um sistema linearmente independente. Por outro lado, quanto maior o tamanho do corpo finito, maior o *overhead* na transmissão de mensagens codificadas, já que, os coeficientes devem ser conhecidos pelo receptor e a implementação mais usual é a transmissão dos coeficientes juntamente com a mensagem. Resultados de simulações indicam que mesmo para pequenos tamanhos de corpo (por exemplo \mathbb{F}_{2^8}) em redes “tradicionais”, a probabilidade da obtenção de sistemas linearmente dependentes é desprezível (FRAGOULI; Le Boudec; WIDMER, 2006).
2. Associar um coeficiente randômico, c_i ($c_i \in \mathbb{F}_q$), para cada pacote \mathbf{x}_i .
3. Os pacotes a serem codificados devem ter o mesmo tamanho, portanto se faz necessário a inserção de zeros nos pacotes menores.
4. Cada pacote deve ser multiplicado (\cdot) pelo coeficiente randômico escolhido do corpo finito definido.
5. Somar (\oplus) os resultados obtidos, também no corpo finito, para obter o pacote a ser encaminhado ($\mathbf{x}_{cod} = \sum_{i=1}^k c_i \cdot \mathbf{x}_i$). Este pacote codificado contém todo o conjunto de pacotes originais.

6. Por fim, é necessário adicionar todos os coeficientes utilizados na formação do pacote a ser enviado:

$$\mathbf{m}_i = c_1 \dots c_k \mathbf{x}_{cod} \quad (2.4)$$

No lado do receptor, de posse de todas as mensagens recebidas, codificadas ou não, é possível construir e resolver um sistema linear, obtendo o conjunto dos pacotes originais (X), usando a Equação 2.3.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O padrão IEEE 802.15.4 especifica uma arquitetura de comunicação sem fios para aplicações que requerem baixo consumo de energia, reduzido custo e que permitam baixas taxas de transmissão. Seus domínios de aplicação se estendem por várias áreas, incluindo agricultura de precisão, monitoramento ambiental, monitoramento e controle de processos e automação industrial.

Em razão do seu crescente uso como um padrão de fato, vários outros padrões o utilizam como camada física e/ou subcamada MAC, dentre os quais WirelessHART e ISA100.11a. Esta adesão tem reforçado o interesse pelo IEEE 802.15.4 para executar aplicações de NCS, PdM e automação, em especial para aplicações industriais, demandando protocolos específicos com suporte a tempo real e confiabilidade.

Uma possível solução ao problema da confiabilidade é a codificação de rede, que em protocolos colaborativos tem se demonstrado viável para melhorar alguns aspectos na comunicação em rede, seja na taxa de transferência, seja na diminuição da latência, explorando principalmente as características de diversidade espacial e temporal dos nodos. No entanto, a técnica de codificação de rede assume, por princípio, que nodos possuem uma capacidade computacional suficiente para executar operações de codificação e decodificação de mensagens. Essa premissa pode não ser verdadeira em RSSF, e são necessárias investigações para avaliar soluções que contrabalanceiem operações com processamento local e os benefícios obtidos no sistema como um todo.

A especificação do IEEE 802.15.4 cita a possibilidade de três diferentes topologias mas as topologias em malha ou híbrida dependem fortemente de mecanismos definidos fora desta especificação, como por exemplo protocolos de roteamento, já que dependem das camadas superiores da rede e, principalmente, por estas topologias apresentarem

maior latência. Esta tese adotou a topologia estrela com emprego da codificação de rede oportunista para aumentar sua tolerância a perda de mensagens. Contudo, no sentido de expandir o cenário de utilização, e para atender as demandas industriais, esta topologia pode ser estendida para agrupamento em árvore, onde várias estrelas são conectadas entre si, formando uma estrutura de comunicação hierárquica.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo trata sobre os principais trabalhos relacionados a esta tese de doutorado. O foco do trabalho é a proposta de mecanismos para retransmissão de mensagens em redes IEEE 802.15.4 aplicadas a ambientes industriais. Estes ambientes apresentam características bem específicas. Cabe destaque ao ruído eletromagnético presente neste tipo de ambiente, que afeta diretamente o meio de transmissão e a confiabilidade, além da existência de restrições temporais. Estas características levam à necessidade de mecanismos que garantam a confiabilidade e baixa latência na transmissão de dados, mesmo na presença de ruídos. Neste sentido, a codificação de rede apresenta-se como uma nova técnica a ser explorada, objetivando melhorias nos mecanismos de retransmissão de mensagens, minimizando o uso do meio, os atrasos totais e garantindo altas taxas de sucesso.

A abordagem dos trabalhos expostos a seguir se dá em várias frentes. Propostas de modificação do padrão IEEE 802.15.4 têm por objetivo adequá-lo às características e necessidades do ambiente industrial e/ou aprimorar algum comportamento desejado. As propostas de mecanismos de retransmissão de mensagens recaem sempre sobre a técnica do tipo ARQ, com algumas pequenas variações. Já a codificação de rede tem um emprego ainda bastante limitado, devido principalmente à atualidade do tema. As buscas em torno do tema retratam trabalhos ainda incipientes, com questões pendentes, mas com resultados promissores.

A seguir serão detalhados os trabalhos divididos em dois grupos:

i) Redes Sem Fio aplicadas às indústrias que relaciona propostas de alterações no padrão IEEE 802.15.4 e técnicas de retransmissão de mensagens e *ii) Implementações da técnica de codificação de rede* com trabalhos relacionados ao uso da cooperação e codificação de rede. Em ambos os grupos, primeiramente é apresentada uma descrição dos artigos relevantes e, ao final de cada seção, é uma tabela resumo dos artigos, onde são apresentados os tópicos relevantes de cada um deles.

3.1 REDES SEM FIO EM APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Segundo Anastasi, Conti e Di Francesco (2011) quatro propriedades devem ser atendidas no emprego de RSSF em ambientes industriais: eficiência energética, escalabilidade, confiabilidade e correção temporal.

A escalabilidade é controversa no ambiente industrial, onde a implantação de nodos se dá de maneira organizada e planejada, não possuindo necessariamente requisitos dinâmicos, mas sim de projeto. Quando há requisitos dinâmicos, geralmente assume-se a existência de alguns nodos móveis de posse dos operadores humanos ou em veículos guiados automaticamente (AGV, do inglês *Automated Guided Vehicle*).

No cenário industrial, a confiabilidade e a previsibilidade podem ser profundamente afetadas pela qualidade de enlace que sofre com desvanecimento por múltiplos percursos e interferências externas produzidas por outros dispositivos e máquinas operando na mesma frequência base. A latência máxima admitida possui valores médios dependentes da aplicação: dezenas de milissegundos para manufatura discreta, segundos para controle de processos, e minutos para monitoramento de ativos (ANASTASI; CONTI; Di Francesco, 2011).

No sentido de minimizar os problemas decorrentes do ruído industrial sobre os enlaces sem fio, duas técnicas fundamentais costumam ser aplicadas: *i*) o uso de mecanismos do tipo FEC, indicado somente para correção de erros de poucos *bits*, onde é previsto que um pacote contenha alguns *bits* adicionais que serão utilizados pelo receptor para correção de erros, e *ii*) retransmissão de pacotes para os casos onde o FEC não foi suficiente para recuperar a informação contida no pacote, ou onde o pacote se perdeu por completo. Salienta-se que estas duas técnicas podem trabalhar em conjunto para prover uma maior confiabilidade na transmissão dos dados.

O padrão IEEE 802.15.4 foi originalmente desenvolvido para redes de baixo consumo energético e é largamente empregada em RSSF, mas não possui mecanismos que tratem completamente os problemas presentes nas aplicações industriais.

A seguir descreve-se brevemente cada um destes trabalhos, dando enfoque a conceitos diretamente relacionadas a esta tese.

3.1.1 Industrial wireless networks: the significance of timeliness in communication systems

O trabalho Vitturi, Tramarin e Seno (2013) descreve a importância do respeito aos prazos de entrega de mensagens (correção temporal) em sistemas de comunicação de redes sem fio industriais e apresenta as atuais técnicas e produtos/normas que visam atender esta característica. Apesar de apresentar uma visão geral do assunto, o mesmo é detalhado em função da atualidade e da estreita relação com

esta tese. Segundo os autores, a eliminação da necessidade do cabeamento estruturado, com a possibilidade de acesso a locais (máquinas e equipamentos) que não podiam ser atendidos por sistemas cabeados, projetam um uso cada vez mais intensivo das redes sem fio na indústria, seja em configurações em sistemas autônomos, seja em sistema híbridos (com e sem fio). Estas redes, no entanto, têm de lidar com as severas exigências da comunicação industrial. Em particular, elas têm que fornecer correção temporal adequada.

Como é bem conhecido, a correção temporal é influenciada negativamente tanto pela ocorrência de erros de transmissão como as subsequentes tentativas de retransmissão, possivelmente intercalados por atrasos aleatórios de *backoff*. Assim, para alcançar uma boa correção temporal, a primeira medida a tomar é tentar garantir elevadas probabilidades de sucesso de transmissão na primeira tentativa. Nesse sentido, escalonar o acesso ao canal e priorizar quadros representam oportunidades úteis e comumente disponíveis, já que, basicamente limitam conflitos de acesso ao canal e colisões com os consequentes benefícios na probabilidade de taxa de sucesso da transmissão.

Além disso, as técnicas de diversidade de frequência e diversidade espacial foram discutidas pelos autores do trabalho, elencando suas características: enquanto a diversidade de frequência fornece imunidade à interferência dentro da banda, a diversidade espacial aumenta a probabilidade de sucesso na transmissão do pacote, através da utilização de sistemas MIMO ou redes cooperativas.

Uma outra técnica discutida neste trabalho, denominada adaptação de taxa permite alcançar baixas taxas de PER. Infelizmente, a adaptação de taxa pode impactar negativamente na correção temporal, já que o algoritmo tipicamente adotado por esta técnica (taxa de retorno automático) pode exigir um número relevante de tentativas de transmissão para, posteriormente, entregar corretamente o pacote. Consequentemente, o trabalho apresenta dois algoritmos alternativos, voltados especificamente para aplicações industriais, na medida em que asseguram que o número de retransmissões é mantido muito baixo.

Ademais, a correção temporal pode ser aumentada através da adoção de estratégias de retransmissão melhoradas, que dinamicamente adaptam as sequências de varredura em configurações mestre-escravo, dependendo das estatísticas de probabilidades de sucesso de transmissão de cada dispositivo sondado.

Entre os sistemas de comunicação industriais disponíveis no mercado, o artigo discutiu WirelessHART, ISA 100.11a e WISA, que implementam, mesmo que de formas diferentes, a maioria das técnicas

de aprimoramento de correção temporal mencionados. Em detalhe, a única exceção é constituída pela adaptação de taxa, uma vez que, para estas redes, não há nenhuma maneira de alterar a taxa de transmissão.

Por outro lado, os sistemas baseados no padrão IEEE 802.11, embora não especificamente concebidos para aplicações industriais, nativamente oferecem um conjunto considerável de características para atingir correção temporal, que vão desde a métodos de escalonamento ao acesso a canais à adaptação de taxa automática. Além disso, outras melhorias estão previstas no futuro, decorrentes da introdução de sistemas IEEE 802.11n. Segundo os autores Vitturi, Tramarin e Seno (2013), com a adoção de todas as características das MIMO, essas redes serão capazes de fornecer uma melhoria na correção temporal, uma vez que deve aumentar significativamente a probabilidade de sucesso da primeira tentativa de transmissão. Deve-se considerar, entretanto, que a aplicação prática de algumas das técnicas de aprimoramento de correção temporal propostas requer acesso direto as pilhas de protocolos dos dispositivos utilizados, para reprogramar algumas de suas primitivas das camadas mais baixas. Infelizmente, essa opção normalmente não é fornecida pelos fabricantes de dispositivos IEEE 802.11.

Como última observação dos autores, em alguns casos, uma técnica pode complementar e/ou anular outras. Por exemplo, com a adoção de um algoritmo de adaptação de taxa efetiva que garante a entrega de um pacote com no máximo uma tentativa de retransmissão o emprego de melhores estratégias de retransmissão e/ou diversidade espacial podem não ser mais necessário, neste caso.

3.1.2 Towards reliable wireless industrial communication with real-time guarantees

O artigo Jonsson e Kunert (2009) propõe um *framework* que contém um esquema de retransmissão e análise temporal para dar suporte a comunicações em tempo real. O *framework* permite retransmissões de mensagens enquanto o seu *deadline* não for atingido, além disso, o pacote somente será retransmitido se não prejudicar garantias já estabelecidas para fluxos de dados originais.

A solução proposta é direcionada para atrasos fim a fim e portanto está localizada na camada de transporte no modelo de referência ISO/OSI (International Organization for Standardization/Open Systems Interconnection). O modelo de retransmissão proposto é denominado ARQ truncado, o qual limita o possível número de retransmissões.

Mesmo usando o esquema de retransmissão, a taxa de erros de mensagens (MER, do inglês *Message Error Rate*) nunca será zero, entretanto, o esquema reduz substancialmente a MER, o que tem particular importância em comunicações sem fio com sua inerente alta taxa de erro de bits, especialmente quando se trata de tráfego de tempo real.

O tráfego na rede é especificado na forma de fluxos de tráfego, também chamados de canais lógicos de tempo real. Um fluxo de tráfego pode conter vários pacotes de dados, com a mesma origem e mesmo destino na forma sequencial. Para a indústria esta é uma consideração estranha, já que, em geral as mensagens são curtas e periódicas e portanto não podem ser associadas como um fluxo, com uma série de pacotes sequenciais.

O mecanismo ARQ é assumido na camada de transporte, acima da subcamada MAC. Sendo assim, o mecanismo de retransmissão nativo do IEEE 802.11 foi desativado, mantendo-se apenas o mecanismo de CRC.

Para cada fluxo de tráfego, o atraso é dividido em duas partes: na transmissão original e na retransmissão, garantindo a retransmissão de um certo número de pacotes, não necessariamente todos, já que, em geral, o tempo total dedicado à retransmissão é menor que o da transmissão.

Objetivando uma diminuição na MER, canais de retransmissão são adicionados quando necessário e podem ser usados por qualquer canal de tempo real. Cada pacote tem um limite máximo de tentativas consecutivas antes de terminar seu *deadline*. Um número alto de tentativas normalmente aumenta a probabilidade de sucesso na transmissão da mensagem, por outro lado aumenta a demanda sobre a capacidade do enlace, já que, quanto maior o número de tentativas, mais apertados serão os *deadlines* de cada tentativa para dar tempo de cumprir todas as demais demandas de retransmissão.

Os recursos alocados pelo escalonador devem garantir uma certa quantidade de retransmissões por unidade de tempo e a totalidade das transmissões de mensagens originais.

Vários cenários foram analisados mostrando que, com um pequeno decréscimo na taxa de utilização do meio, houve sensíveis melhorias na diminuição da MER, em várias ordens de grandeza.

Como esse trabalho é destinado ao uso no IEEE 802.11 não há aplicabilidade direta nesta tese. O objetivo de sua breve análise foi dar suporte para o entendimento na análise do próximo trabalho, que usa este como base para a escalonabilidade de mensagens.

3.1.3 *Predictable real-time communications with improved reliability for IEEE 802.15.4 based industrial networks*

No trabalho Kunert, Uhlemann e Jonsson (2010) foi introduzido um protocolo mestre/escravo simples, que pode ser utilizado sobre os protocolos do IEEE 802.15.4. Para prover um compromisso adequado entre flexibilidade e eficiência, objetivando transmissões fim a fim com QoS, retransmissões são administradas por um protocolo na camada de transporte. O número de retransmissões permitidas é regulado por uma análise *off-line* de escalonabilidade de tempo real.

Para garantir o atendimento de *deadlines* para tráfegos de tempo real sobre redes IEEE 802.15.4 foi necessário estender a subcamada MAC para que seu acesso seja determinístico. O autor chama a atenção para o fato que um mecanismo baseado em TDMA, similar ao WirelessHART, poderia ter sido escolhido, mas o benefício de um mecanismo de passagem de permissão do tipo mestre/escravo é que este pode ser baseado em condições dinâmicas, permitindo que retransmissões sejam escalonadas mais rapidamente, sem ter de aguardar o próximo compartimento dedicado num ciclo TDMA. Por outro lado, considera-se que isto gera um problema de baixa diversidade temporal, o que pode comprometer a confiabilidade de chegada de um determinado dado.

Como a abordagem foi implementada numa camada acima do IEEE 802.15.4, a divisão do superquadro em CAP e CFP não se faz necessária e todo o período ativo é utilizado para tráfego de tempo real. A funcionalidade da camada MAC foi reduzida, já que todo o escalonamento de acesso ao meio é feito na camada de transporte, que passa os pacotes para a camada abaixo de acordo com a política EDF (do inglês Earliest Deadline First). Isto garante que não ocorram atrasos de *backoff* aleatórios, tornando o acesso ao meio determinístico. Além disto, a geração de ACK e retransmissões são inteiramente comandadas pela camada de transporte, onde erros de pacotes são simplesmente identificadas pela camada MAC e reportadas para a camada de transporte, que tomará as medidas apropriadas.

As funcionalidades chave da camada de transporte englobam os esquemas de análise de tempo real, ARQ e escalonamento EDF para todo o tráfego, incluindo as retransmissões.

Para acomodar retransmissões, o *deadline* das mensagens na camada de transporte foi dividido em duas partes, chamados *deadlines* comuns e de retransmissões. Os ACK são usados somente pelos escravos para reconhecimento de mensagens corretamente recebidas do mestre. As retransmissões de pacotes perdidos destinados ao mestre

são administrados por ele próprio sem a necessidade de mensagens de reconhecimento. Ou seja, se necessário é feita uma nova solicitação. Para garantir as retransmissões, os nodos armazenam as mensagens até o fim do próprio *deadline*.

Existe um controle de admissão no nodo mestre que garante, através de teste de escalonabilidade, que todo tráfego de tempo real aceito terá seu *deadline* atendido. Baseado nos parâmetros dos tráfegos de tempo real (endereço de origem, endereço de destino, período, tamanho da mensagem, *deadline* relativo), o nodo mestre cria filas ordenadas de pacotes. No caso de retransmissão, existe um valor máximo para o número total de tentativas.

Os resultados mostram que houve uma expressiva diminuição da MER, mas com a consequente diminuição da taxa de utilização do meio, já que, parte do mesmo é utilizado nas retransmissões.

3.1.4 A Comprehensive analysis of the MAC unreliability problem in IEEE 802.15.4 wireless sensor networks

Segundo Anastasi, Conti e Di Francesco (2011), o IEEE 802.15.4 pode sofrer sérios problemas de confiabilidade, mas um ajuste mais apropriado dos parâmetros do MAC é possível mitigar vários destes problemas e chegar a uma taxa de entrega próxima a 100%.

Em um dos experimentos desse trabalho mediu-se a taxa de entrega em relação ao número de nodos. No modo sem *beacon*, com os nodos sempre ativos e sem qualquer tipo de sincronização, a taxa de entrega ficou por volta de 90%. Ao habilitar-se o mecanismo de ACK a taxa subiu para aproximadamente 100%. Por outro lado, quando habilitou-se o modo com *beacon*, a taxa caiu rapidamente com o aumento do número de nodos. A explicação para esta ocorrência é que com a rede sincronizada através de envio de *beacons*, os dados gerados durante o período de inatividade tendem a ser transmitidos imediatamente e simultaneamente no início do próximo período de atividade e, conseqüentemente há uma redução na taxa de sucesso. Também verificou-se que a taxa de sucesso se reduz de forma inversamente proporcional ao aumento do PER.

No artigo é apresentada uma série de simulações com modificações independentes nos valores padrão de cada um dos seguintes parâmetros do MAC (com respectivos valores previstos na norma): `macMaxFrameRetries` (0-7), `macMaxCSMABackoffs` (0-5), `macMaxBE` (3-8) e `macMinBE` (0-7) (onde BE é *Backoff window exponent*). Considere

rando a rede com 15 nodos e PER 10%, fez-se análise na taxa de sucesso, com as seguintes conclusões (observar que alguns parâmetros tiveram valores ajustados fora da faixa especificada pela norma):

- A variação do `macMaxFrameRetries` só teve influência com a variação entre de 0 a 2, fora desta faixa nada mudou.
- A variação de `macMaxCSMABackoffs` entre 0 e 10, mostrou um ganho significativo, chegando a valores próximos a 80% quando o valor estava ajustado para 10.
- A variação de `macMaxBE` entre 0 e 10, mostrou um ganho significativo, chegando a valores próximos a 100% quando o parâmetro estava ajustado para 10.
- A variação de `macMinBE` entre 0 e 9, também mostrou um ganho significativo, chegando próximo a 100% para os valores mais altos.

A conclusão final é que, com a parametrização adequada no protocolo de comunicação IEEE 802.15.4, pode-se chegar a uma taxa de entrega de aproximadamente 100%, com a consequente redução da energia média consumida. Contudo, o custo a se pagar é um aumento nas latências das entregas de mensagens.

3.1.5 *Distributed DBP: a (m, k)-firm based distributed approach for QoS provision in IEEE 802.15. 4 networks*

No trabalho Semprebom et al. (2009a) o cenário de aplicação é um típico sistema de controle, com coletas e atuações periódicas do controlador. Assume-se como premissa que alguns controladores admitem perdas esparsas de mensagens enviadas pelos sensores para o controlador sem que haja perda de estabilidade.

É proposto um algoritmo de escalonamento com prioridades que funciona de maneira distribuída e foi denominado *Distributed Distance Based Priority* (DDBP). O mesmo funciona no período CAP do IEEE 802.15.4 onde cada nodo, de forma descentralizada, armazena o histórico das suas k mensagens enviadas mais recentes. Assim monta-se uma função distância por falhas, que representa a distância da ocorrência de erros, associando valores numéricos a estas distâncias.

Qualquer dispositivo, após enviar uma mensagem ao coordenador, verifica se a mensagem foi corretamente recebida pela detecção do quadro de ACK, que significa que o *deadline* foi cumprido. Por outro lado, se o dispositivo não transmite sua mensagem durante o atual superquadro, uma perda de *deadline* ocorre e se a mensagem ACK não é recebida após um determinado tempo, a perda de *deadline* também é

sinalizada. Assim a distância para falha do dispositivo é atualizada e a prioridade do dispositivo também. Quanto mais perto da falha estiver o dispositivo, maior será sua prioridade, i.e., o valor do parâmetro `MacMinBE` é ajustado para 5 do `MacMaxCSMABackoffs` para 6, aumentando assim a probabilidade de sucesso na próxima transmissão. Como resultado é mostrado que há uma ligeira redução na perda de deadlines e falhas, quando comparado com o comportamento padrão do IEEE 802.15.4.

3.1.6 Dynamic GTS scheduling of periodic skippable slots in IEEE 802.15.4 wireless sensor networks

No trabalho Semprebom et al. (2009b) é proposto um método de escalonamento dinâmico de mensagens chamado SIGHT (*Skips In GTS Scheduling for IEEE 802.15.4 Networks*). Esta política de alocação de compartimentos garantidos (GTS) oferece garantias mínimas de alocação de GTS segundo restrições (m-k)-firm; ou seja, para cada k mensagens m deadlines serão cumpridos. Para atingir os objetivos, são executados dois algoritmos: um teste de escalonamento, executado quando o coordenador recebe uma requisição de GTS e uma política de atribuição de prioridade dinâmica, baseado no algoritmo DBP, executado no início de cada superquadro. Ambos os algoritmos cooperam para melhorar o mecanismo de alocação do GTS para aplicações de tempo real.

A topologia estrela foi adotada, onde cada nodo que pretenda alocar um ou mais GTS deve enviar ao coordenador sua requisição conforme o padrão IEEE 802.15.4, informando também quais as restrições (m-k)-firm.

Assim é possível a alocação de mais de 7 dispositivos em GTS desde que tenham restrições do tipo (m-k)-firm. Se mais requisições chegarem, após um escalonamento montado, é feita uma análise de escalonabilidade para determinar se estas novas requisições não comprometem as já existentes; caso positivo, as mesmas serão aceitas. Então, as novas requisições irão incrementar a lista de requisições e o algoritmo DBP será utilizado no escalonamento.

Os resultados obtidos apresentam significativas melhorias relacionadas com a diminuição nas falhas dinâmicas (vários nodos requerendo GTS) para diferentes níveis de carga na rede, isto quando comparado com o comportamento padrão do IEEE 802.15.4.

3.1.7 The effects of relay behavior and position in wireless industrial networks

Uma boa abordagem para melhoria da confiabilidade em redes sem fio industriais que transmitem pequenos pacotes é a exploração da diversidade espacial (GIRS; UHLEMANN; BJORKMAN, 2012). Nesse tipo de abordagem, a restrição do canal simples entre fonte e destino é removida e informações são transmitidas sobre canais espaciais múltiplos. Estes canais são estocasticamente independentes e a probabilidade deles sofrerem profundos desvanecimentos ao mesmo tempo é muito pequena. Neste sentido, Girs, Uhlemann e Bjorkman (2012) propõe o emprego da técnica de retransmissão por um nodo intermediário, promovendo assim a diversidade espacial.

O principal objetivo desse trabalho foi avaliar como diferentes tipos de canais de comunicação encontrados em ambientes industriais sem fio afetam a escolha do esquema de retransmissão de mensagens. Foram construídos vários modelos de simulação e diferentes tentativas de cenários de retransmissão para dois tipos de desvanecimento de canal.

No modelo do sistema, o cenário de análise é composto por três nodos: um fonte, um retransmissor e um destino. Sendo que o retransmissor é sempre colocado entre a fonte e o destino a uma distância que varia de acordo com os ensaios realizados. Uma premissa utilizada é que o nodo fonte e o intermediário sempre sabem se o destino recebeu ou não corretamente a mensagem enviada.

São comparados três modelos de retransmissão: *i*) ARQ mas sem uso do nodo intermediário, ou seja, executado pela fonte, *ii*) o nodo intermediário sempre retransmite, sem análise se o pacote está ou não correto, *iii*) o nodo intermediário retransmite somente se receber corretamente o pacote.

A partir dos resultados das simulações pode ser percebido que o benefício da utilização de retransmissão é muito diferente, dependendo do tipo de canal utilizado. Se os erros de bits aparecem em rajadas (modelo predominante na indústria), é melhor permitir que apenas o nodo intermediário proceda as retransmissões, desde que tenha obtido uma cópia correta da mensagem. Por outro lado, se os erros são poucos e uniformemente distribuídos, ao mesmo tempo que a distância global (múltiplos saltos) entre a fonte e o destino final é moderada, a escolha do comportamento do nodo intermediário não é tão óbvia. Por exemplo, permitir que o nodo intermediário se encarregue de retransmitir todos os pacotes, mesmo os que apresentem erros de alguns bits acaba

resultando numa baixa taxa de erro de bits, mas proporciona erro de pacotes igual ou pior do que o caso onde o nodo intermediário retransmite somente pacotes corretamente recebidos. No entanto, algumas aplicações industriais não toleram qualquer perda de bits ou pacotes, neste caso, a estratégia da “retransmissão sempre”, mesmo com erro de alguns bits, só deve ser usada em conjunto com uma boa combinação de FEC, que permitiria recuperar esses erros.

Os resultados também mostram que a deposição cuidadosa de nodos retransmissores, tal que uma boa visada seja obtida, melhora significativamente o desempenho. A colocação do nodo intermediário não depende somente da visada, mas também da distância relativa entre a fonte e o destino final. Dependendo do tipo de canal, em algumas situações é preferível o nodo retransmissor estar mais próximo da fonte e, em outras situações, mais próximo do destino. Se a fonte e o destino estão dentro do alcance um do outro, o posicionamento do retransmissor mais próxima do destino permite obter os melhores resultados, ao passo que quando a fonte está localizado longe do destino, posições mais intermediárias são as melhores.

3.1.8 Resumo da seção

Como pode ser observado, existem várias propostas para resolver os problemas inerentes da RSSF em seu emprego na indústria. Na Tabela 4 apresentamos um breve resumo dos trabalhos que foram selecionados por sua atualidade e relação com esta tese. A maioria destes trabalhos faz propostas para provimento de garantias de tempo real na troca de mensagens em ambientes industriais. Quase todos propõem escalonadores para prover estas garantias. Para as propostas que consideram a retransmissão de mensagens, todas são baseadas no ARQ, o que é polêmico, já que ambientes industriais estão sujeitos a erros em rajadas (WILLIG et al., 2002), e os mecanismos baseados em ARQ tentam recuperar a perda de pacotes imediatamente após sua ocorrência, o que não garante uma diversidade temporal.

3.2 IMPLEMENTAÇÕES DA TÉCNICA DE CODIFICAÇÃO DE REDE

A técnica de codificação de rede (NC) é bastante recente e os trabalhos com implementações práticas ainda são escassos, mas têm

Tabela 4: Resumo dos artigos com RSSF aplicados à indústria.

Trabalho	Foco	Tecnologia	Principais Contribuições	Ponto Fraco	Resultados	Por que foi relacionado
3.1.1 (VITTTURI; TRAMARIN; SENO, 2013)	Panorâmica das RSSF aplicadas a indústria	Redes sem fio	Profunda análise da correção temporal em RSSF	-	Descrição de técnicas e tecnologias	Overview
3.1.2 (JONSSON; KUNERT, 2009)	Retransmissão e análise de escalonabilidade	IEEE 802.11	ARQ respeitando os tempos da transmissão de mensagens originais	-	Melhoria da MER em várias ordens de grandeza	Escalonador utilizado no próximo artigo
3.1.3 (KUNERT; UHLEMANN; JONSSON, 2010)	Retransmissão e análise de escalonabilidade	IEEE 802.15.4	ARQ respeitando os tempos da transmissão de mensagens originais	Foi desprezada a probabilidade de perda do ACK	Melhoria da MER em várias ordens de grandeza	ARQ "oportunistra"
3.1.4 (ANASTASI; CONTI; Di Francesco, 2011)	Análise e propostas de melhorias no IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	Otimização do IEEE 802.15.4 através do reajuste de seus parâmetros	-	Taxa de entrega de até 100% contra 10% do padrão	Análise profunda do IEEE 802.15.4
3.1.5 (SEMPRE-BOM et al., 2009a)	Escalonabilidade dos GTS	IEEE 802.15.4	Escalonador distribuído e dinâmico dos GTS	Ainda restrito ao número de GTS	Redução ocorrência de flaps dinâmicas	na faixa de 802.15.4
3.1.6 (SEMPRE-BOM et al., 2009b)	Escalonabilidade dos GTS	IEEE 802.15.4	Controle de admissão para nodos requisitantes de GTS	Ainda restrito ao número de GTS	Melhorias alocação dos GTS	na faixa de 802.15.4
3.1.7 (GHS; UHLEMANN; BJORKMAN, 2012)	Nodo retransmissor	Redes sem fio	Confiabilidade verificada no posicionamento do nodo retransmissor	Nodo retransmissor sempre em posição intermediária	Posicionamento de uso do nodo intermediário	Modelos de retransmissão

Fonte: própria

aumentado muito nos últimos anos. Em princípio, essa técnica surgiu como método para aumentar a taxa de transferência em redes cabeadas com a presença de roteadores. Contudo, com o passar do tempo a NC foi aplicada com outros objetivos e vem sendo aplicada em diversas camadas de redes de comunicação. Um grande salto nas possíveis aplicações surgiu com sua associação às oportunidades advindas da natureza *broadcast* do meio sem fio.

Por outro lado, ao utilizar-se esquemas de codificação mais complexos do que um XOR puro para aumentar os cenários de aplicabilidade, o que tem sido proposto na literatura é a operação em corpos finitos, onde são inseridos coeficientes “aleatórios” nas mensagens, e um conseqüente aumento na probabilidade da decodificação com a construção de sistemas linearmente independentes. Um dos problemas nesta abordagem é que os coeficientes devem ser conhecidos na operação de decodificação e, então, as soluções propostas encaminham estes coeficientes juntamente com a mensagem codificada, gerando um *overhead* que requer uma avaliação criteriosa de suas vantagens e desvantagens antes de sua implementação.

Além disso, na codificação de rede, há uma inerente sobrecarga computacional, para dar vazão à codificação e decodificação de mensagens e também a sobre-audição (do inglês *overhearing*) do meio por parte dos nodos cooperantes. Estes nodos precisam estar sempre ativos para capturar as mensagens e poder retransmití-las, o que gera um maior consumo energético.

3.2.1 *Practical network coding*

Com objetivo de simplificar o modelo, trabalhos teóricos prévios em codificação de rede têm muitas vezes assumido que símbolos fluem sincronamente através de toda a rede e os enlaces têm capacidade inteira ou unitária. Entretanto, em redes reais, informações trafegam assincronamente em pacotes, os quais estão sujeitos a atrasos e perdas aleatórias a cada enlace. Além disso, enlaces têm essencialmente capacidades desconhecidas. Trabalhos anteriores também consideram algum conhecimento centralizado da topologia de rede para fins de cálculo da capacidade de *broadcast* e/ou funções de codificação. Entretanto, nas redes reais, é muito difícil que um nodo central tenha a visão global dos estados de todos os enlaces e dos nodos que compõem a rede.

Neste sentido o trabalho de codificação de rede na prática (CHOU; WU, 2003) é endereçado a redes com pacotes reais, onde a

informação é entregue em pacotes sujeitos a perdas e atrasos aleatórios, onde enlaces têm capacidades variáveis devido ao congestionamento ou outro tipo de tráfego, onde falhas de enlaces ou nodos são comuns e onde receptores têm capacidades distintas. Assim, o trabalho proposto não requer conhecimento centralizado da topologia ou das funções de codificação ou decodificação e usa técnicas simples que são aplicadas na prática.

No trabalho é mostrado que um tamanho de corpo de 2^8 é suficiente na prática e que um tamanho de corpo de 2^{16} seria um “desperdício”, já que, qualquer perda relativa ao tamanho do corpo (sistema linearmente dependente) é desprezível quando comparada com outras perdas típicas. Quando um pacote IP tem carga útil de aproximadamente 1400 bytes, se o tamanho do corpo é 2^8 e a codificação é feita sobre 50 pacotes, o *overhead* para envio dos coeficientes é de aproximadamente 50/1400 *bytes* o que representa aproximadamente 3%.

Pelo que se tem conhecimento, este foi o primeiro trabalho com proposta de aplicação prática para codificação de rede. O esquema utiliza *buffers* para sincronizar a chegada arbitrária de pacotes e então poder codificá-los. Propôs a codificação aleatória para lidar com a variação do número de pacotes no *buffer* e utiliza vetores de codificação globais, que são encaminhados junto com o pacote e permitem o receptor decodificar as informações imediatamente após o recebimento de uma quantidade adequada de pacotes.

Resultados obtidos em enlaces de redes reais, que atravessam os EUA, conseguiram taxas que se aproximam da capacidade nominal dos mesmos, com baixos atrasos.

3.2.2 *XORs in the air: practical wireless network coding*

Katti et al. (2006, 2008) propõem o COPE, que é uma nova arquitetura de encaminhamento de mensagens de dados que aumenta substancialmente a taxa de transferência em redes sem fio com dispositivos agrupados em topologia do tipo malha.

O maior desafio no desenvolvimento do COPE foi estender a ideia de NC em relação a fluxos duplex, ou seja, a troca mútua de dados entre dois nodos com a colaboração de algum nodo intermediário. Para fazer isto foi explorada a natureza *broadcast* do meio sem fio. Isto foi conseguido habilitando os nodos escutar a todas as transmissões e armazenar os pacotes que escutaram por um curto período de tempo. Como resultado, um retransmissor pode fazer o XOR de dois pacotes

e entregá-lo para dois vizinhos distintos numa única transmissão, sempre que ele souber que os dois vizinhos escutaram pelo menos um dos pacotes.

A técnica é implementada com a inserção de uma camada de codificação entre as camadas IP e MAC, que detecta oportunidades de codificação e as explora para encaminhar múltiplos pacotes numa transmissão única. COPE incorpora três técnicas principais:

1. **Escuta oportunística.** COPE ajusta os nodos para o modo promíscuo, habilitando-os a “bisbilhotarem” todas as comunicações no meio sem fio e armazenar os pacotes por um período de tempo. Além disto, cada nodo envia em *broadcast* relatórios de recepção, para informar a seus vizinhos quais pacotes ele armazenou (importante observar que estes relatórios podem gerar uma tráfego adicional considerável).
2. **Codificação oportunística.** Uma questão chave é determinar quais os pacotes codificar para maximizar a taxa de transferência. Um nodo pode ter múltiplas opções, mas ele deve maximizar o número de pacotes originais entregues em uma única transmissão, enquanto assegura que cada destino de próximo salto tem informações suficientes para decodificar os pacotes originais desejados. Para atingir este objetivo um regra simples é adotada: um nodo pode aplicar o XOR em n pacotes juntos somente se cada um dos vizinhos tem todos os $n - 1$ pacotes do conjunto. Isto permite que cada vizinho consiga obter o pacote desejado, aplicando um novo XOR.
3. **Aprendizado sobre o estado do vizinho.** Os relatórios de recepção podem não ser corretamente recebidos, em casos de congestionamento da rede etc. Nestes casos, os pacotes originais relevantes são retransmitidos e, se possível, codificados num novo pacote em conjunto com outros pacotes originais.

A decodificação de pacotes é simples. Cada nodo mantém uma memória de pacotes e nela armazena uma cópia de cada pacote original que tenha recebido ou enviado. Os pacotes são armazenados numa tabela *hash* com identificador (ID) de pacote. Quando um nodo recebe um pacote codificado consistindo de n pacotes originais, o nodo passa pelos ID dos pacotes originais, um por um e, dados os pacotes originais disponíveis e o atual codificado, recupera (se possível) o pacote desconhecido, fazendo o XOR dos mesmos e, então, também o armazena na tabela.

Medições foram feitas com 20 nodos baseados no protocolo IEEE 802.11 e com adaptações para o COPE. Os seguintes resultados foram

obtidos:

- Quando o meio sem fio estava congestionado e o tráfego consistia de vários fluxos UDP aleatórios, COPE aumentou entre 3 a 4 vezes o desempenho da taxa de transferência.
- Quando o meio não estava congestionado, o aumento no desempenho da taxa de transferência foi substancialmente maior que o esperado para ganhos com codificação. Isto foi atribuído (pelos autores) ao conjunto codificação e protocolo MAC.
- Para uma rede em malha, conectada à internet via *gateway*, o aumento da taxa de transferência observada com o uso do COPE depende da razão de tráfego de entrada e saída no *gateway*, e varia entre 5 a 70%.
- Terminais ocultos criam altas taxas de perdas que não podem ser mascaradas, mesmo com o número máximo de retransmissões admitidas pelo IEEE 802.11. Nestes ambientes, o TCP não enviou dados o suficiente para criar oportunidades de codificação.
- Em ambientes sem terminais ocultos, a melhoria na taxa de transferência no TCP com COPE foi equivalente ao ganho esperado com a codificação.

3.2.3 *AdapCode: adaptive network coding for code updates in wireless sensor networks*

Segundo Hou et al. (2008), aplicações para RSSF são tipicamente desenvolvidas e depuradas em laboratório e então aplicadas em determinado ambiente, onde os problemas dependentes do ambiente serão eliminados. Frequentemente, essas aplicações requerem frequentes atualizações de códigos (*firmware*), motivando a existência de esquemas de *broadcast* eficientes. O *broadcast* deve ser confiável, rápido e minimalista no consumo de banda da rede. Além disto, é desejado que a carga imposta a rede seja balanceada no sentido de garantir um equilíbrio no consumo energético entre os diversos nodos.

Devido as propriedades quando há transmissão de um para muitos, a estação base precisa atualizar os códigos ou enviar mensagens de (re)configuração de protocolo para todos os nodos.

Este trabalho propõe o chamado AdapCode, um protocolo confiável de disseminação de dados usando codificação de rede adaptativa, para reduzir o tráfego redundante e economizar energia nos processos de atualização de *firmware*. A metodologia de codificação consistiu em combinar uma série de pacotes dentro de um único pacote usando combinação linear. São gerados uma série de coeficientes (tan-

tos quanto o número de pacotes), calculado o produto do coeficiente pelo respectivo pacote e a soma total que vem a ser o novo pacote. Os coeficientes são inseridos no cabeçalho do pacote para que o receptor consiga proceder a decodificação por eliminação Gaussiana.

Por simulação foi mostrado que a escolha ótima do número de pacotes para combinar dentro de um novo depende da densidade da rede. Foi mostrado também que, no pior caso, a codificação de rede fornece o mesmo resultado que propostas do tipo armazena dados e os encaminham.

A confiabilidade cai com o crescimento de número de pacotes combinados (N) e com o decréscimo da densidade. Por exemplo, quando os nodos têm 12 vizinhos (maior densidade nos ensaios), mais de 98% deles consegue decodificar todas as mensagens quando N é 8. Este resultado mostra claramente que a codificação de rede pode reduzir o tráfego sem perdas significativas na confiabilidade, mas N deve ser adaptado de acordo com a conectividade da rede.

O trabalho apresentou uma análise da relação entre o número esperado de retransmissões por pacote para diferentes densidades de rede, onde chegou-se a conclusão que para índice de vizinhança igual ou inferior a 4, a codificação de rede não é recomendada.

Alguns dos resultados apresentados mostram que o AdapCode precisa enviar bem menos pacotes, de 41% a 83% menos que o método de inundação e 24% a 40% menos que o método denominado Deluge (até então estado da arte em protocolos de disseminação de código). Além disto, o método proposto também tem melhores resultados nas métricas de balanceamento de carga e atraso de propagação (latência), ainda comparado com o Deluge.

3.2.4 SenseCode: network coding for reliable sensor networks

O SenseCode (KELLER et al., 2013) é um protocolo para redes de sensores implementado sobre o TinyOS, o qual permite a introdução de uma quantidade configurável de informações redundantes na rede. SenseCode utiliza a codificação de rede para habilitar uma nova forma de comunicação por múltiplos caminhos (flooding), onde cada nodo dissemina informações por todos os caminhos disponíveis, sem ter de descobrir ou manter estes caminhos (sem ter de manter protocolos de roteamento). Além disso, ele usa algoritmos descentralizados e simples que não excedem a modesta capacidade de processamento e memória do nodos.

A proposta é utilizar a codificação de rede para prover um balanço de eficiência energética e confiabilidade. Para preservar mensagens mediante a possibilidade de perda de pacotes, foi introduzida a redundância de informações na rede. No SenseCode, nodos constroem e mantêm uma árvore de encaminhamento à estação base. Entretanto, cada nodo propaga não somente sua própria mensagem e de seus filhos (do seu agrupamento), mas também uma pequena porção do que ouviu de seus vizinhos de mesmo nível no agrupamento. Mais especificamente, cada nodo propaga uma combinação linear de sua mensagem, dos pacotes recebidos de seus filhos e uma pequena porção dos pacotes ouvidos de seus vizinhos, essencialmente fazendo a codificação de rede. A transmissão da mensagem codificada consegue obter alta confiabilidade de uma maneira energeticamente mais eficiente, quando comparado a simples retransmissão de todas as mensagens ouvidas.

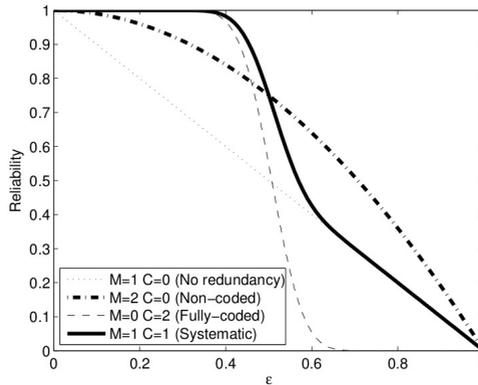
No artigo é feito um comparativo entre três protocolos com redundância 2, isto é, se são necessários x bits para representar N mensagens, então serão enviados $2x$ bits ao sorvedouro: *i*) Comunicação com repetição – a fonte duplica cada mensagem, o destino precisa receber somente uma das duas; *ii*) Comunicação com todas as mensagens codificada; *iii*) Comunicação sistemática – A fonte envia metade das mensagens codificadas e metade não codificada.

O comparativo mostra (Figura 13) que a comunicação sem codificação atinge confiabilidade igual a 1 (máxima) somente quando a taxa de perda de pacotes é igual a zero. Por outro lado, a comunicação completamente codificada, atinge confiabilidade igual a 1 até a taxa de perda de pacotes aumentar para aproximadamente 45%, a partir de onde a confiabilidade cai drasticamente. O motivo desta queda é que, quando a taxa de perda de pacotes é maior que a metade, a estação base recebe poucas combinações linearmente independentes, diminuindo drasticamente seu poder de decodificação. Finalmente é mostrado que a técnica de comunicação sistemática apresenta um desempenho superior à da completamente codificada para altas taxas de perdas e igual para baixas taxas de perdas.

Em resumo, comunicações codificadas claramente são melhores que as não codificadas em termos de confiabilidade.

A comunicação sistemática reduz a sobrecarga da codificação e proporciona um desempenho melhor que o protocolo completamente codificado, já que tem um comportamento igual a este até aproximadamente 45% de perdas, mas com uma melhora significativa a partir deste ponto.

Figura 13: Confiabilidade em função da perda de pacotes (ε) para os diferentes protocolos.



Fonte: (KELLER et al., 2013)

3.2.5 Optimal data spreading in sensor networks using network coding

No trabalho Balochian e Baloochian (2012) foi proposto um novo protocolo para coleta de dados em RSSF chamado OSSC (*Optimal Spreading Sensor Coding*). No protocolo é proposta a divisão dos nodos sensores em três grupos baseados no conteúdo de suas filas. Então, é definido um método de codificação próprio para cada grupo. Também é controlado o número de cópias geradas dos pacotes originais para controlar a carga na rede. As cópias geradas contém uma combinação linear dos pacotes originais. Assim sendo, o OSSC é capaz de controlar a localização da codificação de pacotes bem como o número de pacotes codificados. De maneira genérica, o OSSC tenta gerar pacotes codificados assim que possível no nodo adequado. Deste modo consegue evitar interferências em torno da estação base que de outra forma seriam inevitáveis. O número de cópias geradas de um pacote é controlada por um parâmetro global chamado fator de espalhamento.

Idealmente, todos os pacotes devem ser distribuídos na rede para que eles atinjam a estação base com probabilidade de 100% e com redundância mínima. Por outro lado, quanto menos vezes um pacote é difundido na rede, mais ele deve ser copiado ou combinado com outros pacotes para alcançar confiabilidade necessária. Portanto, tem de haver

um mecanismo no protocolo para evitar que muitos pacotes com muitas cópias do pacote original alcancem a estação base. Para cada pacote foi definido um parâmetro chamado fator de difusão (SF), que mostra qual é a medida de cópia do pacote. Ao olhar para o SF, cada nó pode decidir se é necessário fazer uma cópia do pacote original.

A proposta foi comparada com o SenseCode (seção anterior) e apresentou os seguintes resultados:

- Taxa de entrega de pacotes sempre superior ao SenseCode, com a diferença aumentando a medida que a taxa de erros na rede aumenta.
- A fração de pacotes inutilmente codificados em relação à taxa de entrega de pacotes foi bem menor para o OSSC. Isto quer dizer que este protocolo é mais eficiente na definição da necessidade de codificação ou não.
- O gasto total de energia é menor para este protocolo.
- Foi mostrado por meio de simulações que o valor do fator de espalhamento ótimo fica em torno de 3.

3.2.6 *Wireless broadcast using network coding*

O foco do trabalho Bose (2009) é a combinação de NC e retransmissão para usar eficientemente a banda de *broadcast*.

A proposta apresenta uma técnica de *Broadcast* com codificação de rede com retransmissão que apresenta diversidade espacial, onde o receptor envia um NACK imediatamente se ele não receber um pacote corretamente. No entanto, a fonte não retransmite imediatamente o pacote perdido quando recebe o NACK, como no tradicional esquema ARQ. Em vez disso, a fonte mantém uma lista de pacotes perdidos e seus correspondentes destinatários. A fase de retransmissão tem um período específico para tal. Durante a fase de retransmissão, a fonte forma um novo pacote pela codificação (XOR puro) de um conjunto máximo de pacotes perdidos, desde que tenha diferentes destinos, antes do envio. O sistema considera que os pacotes codificados podem ser perdidos durante a retransmissão, e estes pacotes serão retransmitidos até que todos os receptores consigam receber este pacote. A fonte continua enviando os pacotes codificados até não ter mais pacotes perdidos na lista, em seguida, recomeça a transmissão de um novo conjunto de pacotes.

Mesmo que um receptor receba os pacotes combinados com sucesso, ele deve ser capaz de recuperar os pacotes originais, e faz isto decodificando por meio do XOR entre pacotes codificados e pacotes

originais que já possuía.

Em resumo, é montado uma matriz que associa todos os receptores com os pacotes perdidos, assim sendo, a fonte tem condições de codificar pacotes de tal modo que cada destinatário que os receba, tenha uma única incógnita, podendo assim decodificar o mesmo. A economia está no fato que, ao invés de retransmitir pacotes individuais para cada receptor, retransmite, em uma única mensagem, um conjunto de mensagens útil para vários destinos simultaneamente.

Com os resultados das simulações pôde-se concluir que o número de transmissões por pacote cai significativamente quando usa-se a codificação de rede, tanto com o aumento da probabilidade de perda de pacotes dado a problemas no meio sem fio, bem como quando aumentasse o número de receptores. O comparativo foi feito tendo como base técnicas de retransmissão sem codificação de rede.

3.2.7 Mechanism for coding-aware opportunistic retransmission in wireless networks

No trabalho Yan et al. (2009) é proposto um novo mecanismo para retransmissão oportunista ciente do código, referido como NCCR. NCCR reduz o número de retransmissões para aumentar a taxa efetiva em redes sem fio com perdas. As contribuições do trabalho foram: *i*) primeira técnica que combinou cooperação oportunista para retransmissão, com o intuito de prover transmissões confiáveis e eficientes em redes sujeitas a perdas. *ii*) NCCR tira vantagem de oportunidades de codificação baseadas no padrão de perdas. Isto significa que mais oportunidades de codificação podem ser criadas, quando mais perda de pacotes ocorrem na vizinhança.

Além dos pacotes do próprio nodo, pacotes dos nodos vizinhos também podem ser armazenados numa fila, para isto o nodo deve ficar ouvindo o meio e capturar os pacotes e verificar se os destinatários destes pacotes ainda não os receberam. Todos os nodos trabalham continuamente em modo promíscuo.

Para embasar o desenvolvimento dos trabalhos foram feitas as seguintes considerações: *i*) Quais pacotes transmitir? O receptor deve mandar um ACK assim que receber um pacote e informar sobre pacotes que não recebeu. *ii*) Quando transmitir um pacote? Se o nodo tiver um pacote novo e algum(ns) velho(s) para enviar para algum receptor, ele precisa decidir qual enviará antes. *iii*) Como transmitir um pacote? Um nodo pode decidir qual o conjunto de pacotes pode ser codificado,

se possível, para reduzir o número total de retransmissões.

Um algoritmo de codificação foi especialmente desenvolvido, levando em conta que um nodo pode ter múltiplas chances de codificação. Portanto, uma questão chave é o subconjunto de pacotes que deve ser codificado para minimizar o número de transmissões em ambiente com perdas.

Cada nodo mantém uma fila de saída FIFO para pacotes que devem ser encaminhados e uma fila virtual para cada vizinho. A ideia básica do algoritmo de codificação proposto é a seleção de possíveis combinações de pacotes originais de cada fila virtual para incrementar as oportunidades de codificação.

O algoritmo tem como objetivo maximizar os ganhos com codificação de rede, tanto quanto possível, fazendo com que cada nodo tenda a receber uma, e no máximo uma, incógnita (dados os pacotes já disponíveis em cada nodo) por pacote codificado transmitido. Se um determinado nodo não receber uma mensagem que não contenha nenhuma incógnita para ele, de nada adiante este pacote. Se receber uma incógnita, sabendo as demais, consegue decodificar. Recebendo mais de uma não vai conseguir decodificar e, portanto, também nada adianta.

Os resultados mostram que este mecanismo apresenta ganhos, quando comparado com o COPE (Seção 3.2.2), na seguintes métricas: menor taxa de perda de pacotes, maior taxa de transferência na rede e uma menor taxa de retransmissão.

3.2.8 Enhancement of lifetime using duty cycle and network coding in wireless sensor networks

O objetivo básico do trabalho de Rout e Ghosh (2013) é aumentar a vida útil da rede como um todo, ou seja, minimizando a exaustão energética individual de nodos. Para tanto, os autores definem uma região de gargalo energético, numa típica rede de sensores, como sendo a região ao redor/próxima do sorvedouro. Assim sendo, o objetivo é otimizar a comunicação nesta região e é proposto um esquema que envolve codificação de rede e ciclo de trabalho.

O trabalho então foca na estimativa do limite superior de vida útil da rede por meio da análise na região do gargalo, comparando três hipóteses: *i*) ciclo de trabalho randomicamente distribuído em todos os sensores *ii*) RSSF sem uso de ciclo de trabalho mas com uso da codificação de rede e *iii*) ciclo de trabalho randômico na rede mais a

codificação de rede na região do gargalo. O objetivo deste comparativo é dar subsídios para o desenvolvimento de protocolos energeticamente eficientes.

Foi observado que a proposta combinada (*iii*) apresentou uma redução no consumo energético na região do gargalo e, portanto, aumentou a vida útil da rede em até 9,5%.

Outra observação importante foi que a estação base recebeu aproximadamente 50% mais dados com o mesmo consumo energético na região do gargalo. Sabe-se que quanto maior o volume de informações recebida pela estação base, maior tende a ser a precisão da decisão tomada pelo mesmo, baseada nos dados recebidos.

Um ganho significativo na taxa de entrega de pacotes foi obtida com a codificação de rede. Por outro lado, a latência dos pacotes foi maior para baixas densidades de nodos mas, com o aumento da densidade, a proposta apresentou uma latência significativamente menor do que a opção sem codificação de rede.

3.2.9 Network coding over connected dominating set: energy minimal broadcasting in wireless ad hoc networks

Wang et al. (2014) aborda algoritmos de *broadcast* energeticamente eficientes baseado na codificação de rede, levando em consideração que o desempenho da codificação de rede é dependente da avaliação de oportunidades em realizá-la.

Em muitas aplicações, *broadcast* é considerado um dos eventos mais frequentes nos casos de disseminação de dados ou mensagens de controle em redes sem fio *ad hoc*. O grande problema no roteamento *broadcast* é que muitos nodos intermediários repassam as mensagens desnecessariamente e, portanto, nodos vão receber múltiplas réplicas de mensagens.

Segundo os autores, um bom método para reduzir o consumo energético no *broadcast* é o uso do denominado CDS (*Connected Dominating Sets*) concebido originariamente na teoria de grafos. A maior vantagem do *broadcast* baseado em CDS é que ele pode eliminar a maioria das retransmissões durante a propagação de uma mensagem, além de prover um roteamento estável em redes *ad hoc* sem fio. Os autores propõem o desenvolvimento de um protocolo de *broadcast* energeticamente eficiente combinando NC do tipo XOR (\mathbb{F}_{2^1}) com CDS, denominado NCDS.

O artigo aponta o COPE, Seção 3.2.2, como um bom esquema

de codificação de rede adaptado para sistemas práticos, apontando que um dos potenciais problemas desta abordagem é que a disponibilidade de oportunidades de codificação é altamente dependente de como os caminhos das rotas são estabelecidos.

Em um trabalho anterior os autores haviam desenvolvido um protocolo energeticamente eficiente de *broadcast* utilizando codificação de rede e CDS. Neste trabalho, aquela ideia é generalizada com adição de ganhos extras obtidos com a codificação de rede composta de duas partes denominadas: ganho energético com a codificação de rede na infraestrutura pura e ganho energético com a codificação de rede na infraestrutura interna.

É salientado que o COPE incorpora três grandes técnicas: *i*) audição oportunista, *ii*) codificação oportunista e *iii*) aprendizado do estado da vizinhança. Complementarmente, os autores foram motivados pela observação de que com a infraestrutura pura provisionada pelo CDS, fluxos de informação se intersectam mutuamente muito facilmente, criando oportunidades para a ação da codificação de rede. Por outro lado, a codificação de rede também ocorre frequentemente nos moldes tradicionais, denominados no interior da infraestrutura.

Os autores fazem então uma análise matemática e simulações com o simulador NS¹, chegando aos seguintes resultados:

- O esquema NCDS teve um ganho energético significativo quando comparado com esquemas do tipo CDS puro ou NC puro.
- Em ambientes dinâmicos (nodos em movimento) o desempenho do NCDS degrada, devido principalmente a instabilidade das rotas do CDS, mas ainda assim, tem um ganho superior.
- As oportunidades de codificação crescem significativamente quando comparadas com esquemas sem CDS, confirmando a necessidade de utilização de CDS juntamente com codificação de rede.

3.2.10 Resumo da Seção

Na Tabela 5 são apresentados os resumos dos artigos já descritos e considerados relevantes para este trabalho. O que fica muito claro é que a técnica de codificação de rede é ainda incipiente, ainda mais quando considerado o universo das RSSF, apresentando uma enorme fronteira a ser explorada.

Cabe destacar a importância de explorar as características entre

¹<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

codificação de rede e a natureza *broadcast* do meio sem fio.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Como foi observado ao longo deste capítulo, a subcamada MAC do padrão IEEE 802.15.4 possui algumas limitações para seu emprego na indústria e existem diversas propostas para sua alteração, no sentido de minimizar os efeitos destas limitações. Em resumo, as propostas de alteração se dão em três patamares, em ordem decrescente de impacto:

- Alguns artigos propõem a substituição da subcamada MAC e, em seu lugar, introduzem novos protocolos fazendo todo o controle de acesso ao meio e implementando outras características específicas de cada proposta.
- Algumas propostas exploram especificamente o período CFP. Nestes casos basicamente são feitas propostas de alteração buscando a ampliação da alocação do limitado número de compartimentos presentes, permitindo que um maior número de nodos façam uso deste período.
- Uma das propostas enfoca na mudança de alguns parâmetros de configuração da subcamada MAC, fazendo com que a mesma tenha um desempenho melhor durante o período CAP.

Todas essas propostas objetivam dar maior confiabilidade ao padrão no uso industrial. A confiabilidade dos dados transmitidos pode se dar de duas maneiras, empregando mecanismos do tipo FEC, que conseguem recuperar até um determinado conjunto de *bits*. Para os casos de maior ocorrência de erros é necessário uso de mecanismos de retransmissão de mensagens. Neste caso, todos os métodos apresentados nas técnicas propostas utilizam um mecanismo similar ao ARQ, onde, ao não receber a confirmação do recebimento de uma determinada mensagem, a mesma é automaticamente retransmitida. Esta abordagem traz o problema da inerente falta de diversidade temporal.

Neste sentido, as propostas envolvendo a cooperação e codificação de rede promovem uma maior diversidade temporal e espacial, juntamente com maior taxa de transmissão e menor latência.

Por outro lado, a codificação de rede apresenta desafios em sua aplicabilidade em RSSF, já que, inerentemente ao processo de codificação de rede, apresenta-se uma maior carga computacional e um *overhead* nas mensagens codificadas. Além disso, há um *overhead* no

Tabela 5: Resumo dos artigos com codificação de rede.

Título	Foco	Tecnologia	Principais buíções	Contri-	Ponto Fraco	Resultados	Por que foi relacionado
3.2.1 (CHOU; WU, 2003)	Meio cabeado	TCP/IP	Primeira prática	aplicação	<i>Overhead</i> de 50%	Aumento na taxa de transferência	Contexto histórico do trabalho
3.2.2 (KATTI et al., 2006, 2008)	Aumento da taxa de transferência	802.11	Emprego de <i>NC</i> . Aproveitamento da natureza <i>broadcast</i> do meio sem fio	Pro-cotes continuamente	Nodos "escutando"	Aumento significativo na taxa de transferência	Primeira aplicação de <i>NC</i> em meio sem fio – COPE
3.2.3 (HOU et al., 2008)	Disseminação <i>firmware</i> de	RSSF	Codificação adaptativa. Análises feitas sobre <i>NC</i>	<i>Overhead</i>	Melhora nas métricas: balanço de carga, tráfego e latência	Primeira aplicação de <i>NC</i> em RSSF	
3.2.4 (KELLER et al., 2013)	Confiabilidade RSSF	RSSF/TinyOS	Elimina a necessidade de manutenção de múltiplas estruturas de roteamento	<i>Overhead</i>	Mistura de pacotes codificados e não	Aplicação de <i>NC</i> em RSSF	
3.2.5 (BALO-CHIAN; BALO-LOOCHIAN, 2012)	Confiabilidade RSSF	RSSF	Melhorias em relação ao SenseCode	-	Otimização na relação entre pacotes codificados ou não	"Atualização" do SenseCode	
3.2.6 (BOSE, 2009)	<i>Broadcast</i> eficiência	Redes sem fio	Esquema de <i>broadcast</i> usando codificação de rede	Assume que há perda de ACK/NAck	Broadcast confiável com menor número de transmissões	Uso de <i>NC</i> nas retransmissões	
3.2.7 (YAN et al., 2009)	Retransmissão oportunista	IEEE 802.11	Mecanismo de retransmissão baseado em <i>NC</i>	Nodos sempre trabalham em modo promíscuo	Menor PER. Menor <i>throughput</i> . Menor nº de retransmissões	"Atualização" do COPE	
3.2.8 (ROUT; GHOSH, 2013)	Aumento da vida útil das RSSF	RSSF	Proposta de <i>NC</i> agregado a ciclo de trabalho para aumentar vida útil da rede	Simulações no Matlab com aproximações. Vida útil da rede: 26 anos	Redução do consumo energético e sobrevida à rede	Nova proposta de uso de <i>NC</i>	
3.2.9 (WANG et al., 2014)	minimização do consumo energético em <i>broadcast</i>	IEEE 802.11	Dupla oportunidade de <i>NC</i>	Redução de consumo energético em IEEE 802.11	Diminuição do consumo energético global, aumento nas oportunidades de <i>NC</i>	"Atualização" do COPE	

Fonte: própria

processo de cooperação, pois é necessário que nodos cooperantes ouçam constantemente o meio para poderem retransmitir as mensagens, o que aumenta seu consumo energético.

O emprego da codificação de rede é recente, ainda com trabalhos focados em redes cabeadas. Seu uso em redes sem fio está na fase inicial e muito mais incipiente em RSSF.

Assim sendo, essa tese de doutorado aborda a codificação de rede em RSSF, respeitando suas limitações energéticas e computacionais, para aumentar a confiabilidade em redes que utilizam o padrão IEEE 802.15.4, inclusive mantendo-se a compatibilidade com sistemas legados.

4 MODELO DO SISTEMA

A pesquisa e desenvolvimento dessa tese engloba o conhecimento de três comunidades científicas distintas: *i*) comunidade das Redes de Sensores Sem Fio; *ii*) comunidade da informática industrial com a adoção de redes sem fio na manufatura; *iii*) e comunidade de codificação de rede.

Este capítulo inicia contextualizando os principais requisitos de comunicação sem fio em ambientes industriais a serem tratados nessa tese. Na sequência, descreve-se o modelo do sistema de comunicação adotado, enfatizando suas principais características no que concerne à comunicação sem fio em ambientes industriais. Devido à necessidade de se propor técnicas que melhorem a confiabilidade da comunicação nesses ambientes, e também devido à necessidade de se avaliar essas técnicas, métricas de desempenho são apresentadas e discutidas. Finalmente, algumas técnicas simples que buscam melhorar a confiabilidade da comunicação são apresentadas e discutidas no final do capítulo. Essas técnicas serviram como base de comparação para avaliação de desempenho da técnica de retransmissão de mensagens baseada na codificação de rede proposta nessa tese – NetCOMeR. Ademais, algumas características encontradas nessas técnicas serviram de base para definição de alguns dos mecanismos propostos no NetCOMeR.

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

De um modo geral, as RSSF possuem nodos sensores e meio de comunicação não confiáveis. Genericamente, os nodos estão sujeitos à fadiga energética, ou seja, deixam de funcionar por falta de energia. Portanto, praticamente todas as abordagens e protocolos que envolvem essas redes têm, como uma das principais preocupações, a economia de energia. Os sensores dos nodos, por serem de baixo custo, em geral não apresentam exatidão nos valores auferidos das grandezas monitoradas. Propostas para sanar esse problema são apresentadas, por exemplo, nos trabalhos que exploram a fusão de dados. O meio sem fio ainda é considerado não confiável e existe uma grande quantidade de trabalhos para aumentar sua confiabilidade. Para atender todas essas demandas, as propostas de soluções englobam todas as camadas de rede individualmente ou em abordagens denominadas (*cross-layer*).

As redes industriais, por outro lado, têm a confiabilidade no

cerne de suas aplicações. Nestas redes, a temporalidade, corretude e exatidão dos dados são fundamentais para garantia do perfeito funcionamento dos sistemas. Ou seja, ao se inserir as RSSF na indústria deve-se atentar para uma mudança de paradigma, dadas as exigências requeridas (WILLIG, 2008). Os sensores devem apresentar a exatidão exigida pela aplicação, com o conseqüente uso de sensores de melhor qualidade e maior custo. A questão energética dos nodos continua presente, já que, na grande maioria dos casos, os nodos continuam sendo alimentados por baterias; exceção feita aos atuadores, onde os nodos são usualmente acoplados a máquinas que têm fonte contínua de energia. Já a confiabilidade do meio sem fio deve ser ampliada ao máximo, por meio de mecanismos nas diversas camadas dos protocolos de rede, que garantam a entrega confiável dos dados. Os níveis de confiabilidade exigidos podem variar de acordo com a aplicação, como mostrado na Tabela 1 (Capítulo 1).

O interesse por comunicação sem fio em ambientes industriais é cada vez maior pela comunidade da informática industrial, pois estima-se uma enorme economia de recursos e tempo de implantação e de manutenção (INDUSTRIAL_WIRELESS_COMMUNITY, 2002). Conseqüentemente uma característica comum a quase todos os padrões propostos para uso no ambiente industrial é que os mesmos são baseados no IEEE 802.15.4. Este tipo de rede está se tornando o padrão *de facto* para as camadas subjacentes em redes LR-WPAN e, portanto, é tema central desse trabalho de tese.

Em cenários de automação industrial pressupõe-se ambientes com diversos sensores enviando periodicamente mensagens para um controlador e este, por sua vez, a atuadores. As recentes propostas de substituição de redes cabeadas por redes sem fio nesses ambientes (BAILLIEUL; ANTSAKLIS, 2007), considerando o meio ruidoso (ZVEI, 2009), demandam mecanismos de retransmissão de mensagens eficientes. No caso do padrão IEEE 802.15.4 o mecanismo presente é baseado no mecanismo ARQ, implementado na camada de enlace, a qual apresenta baixa diversidade temporal. Outra possibilidade é encarregar a camada de transporte (não especificada no padrão) pela retransmissão de mensagens. Contudo, essa abordagem pode levar a um aumento da taxa de perda de *deadlines*, já que pode transcorrer um período relativamente longo entre a detecção de uma perda de mensagem até a nova requisição e o reenvio da mesma. Sendo assim, o problema de retransmissão de mensagens deve preferencialmente ser resolvido na sub-camada MAC e, para tanto, novos protocolos se fazem necessários para o tratamento da perda de mensagens com garantias temporais,

alta ocupação do meio e baixo consumo dos recursos energéticos.

Uma área de pesquisa que vem despontando e pode auxiliar na resolução de problemas de confiabilidade é a comunidade de codificação de rede. A preocupação central dessa comunidade é com o aumento do desempenho (taxa de transmissão) como um todo nas redes, sejam cabeadas ou não. Por outro lado, pouca atenção tem se dado à questão da confiabilidade na comunicação. Neste sentido pode-se usar a NC para garantir uma melhoria nas taxas de entrega de mensagens em um tempo determinado, contando com a colaboração de nodos cooperantes.

Portanto, essa tese tem por objetivo interligar o conhecimento dessas áreas e propor um protocolo eficiente de retransmissão de mensagens nas RSSF, permitindo assim a ampliação do seu emprego nas indústrias. No sentido de descrever melhor o protocolo proposto, assim como as premissas assumidas para a rede e para a aplicação em que serão empregadas o novo protocolo, na sequência é descrito o modelo do sistema adotado.

4.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

Considerando que o protocolo proposto é direcionado para redes industriais, assume-se que a rede e o sistema proposto possuam as seguintes características:

Topologia estrela ou *cluster-tree* – Assume-se que a rede possua topologia estrela com comunicação direta, com apenas um salto, entre os nodos sensores e o coordenador da estrela; ou topologia *cluster-tree*, a qual permite o funcionamento de um número muito maior de nodos, bem como o agrupamento dos mesmos, seja por motivos de similaridade funcional ou de localização espacial. A organização de redes em topologia estrela traz algumas vantagens em termos de latência, fácil organização e sincronização, quando comparadas com topologias em malha e, portanto, é uma das topologias indicadas para emprego no chão de fábrica (CHEN et al., 2008).

Tempo compartimentado (TDMA) – A compartimentação do tempo permite o acesso ao meio sem contenção, levando o aumento significativo na confiabilidade da entrega das mensagens dentro dos *deadlines*.

Comunicação oportunista – Segundo Abouelseoud e Nosratinia (2011), um método de comunicação oportunista em redes é aquele

que, a cada momento, escolhe a melhor alternativa de comunicação entre as várias existentes. Nessa tese, o mecanismo de retransmissão oportunista está relacionado ao fato de as retransmissões ocorrerem somente quando houver necessidade e oportunidade. Ou seja, a retransmissão somente ocorre caso haja perdas na rede e haja um nodo capaz de retransmitir a mensagem com boa probabilidade de sucesso.

Codificação de rede – Propõe-se o uso de um mecanismo oportunista para retransmissão de mensagens baseado na técnica de codificação de rede, buscando aumentar a confiabilidade na entrega de dados.

Cooperação – Um modelo que busca melhorar a confiabilidade na comunicação pode explorar a natureza *broadcast* existentes na comunicação sem fio. Nodos próximos ao emissor de uma mensagem para outros destinatários podem ouvir e, caso necessário e oportuno, colaborar na retransmissão dessa mensagem.

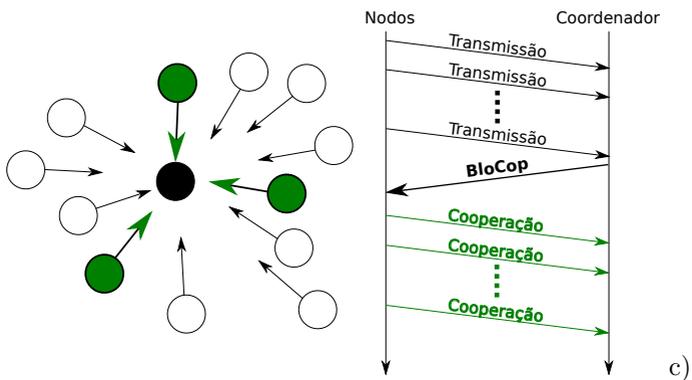
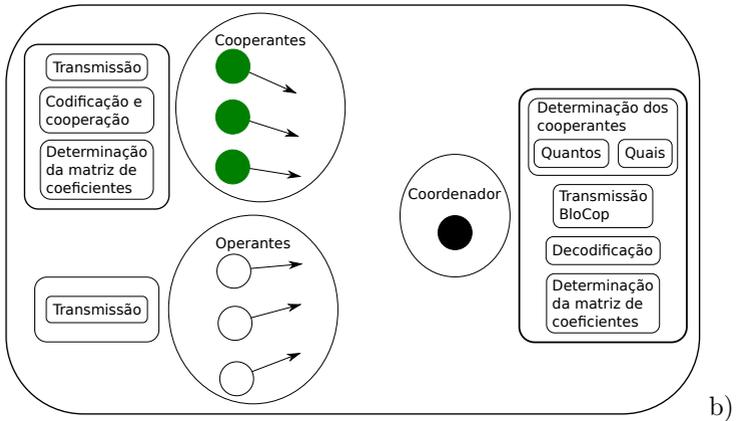
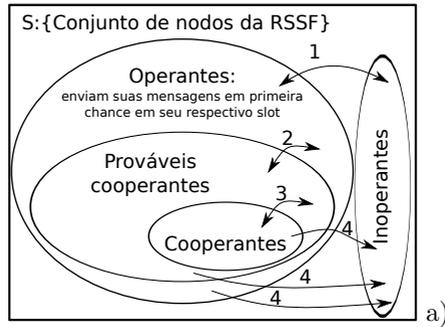
Diversidade temporal – A retransmissão de mensagens pode ocorrer imediatamente após o insucesso na transmissão da mesma. Contudo, dado o modelo de ruído industrial do tipo cauda longa, isso muitas vezes é inadequado e leva a uma maior ocupação do meio, sem garantias de sucesso. O uso de uma maior diversidade temporal vai ao encontro de uma melhoria de desempenho nas comunicações industriais.

Conformidade com o IEEE 802.15.4 – A conformidade com normas é essencial nas redes de comunicações industriais pois permite a interconexão de equipamentos de diversos fabricantes e, neste sentido, nessa tese assume-se redes em conformidade com o padrão IEEE 802.15.4.

O padrão IEEE 802.15.4 define parcialmente algumas regras de formação de rede, as quais são dependentes da topologia utilizada. Seja qual for a topologia utilizada sempre existe um único **coordenador PAN**, o qual é responsável pela formação, sincronização e manutenção da rede.

Na Figura 14 é representada a arquitetura geral dessa tese, dividida em conjunto de nodos componentes, a arquitetura funcional do modelo e a arquitetura de comunicação. Cada um desses conjuntos serão detalhados nas sub-seções a seguir.

Figura 14: Arquitetura do sistema: a) Componentes, b) Funcional e c) Comunicação



Fonte: própria

4.2.1 Componentes do modelo

Em uma RSSF podem existir grupos de nodos desempenhando diferentes papéis. Para o caso da técnica **NetCOMeR**, onde cada nodo envia sua mensagem em primeira tentativa e alguns colaboram enviando uma mensagem codificada em segunda chance, pode-se classificar os papéis desenvolvidos pelos nodos de acordo com o apresentado na Figura 14a). Na base do **NetCOMeR** existem dois conjuntos de nodos: os **Operantes** e os **Cooperantes**. O conjunto de nodos **Operantes** é aquele formado por nodos que periodicamente encaminham seus dados, nos seus respectivos compartimentos de tempo. Já o conjunto de **Cooperantes** é formado pelos nodos que, além de enviarem seus dados periodicamente, enviam uma mensagem codificada quando ocorrem perdas na rede.

Um outro importante conjunto de nodos é aquele formado por nodos **Inoperantes**. Este conjunto é formado por nodos “cadastrados” no agrupamento estrela mas que estão um longo tempo sem enviar mensagens e sem cooperar com seus vizinhos. Um nodo pode se encontrar neste estado por apresentar um dos seguintes problemas:

- Completa exaustão de suas baterias.
- Seu enlace ficar inoperante por um longo tempo de forma a não permitir sua comunicação com o coordenador ou com algum vizinho cooperante.

Importante ressaltar que um nodo só fica no estado inoperante se a falha for de longa duração, já que, falhas de enlace transientes são resolvidas pelos algoritmos do **NetCOMeR**.

Já o conjunto dos nodos **Prováveis cooperantes** pode ou não existir, dependendo da estratégia utilizada e/ou dos algoritmos implementados. A ideia é que, dependendo da abordagem utilizada, possa-se fazer uma pré-seleção entre os nodos operantes de forma a selecionar um sub-conjunto de nodos aptos a colaborarem (ex. nodos com mais energia ou mais vizinhança).

As falhas nos enlaces ou nos nodos provocam a migração de nodos entre os diversos conjuntos de estados. A seguir são elencados os motivos da migrações, de acordo com a numeração das setas apresentada na Figura 14a):

1. A **entrada** de um nodo no conjunto de **Operantes** se dá na fase de implantação da rede, onde o nodo ganha um compartimento próprio para sua comunicação periódica com o coordenador. A

saída (entrada no grupo **Inoperante**) ocorre por exaustão da energia das baterias ou por longa interrupção nos enlaces deste nodo.

2. A **entrada** de um nodo do conjunto **Prováveis cooperantes** dependerá de um algoritmo que faça uma pré-seleção de nodos apontando os que vêm recentemente apresentando melhores condições em critérios, definidos na Seção 5.2.1, para se tornarem **Cooperantes**. A **saída** se dá pelo motivo contrário, ou seja, nodos que vem degradando seus pesos nos critérios.
3. O número mínimo de cooperantes pode ser dinamicamente fixado, dependendo da estratégia utilizada. A **entrada** de um nodo no conjunto de **Cooperantes** pode se dar pela saída de algum nodo desse conjunto, ou pela necessidade de aumentar o número de componentes desse conjunto. A **saída** pode ocorrer pela degradação nos pesos dos critérios ou pela melhoria nas condições da rede, minimizando a necessidade de nodos cooperantes.
4. Esse tipo de migração ocorre por exaustão da energia das baterias ou por longa interrupção nos enlaces deste nodo.

4.2.2 Arquitetura funcional

Na Figura 14b) observa-se que o modelo apresenta três conjuntos distintos de nodos: *i*) operantes, *ii*) cooperantes e o *iii*) coordenador.

Os nodos **operantes** têm como única função a transmissão de seus dados, coletados por seus sensores, ao coordenador.

Os nodos do grupo **cooperantes**, além da transmissão de seus dados, devem cooperar com seus nodos vizinhos, ouvindo suas mensagens e codificar esse conjunto de mensagens, fazendo a operação de multiplicação de cada uma delas com o respectivo coeficiente pertencente ao corpo. Para finalizar, no processo de cooperação, deve enviar a mensagem codificada.

Já o **coordenador** deve, baseado nas condições da rede, determinar quantos e quais cooperantes são necessários ao bom funcionamento da rede, encaminhar um mensagem aos nodos selecionados e, com o conjunto de mensagens transmitidas e codificadas, deve realizar o processo de decodificação, objetivando obter a integralidade dos dados coletados pelos nodos sensores.

4.2.3 Arquitetura de comunicação

Na topologia estrela, durante a formação e manutenção do agrupamento (*cluster*) IEEE 802.15.4 será considerado um conjunto de nodos sensores dentro da área de cobertura de um único nodo, denominado coordenador PAN. Este define a estrutura do superquadro através dos parâmetros BO, SO e, conseqüentemente, define o SD, segundo a equação 2.2 (Capítulo 2).

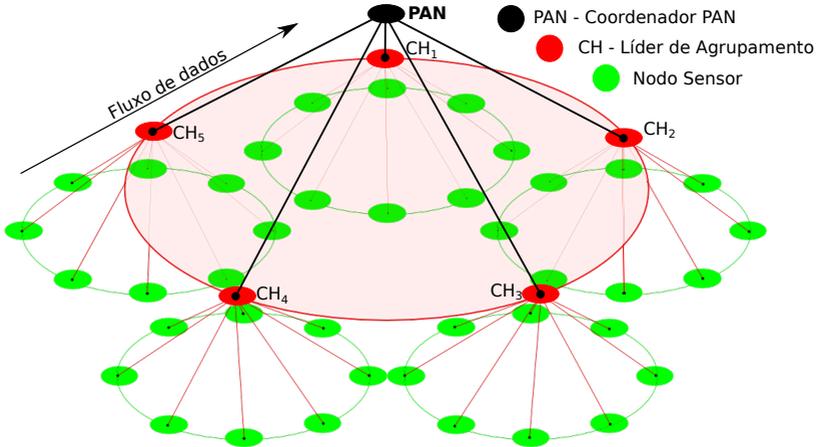
Cada nodo, do conjunto total dos presentes na rede, Figura 14c), faz periodicamente uma coleta da grandeza física por ele sensoreada e encaminha o respectivo valor da variável ao coordenador PAN, por meio de uma mensagem de **Transmissão**.

Cada dado contido em uma mensagem terá mais de uma chance para chegar ao destino (coordenador PAN), na **transmissão** ou **cooperação**, Figura 14c) direita. Sendo que a mensagem de **cooperação** poderá conter a mensagem do próprio nodo ou uma mensagem codificada. Essa mensagem codificada é, tipicamente, uma combinação linear da mensagem do nodo, combinada com as mensagens ouvidas de seus vizinhos \mathbf{x}_k (Equação 2.3 – Capítulo 2). Cabe salientar que a limitação em duas chances representada na Figura 14 é por mera questão de representação gráfica, pois o modelo não limita o número máximo de tentativas de retransmissão.

Dada a grande dimensão espacial de uma planta industrial, ou a necessidade de segmentação da rede por questões de vizinhança ou similaridade comportamental, o modelo do sistema pode ser ampliado para uma topologia *cluster-tree*. Um exemplo é apresentado na Figura 15. Neste tipo de topologia podem existir, além do coordenador PAN e nodos sensores, os denominados líderes de agrupamento. Cada líder de agrupamento, por sua vez, é responsável por coletar dados sensoreados pelos nodos de seu agrupamento e repassar, na árvore, para outros líderes de agrupamento em direção ao Coordenador PAN.

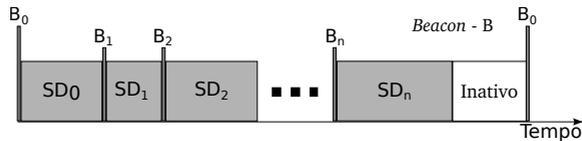
Neste modelo *cluster-tree*, cada estrela tem seu funcionamento temporal independente das demais, ou seja, cada estrela tem seu próprio superquadro (SD) como exemplificado na Figura 16. Os superquadros podem estar espalhados temporalmente, como sugere o trabalho Koubaa e Cunha (2007), ou em frequência (canais), a exemplo do sugerido no trabalho Toscano e Lo Bello (2011). Na topologia *cluster-tree* a comunicação por múltiplos saltos pode ser determinístico (HAN-ZALEK; JURCIK, 2010), já que cada nodo interage somente com seu pai ou seus filhos no *cluster* a que pertence. Como o tempo de comunicação dentro de cada estrela é conhecido, o tempo total para a

Figura 15: Diagrama esquemático no agrupamento em árvore.



Fonte: própria

Figura 16: Divisão de tempo no agrupamento em árvore.



Fonte: própria

mensagem alcançar o Coordenador PAN também o é, na ausência de erros. As regras de formação dos *clusters* em tempo de execução bem como de configuração dos superquadros, seja em distintos tempos ou canais, não estão no escopo deste trabalho de tese.

Quando comparado com o funcionamento da topologia estrela, a topologia *cluster-tree* se diferencia basicamente no que diz respeito ao funcionamento dos líderes de agrupamento que, em determinado superquadro assumem a função de coordenadores e em outro agrupam os dados recebidos dos nós de seu *cluster* e os encaminham ao coordenador PAN. Importante observar que cada CH (*cluster head*) precisa estar ativo durante os dois ou mais períodos de tempo relativos aos superquadros em que ele atua. Por exemplo, o CH_2 na Figura 15 pre-

cisa permanecer ativo durante o tempo SD_0 , onde ele atua como nodo sensor, e SD_2 quando ele atua como coordenador de seu agrupamento.

Na topologia *cluster-tree*, dentro de cada estrela e a seu tempo, um nodo sensor coleta seus dados, gera uma mensagem M_i e a transmite ao seu coordenador, um dos CH. Este recebe os dados de todos os nodos de seu *cluster*, os agrupa e, a seu tempo, encaminha ao coordenador PAN.

4.3 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Como o objetivo deste trabalho é o emprego das RSSF na planta industrial, são utilizadas métricas que demonstram o desempenho comparativo das técnicas de retransmissão de mensagens em redes empregadas neste tipo de ambiente. Em todas as análises, o foco de observação é a transmissão com sucesso de determinado dado. Posto de outra forma, não se está interessado no sucesso de transmissão de determinado nodo mas sim no sucesso de entrega ao destino final de um dado específico, independentemente do caminho ou do responsável pela entrega.

Uma métrica de desempenho que será adotada é a **taxa de sucesso** na transmissão de dados. Neste caso, o interesse está no percentual de dados gerados (coletados pelos nodos sensores) e que efetivamente atingem o destino. Esta taxa é diretamente afetada pela perda de pacotes que ocorrem devido a ruídos no meio. Quanto maior a taxa de sucesso apresentada por determinada técnica melhor ela é nesta métrica.

Outra métrica fundamental em redes industriais é o **atraso** (*delay*) no recebimento de mensagens. Como todas as propostas implementadas nessa tese são compartimentadas, por facilidade de comparação, a apresentação do atraso para a topologia estrela será dada em número de compartimentos. Número de compartimentos pode ser facilmente convertido para tempo dado que, em cada implementação, conhece-se o tempo de um compartimento. O cálculo do atraso leva em consideração a diferença, em quantidade de compartimentos, desde a ocorrência do compartimento escalonado para determinado nodo até o efetivo recebimento pelo coordenador PAN. Por exemplo, se a determinado nodo foi atribuído o compartimento de número 3 e o coordenador PAN recebeu no mesmo compartimento, o atraso será considerado 0 (zero); por outro lado se o coordenador recebeu tal dado no compartimento 7 (após a retransmissão) o atraso será considerado 4. Se o coordenador PAN não receber tal dado, o atraso será desprezado (zero) e esta perda será

contabilizada na taxa de sucesso, já que o dado foi efetivamente perdido. Salientando que no próximo superquadro o nodo enviará um novo dado e os antigos serão descartados por perda de validade (assume-se que cada mensagem possui um *deadline* firme no final do seu superquadro). Quanto menor o atraso e sua variação (*jitter* de atraso), melhor será a avaliação da técnica segundo esta métrica.

Uma terceira métrica de desempenho a ser considerada nas avaliações é a do **uso do meio**. Este parâmetro avalia quantos compartimentos são necessários, na transmissão e retransmissão, para o atendimento de determinado número de nodos sensores. Este parâmetro é importante em ambientes industriais, já que na indústria normalmente existem diversas redes, eventualmente, de diferentes tipos, e os canais acabam se sobrepondo. Quanto menor o uso do canal por determinada rede, mais livre estará para as demais redes, minimizando o conflito em seu acesso.

Finalmente, o **consumo energético** dos nodos também será avaliado. O consumo energético é dado pela quantidade de energia gasta por nodo para realizar determinada tarefa. Nesse trabalho de tese basicamente se considera a quantidade de energia gasta desde a coleta da grandeza monitorada, processamento, transmissão e perfeito recebimento (do dado equivalente a grandeza) pelo coordenador. Aqui o objetivo é o levantamento do consumo energético de um determinado nodo submetido a determinada técnica de retransmissão. O consumo energético é um fator preponderante nas RSSF, principalmente nas que implantam seus nodos aleatoriamente em ambientes de difícil acesso e, portanto, a exaustão da energia de um nodo significa sua perda. Em uma rede industrial nem sempre isso é verdade, já que os nodos são usualmente implantados de maneira controlada e devidamente posicionados para exercerem sua função. No entanto, observa-se que a substituição de baterias é uma tarefa custosa e que pode exigir a interrupção no funcionamento de determinada máquina/sistema, levando, assim, à necessidade de maximização no intervalo entre substituições. Quanto menor for o consumo energético do nodo, melhor será a avaliação de determinada técnica segundo esta métrica de desempenho. Para efeitos comparativos, o consumo energético pode também ser mensurado de forma cumulativa, ou seja, o consumo energético de todos os nodos de determinado agrupamento, operando sob determinada técnica.

4.4 TÉCNICAS TOLERANTES A PERDA DE MENSAGENS

A seguir são descritas técnicas que podem ser usadas para aumentar a confiabilidade da comunicação, voltadas para retransmissão de mensagens enviadas. As técnicas descritas são simples, porém efetivas, e se constituem em adaptações ou releituras de propostas já utilizadas pela comunidade científica. O principal objetivo desta descrição é devido ao fato que elas servem como base de comparação com a proposta principal dessa tese – NetCOMeR. Além disso, o próprio estudo dessas técnicas servem de subsídio para o desenvolvimento do NetCOMeR.

As premissas para a concepção das técnicas foram as seguintes:

- A aplicação alvo é voltada para cenários industriais em chão de fábrica, em especial, monitoramento e controle de ambiente industrial.
- Cada nodo da aplicação transmite periodicamente dados (ex. valores de sensores) para uma entidade central (ex. um controlador) e, considerando os requisitos de confiabilidade apresentados na Tabela 1 (Capítulo 2), é altamente desejável que não haja colisões das mensagens durante a disputa pelo meio.
- Como essas técnicas são empregadas para comparação de desempenho, em todas elas será considerada a possibilidade de uma, e somente uma, transmissão de dados por um determinado nodo e uma, e somente uma, retransmissão de dados por um determinado nodo.

Todas as técnicas descritas têm como base uma topologia estrela onde um coordenador recebe dados enviados pelos nodos, utilizando técnicas que buscam melhorar a confiabilidade no recebimento das mensagens. Parte-se do pressuposto que a determinação da ordem das mensagens em cada compartimento (escalonamento) é realizado *a priori* e que as trocas de mensagens, em todas as técnicas, ocorrem dentro de um macrociclo, o qual corresponde a um superquadro em redes IEEE 802.15.4.

Define-se, neste trabalho, “dados efetivos” como sendo o efetivo recebimento pelo coordenador de alguma informação coletada por um nodo sensor. Por outro lado, define-se como “mensagem de controle” aquelas necessárias à coordenação da rede em benefício de seu próprio funcionamento, por exemplo, uma mensagem de reconhecimento.

Ao longo deste texto será definido que um “dado original” (men-

sagem original), ou pacote de dados, ou simplesmente “dado” (mensagem), será todo o dado transmitido na primeira tentativa em uma mensagem, e “dado retransmitido” (mensagem retransmitida), ou pacote de paridade ou de cooperação, será todo e qualquer dado que chegou ao destino numa segunda tentativa de transmissão, caso a primeira tentativa não tenha tido êxito.

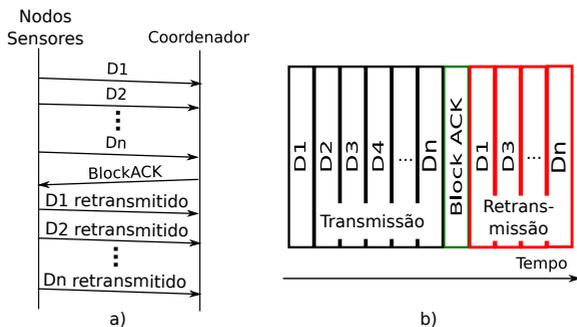
4.4.1 BlockACK

A técnica BlockACK tem como base a técnica TDMA, onde cada nodo dispõe de um compartimento exclusivo para a transmissão de seus dados e permite a retransmissão em uma segunda chance, desde que solicitado pelo Coordenador PAN através de uma mensagem coletiva de confirmação, denominado BlockACK, encaminhada a todos os nodos sensores.

A ideia da mensagem de confirmação BlockACK foi baseada na ideia apresentada no padrão IEEE 802.15.4e, o qual definiu o mecanismo *Block Acknowledgment* (BA). Um BA é uma mensagem composta por um mapa de bits, permitindo que diversas mensagens de reconhecimento sejam reunidas em apenas uma mensagem, evitando-se o envio de ACKs individuais.

Segundo a técnica BlockACK, cada superquadro é dividido em compartimentos, e cada nodo tem seu próprio compartimento para enviar dados ao coordenador. Cada nodo pode também reenviar seus dados em uma segunda chance, também num compartimento específico, desde que solicitado pelo coordenador. Esta solicitação é feita em bloco, ou seja, após o período de tempo destinado a todos os nodos transmitirem seus dados, o coordenador avalia se houve alguma perda de mensagem. Havendo perda, o coordenador requisita o reenvio a cada um dos respectivos nodos, por meio de uma única mensagem, denominada BlockACK. Esta mensagem conterá, além do cabeçalho, uma sequência de *bits* sendo um *bit* para cada nodo sensor. A sequência de ordenamento dos *bits* segue a mesma sequência de ocupação dos compartimentos, permitindo que cada nodo consiga extrair seu próprio *bit*. Este bit informará se a mensagem do respectivo nodo foi devidamente recebida ou não; por exemplo, 1 \equiv recebida/ACK, 0 \equiv não recebida/NACK. Caso o nodo receba um NACK, ele retransmitirá sua mensagem no seu respectivo compartimento de retransmissão. A posição do seu compartimento é obtida pela contabilização de todos os NACKs contidos no BlockACK.

Figura 17: Técnica BlockACK: a) diagrama de mensagens b) compartimentos de tempo no macrociclo.



Fonte: própria

O uso do BlockACK pode trazer algumas vantagens à rede. Primeiro, um menor consumo energético e menor ocupação do meio quando comparado com o envio de ACK individual. Já na mensagem BlockACK todo o conjunto de ACKs individuais será substituído por uma única mensagem. Além disso, o uso do BlockACK proporciona uma maior diversidade temporal, já que, vai espaçar no tempo as mensagens de envio, reconhecimento e reenvio de dados, o que pode ser salutar para ambientes industriais dado o tipo de ruído presente. Por outro lado, o uso do BlockACK provoca um acréscimo no atraso médio.

Na Figura 17 apresenta-se um diagrama resumido da troca de mensagens nesta técnica e o modo de ocupação do meio com seus compartimentos de tempo. Nos diagramas pode-se observar o tempo destinado ao envio de dados em primeira ou segunda chance, além das mensagens de controle da rede.

A segunda chance será usada para reenvio de mensagens dos nodos que receberam um NACK. Cada nodo, com a recepção do BlockACK e baseado em sua posição no macrociclo, saberá em qual compartimento deve retransmitir. Quando não houver perdas, o superquadro conterá tantos compartimentos quantos nodos existirem, mais um. No pior caso, onde o coordenador não recebeu nenhuma mensagem, o período de segunda chance é igual ao período TDMA e, portanto, o superquadro terá o dobro do número de compartimentos mais um.

Nesta técnica, conhecendo o tempo do compartimento onde deverá transmitir e do BlockACK, cada nodo deverá permanecer ativo durante estes períodos mais o período para retransmissão, se for o caso.

O restante do tempo o nodo poderá permanecer inativo, economizando energia.

4.4.2 Mestre/Escravo

A técnica **Mestre/Escravo** é bastante utilizada em redes de controle cabeadas e também em redes sem fio (KUNERT; UHLEMANN; JONSSON, 2010). A ideia básica é que um nodo coordenador (mestre) faça requisições de informação a nodos coletores (escravos) e estes respondam imediatamente com seus dados coletados.

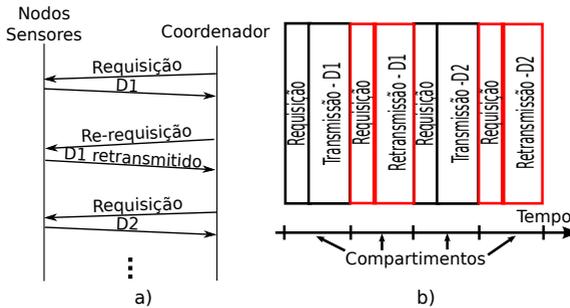
Na proposta **mestre/escravo**, Figura 18, o coordenador faz requisições de dados (*poling*) explícitas aos nodos por meio do seu endereço. Após a requisição, o nodo escravo envia uma mensagem contendo seus dados. Caso o coordenador não receba a mensagem, devido à perda de sua solicitação ou perda da resposta, o coordenador pode requisitar imediatamente a retransmissão da mesma. Cabe destacar que esta abordagem pode ser interessante para determinadas aplicações industriais, como por exemplo NCS, onde as mensagens devem ser periódicas e o atraso no recebimento correto das mesmas pode significar degradação no mecanismo de controle (BAILLIEUL; ANTSAKLIS, 2007). Por outro lado, esta técnica sofre com a baixa diversidade temporal. Ou seja, caso haja uma requisição e uma perda, a nova requisição ocorrerá logo em seguida, podendo incorrer em novo erro. Este fenômeno pode acarretar um desempenho inaceitável em ambientes com erros em rajadas.

Um outro problema desta técnica é que os nodos sensores devem permanecer ativos todo o tempo, já que o coordenador pode fazer uma requisição de dados a qualquer momento, sem conhecimento prévio por parte dos nodos escravos. Isto leva a um consumo energético bastante considerável.

4.4.3 TDMA Redundante

A técnica **TDMA Redundante** é a mais simples e de mais fácil implementação. Nesta técnica simplesmente existem dois ciclos TDMA iguais. No primeiro, o nodo transmite sua mensagem e, no segundo, a retransmite. A retransmissão é sempre feita, independentemente do recebimento correto, ou não, por parte do coordenador, já na primeira tentativa de transmissão da mensagem.

Figura 18: Técnica Mestre/Escravo: a) diagrama de mensagens b) compartimentos de tempo no macrociclo.



Fonte: própria

Na Figura 19 pode-se observar que o macrociclo é dividido em dois conjuntos TDMA iguais, onde cada nodo tem seu próprio compartimento em cada um dos blocos TDMA. Não há confirmação de recebimento de mensagens, ou seja, o coordenador não encaminha nenhuma mensagem de confirmação.

Uma vantagem desta técnica é que os nodos precisam permanecer ativos somente durante seus compartimentos de tempo. Além disso, esta técnica apresenta diversidade temporal. Por outro lado, esta é a técnica que sistematicamente tem a maior ocupação do meio, já que reencaminha todas as mensagens, mesmo aquelas que não sejam necessárias.

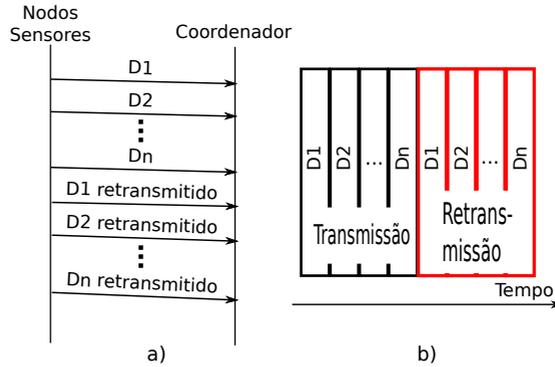
4.4.4 Discussão comparativa entre as técnicas

Todas as técnicas de retransmissão de mensagens até então apresentadas têm em comum o fato de serem técnicas baseadas em outras bem conhecidas na literatura. Essas técnicas podem ser empregadas em qualquer tipo de rede e, mais especificamente, podem ser empregadas no ambiente industrial, no sentido de dar maior confiabilidade na transferência de mensagens.

As características esperadas dessas técnicas, segundo as métricas de desempenho propostas neste trabalho, podem ser resumidas conforme apresentado na Tabela 6.

Nenhuma das técnicas apresenta diversidade espacial, já que

Figura 19: Técnica TDMA Redundante: a) diagrama de mensagens b) compartimentos de tempo no macrociclo.



Fonte: própria

Tabela 6: Resumo comparativo entre as técnicas.

	Diversidade temporal	Diversidade espacial	Uso do meio	Consumo energético	Atraso
BlocACK	razoável	não	baixo	baixo	baixo
Mestre/Escravo	baixa	não	baixo	razoável	muito baixo
TDMA Redundante	alta	não	alto	baixo	alto

Fonte: própria

não fazem uso de cooperação e os nodos das RSSF não têm antenas do tipo MIMO. Todas apresentam uma maior diversidade temporal, quando comparadas com técnicas básicas do tipo ARQ. O baixo consumo energético esperado deve-se principalmente ao fato de todas as técnicas apresentarem o tempo compartimentado, o que quase sempre permite o conhecimento em avanço dos tempos exatos para ligar e desligar o rádio.

Analisando a tabela percebe-se que, aparentemente, o **BlocACK** é o mais vantajoso. Contudo a análise experimental vista no Capítulo 6 apresentou resultados que contradizem parcialmente essa constatação inicial, principalmente em situações com altas taxas de erros (altos valores de PER). Naquele capítulo são aprofundadas as análises que justificam esta aparente contradição. O conjunto das análises permitiu auferir os pontos fracos dessas abordagens e propor meios de superá-las através da proposta **NetCOMeR**.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram delineados conceitos necessários para dar sustentação à proposta de tese. Foram apresentados o modelo de sistema, as métricas de desempenho adotados por esse trabalho e algumas técnicas básicas de retransmissão de mensagens para aumentar a confiabilidade de redes industriais. As análises preliminares serviram para delimitar o escopo do trabalho, assim como para avaliar o desempenho do protocolo proposto – **NetCOMeR** – por comparação com as técnicas aqui apresentadas.

O **NetCOMeR** está descrito em detalhes no próximo capítulo, assim como um modelo que permite a implementação das propostas de retransmissão de mensagens com tempo compartimentado em redes IEEE 802.15.4, denominado 3C.

5 NETCOMER – NETWORK CODING IN OPPORTUNISTIC MESSAGE RETRANSMISSION

Esse capítulo busca propor soluções para aumentar a confiabilidade na comunicação industrial, aumentando a tolerância a perda de mensagens e permitindo que vários nodos tenham acesso sem contenção ao meio.

Inicialmente, é introduzido neste capítulo o NetCOMeR – uma proposta de **retransmissão oportunista de mensagens que faz uso de técnica de codificação de rede e diversidade temporal aplicada a RSSF em ambientes industriais**. Na sequência do capítulo é feita uma proposta de criação de uma nova classe de serviços para o padrão IEEE 802.15.4 no modo com *beacon*. Mantendo a compatibilidade com sistemas legados, propõe-se a alocação de um período extra que comporta, entre outras possibilidades, a criação de uma nova classe de nodos com garantias temporais, possibilitando a implementação de mecanismos para aumentar a confiabilidade da comunicação em redes sem fio industriais.

5.1 NETCOMER

Esta proposta surgiu com base na análise e apropriação dos aspectos positivos e eliminação dos negativos das propostas apresentadas na seção anterior e dos estudos realizados apresentados nos Capítulos 2 e 3. Em resumo, esta proposta apresenta uma série de inovações nos seguintes aspectos:

- i) Modelo de aplicação da codificação de rede voltado para aumento da confiabilidade na transmissão de mensagens.
- ii) Aplicação da codificação de rede em RSSF e mais especificamente no padrão IEEE 802.15.4.
- iii) Adaptação da teoria de codificação de rede dinâmica com a minimização no atraso das mensagens e (XIAO; SKOGLUND, 2009; REBELATTO, 2010).
- iv) Proposta de modelo diferenciado na aplicação da codificação de rede, no sentido de reduzir o consumo energético devido a constante escuta do meio por parte dos nodos.
- v) Proposta para redução do *overhead* na transmissão dos coeficientes, quando comparado ao método tradicional da codificação de rede.
- vi) Proposta de técnica cooperativa com diversidade temporal e es-

pacial.

- vii) Proposta de um algoritmo oportunista de seleção de nodos cooperantes, baseado na necessidade e disponibilidade, objetivando a maior probabilidade de sucesso na cooperação e atingindo uma maior confiabilidade na rede com baixo uso do meio e baixo consumo energético.

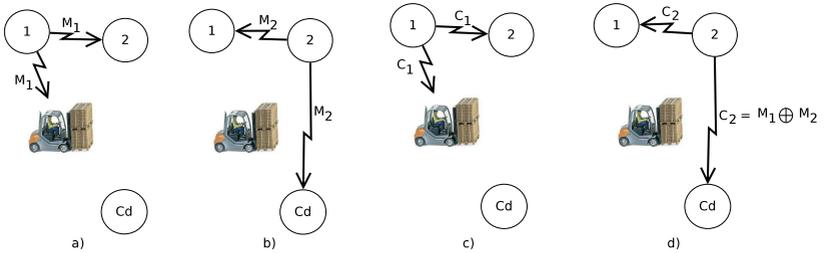
A proposta é baseada na técnica `BlockACK` com a correção de seus aspectos negativos. Em primeiro lugar, o objetivo é que a retransmissão de mensagens seja feita por nodos que historicamente tenham demonstrado maior confiabilidade e que cooperarão com nodos com dificuldades na transmissão de mensagens, ou seja, aumentando a diversidade espacial do sistema. Segundo, também há um acréscimo indireto na diversidade temporal, já que uma determinada mensagem de um nodo poderá ser escutada por outro nodo e posteriormente retransmitida, embutida numa mensagem codificada. Por último, um problema inerente à técnica original é que a perda da mensagem `BlockACK` representa uma grave falha. Isso decorre do fato que a perda dessa mensagem implica na ausência de retransmissão por parte de todos os nodos que tiveram insucesso na primeira tentativa. Nessa proposta, repete-se o conteúdo da mensagem de solicitação do coordenador (denominada *BloCop*) várias vezes, dando oportunidade a todos os nodos de ouvi-la, incrementando a diversidade temporal da mesma.

5.1.1 Problema motivador

A Figura 20 apresenta um cenário simples de comunicação em que é salientado o aspecto positivo de uma proposta com retransmissão de mensagens com modelo de cooperação e codificação. Em *a*) observa-se o caso de um nodo com problemas em obter sucesso em sua transmissão ao nodo coordenador (Cd), numa situação deste tipo e utilizando o tradicional mecanismo ARQ, o nodo continuaria sem obter sucesso e ficaria incomunicante com o coordenador enquanto o enlace direto permanecer inoperante. Por outro lado, fazendo-se uso das técnicas de cooperação e codificação, pode-se observar a seguinte sequência de eventos da Figura 20, Capítulo 1:

- a) O nodo 1 transmite sua mensagem que é recebida somente pelo nodo 2 que a armazena. O nodo coordenador não consegue recebê-la devido à presença do obstáculo.
- b) O nodo 2 transmite sua mensagem a qual é recebida normalmente pelo coordenador e pelo nodo 1, que a armazena.

Figura 20: Sequência de troca de mensagens na proposta NetCOMeR.



Fonte: própria

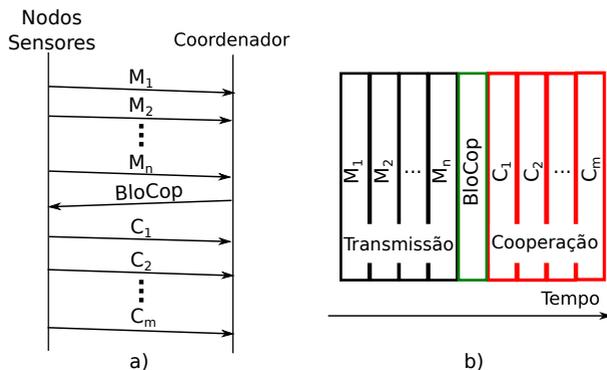
- c) O nó 1 transmite sua mensagem de cooperação (C_1) que é recebida somente pelo nó 2 que a descarta.
- d) O nó 2 codifica as mensagens que têm armazenadas, no caso M_1 e M_2 , e envia a mensagem codificada (C_1) ao Cd. Este, de posse das duas mensagens recebidas, M_2 e C_2 , consegue obter as duas mensagens originais M_1 e M_2 , após o processo de decodificação.

Um aspecto a ser salientado é que, conforme visto na Seção 2.1.1, a comunicação consome a maior parte da energia dos nodos. Os protocolos MAC tentam otimizar o tempo de operação do rádio, desligando o mesmo sempre que possível. Por outro lado, a codificação de rede tradicional, como exemplificado, não admite este comportamento, já que depende da cooperação e, conseqüentemente, da necessidade de escutar toda vizinhança constantemente. Na proposta NetCOMeR limita-se o número de nodos cooperantes e que precisarão ouvir o meio constantemente a fim de realizar a codificação e retransmissão.

Na Figura 21 apresenta-se um diagrama resumido da troca de mensagens nesta técnica e o modo de ocupação do meio com seus compartimentos de tempo. Deve-se observar a semelhança com a técnica BloCACK, com as diferenças que, neste caso, a mensagem BloCOP apresenta diversidade temporal, dada a sua repetição (detalhes a seguir), e as mensagens de retransmissão são ocupados por mensagens codificadas.

Na codificação de rede tradicional, todos os nodos constantemente ouvem o meio, capturam mensagens, codificam e as reencaaminham. Por outro lado, nesta proposta, o algoritmo do NetCOMeR controla dinamicamente o número de nodos no modo audição e que codificarão as mensagens, objetivando idealmente obter a exata quan-

Figura 21: Técnica NetCOMeR: a) diagrama de mensagens b) compartimentos de tempo no macro-ciclo.



Fonte: própria

tidade de mensagens codificadas e retransmitidas para se obter 100% na taxa de sucesso. Como decorrência imediata desta limitação, advém a economia de energia, menos mensagens retransmitidas, bem como a diminuição na ocupação do meio.

5.2 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO NETCOMER

A seguir é detalhada a proposta do NetCOMeR, iniciando com o mecanismo de tomada de decisão para duas escolhas importantes e que definem o funcionamento do mesmo.

A primeira decisão a ser tomada é com relação ao número de cooperantes. A ideia é que este número seja diretamente proporcional ao nível de perda de mensagens no micro-ciclo de transmissão: quanto maiores as perdas, maior a quantidade de mensagens de retransmissão. Ademais, considerando o algoritmo de codificação de rede, por definição, o número de mensagens deve ser igual ou maior ao número de incógnitas no sistema linear a ser resolvido. Portanto, nessa proposta, o número de nodos cooperantes deve ser no mínimo igual ao número de mensagens perdidas no ciclo de transmissão.

Outra decisão importante, uma vez conhecido o número de cooperantes, é saber quais serão os nodos cooperantes. Por exemplo, no caso da Figura 20 se fosse escolhido o nodo 1, não haveria sucesso na

transmissão da M_1 . Como proposta para atender esta decisão, optou-se pelos melhores históricos de sucesso na transmissão de mensagens e na qualidade do enlace entre o respectivo nodo e o coordenador. Maiores detalhes são fornecidos a seguir.

5.2.1 Algoritmo dos nodos

A ideia base para o cálculo do número de cooperantes é levar em consideração o histórico de perdas na rede. Contudo, o total de perdas pode apresentar grandes variações ao longo do tempo, o que pode levar a uma grande flutuação no número de nodos cooperantes. Neste sentido, uma média exponencialmente ponderada, semelhante ao algoritmo de Jacobson, do TCP (KUROSE; ROSS, 2014), que tem por objetivo manter uma ponderação entre o histórico das perdas bem como a atual parcela de perdas, foi adotado. A ponderação entre “passado” e “presente” neste algoritmo é obtida pela alteração dos parâmetros α e β . Quanto menor estes valores maior o peso da amostra atual e quanto maior, maior a importância do valor adotado no passado.

Portanto, a **quantidade de nodos cooperantes** é calculada pelo produto da média exponencialmente ponderada e um ganho, que se faz necessário para ajustes a cada caso. Leva-se em consideração a estimativa de perdas ($EstLoss$) e seu desvio padrão ($DevLoss$), calculado a cada ciclo:

$$NCoop = \lceil G \times EstLoss + DevLoss \rceil \quad (5.1)$$

onde:

- G = ganho da função (através de ensaios preliminares determinou-se que $G = 2$)
- $EstLoss = (1 - \alpha) \times EstLoss + \alpha \times SamLoss$, sendo $SamLoss$ a atual amostra de perdas que é a diferença entre o número total de mensagens esperadas e o número de mensagens efetivamente recebida;
- $DevLoss = (1 - \beta) \times DevLoss + \beta \times |SamLoss - EstLoss|$;
- $\alpha = \beta$ o valor ajustado para obter o desempenho desejado, isto é, o maior peso é colocado sobre os dados mais atuais (usualmente, $\alpha = \beta = 0, 2$).

Para a **seleção de quais nodos devem cooperar** foram considerados nodos que tiveram um bom histórico de sucesso nas transmissões juntamente com o LQI que define a qualidade do enlace entre

Tabela 7: Regra de formação do conteúdo da mensagem **BlóCop**.

EN_1	EN_2	...	EN_n	$Cont$	EN_1	EN_2	...	EN_m
--------	--------	-----	--------	--------	--------	--------	-----	--------

Fonte: própria

o nodo e o coordenador:

$$CN_i = \frac{SR_i + LQI_i}{2} \quad (5.2)$$

onde:

- índice i representa cada nodo da rede, $1 \leq i \leq n$,
- $SR = (1 - \alpha) \times SR + \alpha \times SampleSR$, isto é, o índice histórico da taxa de sucesso nas transmissões recentes e
- *link quality indicator* (LQI) entre o nodo e o coordenador, medido no coordenador.

Os nodos que apresentarem maior CN serão aqueles escolhidos para a cooperação.

Para aumentar a diversidade temporal da mensagem **BlóCop** e permitir a sua repetição sem prejuízo ao mecanismo proposto, a listagem da seleção do nodos cooperantes contém a listagem dos nodos atualmente em cooperação bem como os que futuramente irão cooperar. Essa abordagem permite que alguns nodos possam perder eventualmente uma mensagem de **BlóCop** sem prejuízo da confiabilidade da abordagem. Sem perda de generalidade, o número de repetições de mensagens de **BlóCop** é assumido como 4 nessa tese.

A Tabela 7 apresenta a regra de formação do conteúdo do **BlóCop**. Primeiramente são listados os endereços dos nodos (EN) que atualmente estão em fase de cooperação, neste caso n nodos, sendo n obtido pela Equação 5.1, ou seja, $n = NCoop$. Em seguida é inserido o valor de um contador decrescente, relativo à diversidade temporal. Se este valor for 4, significa que dentro de 4 ciclos m novos nodos cooperantes serão convocados (EN_1 a EN_m). Repete-se este comportamento para o contador contendo os valores 3, 2 e 1. Caso não haja necessidade de mudança dos cooperantes basta manter este valor em 4. Quando este valor chegar a zero a mensagem **BlóCop** é modificada e os então futuros cooperantes passam a ser os atuais cooperantes e novos futuros cooperantes são escolhidos.

Esta redundância do **BlóCop** incrementa a diversidade temporal e habilita os nodos a tomarem conhecimento antecipadamente de

que serão cooperantes. A redundância também permite a mudança na quantidade de nodos cooperantes sempre que necessário, ou seja, m pode ser diferente de n sempre que o coordenador detectar alguma mudança no comportamento da rede.

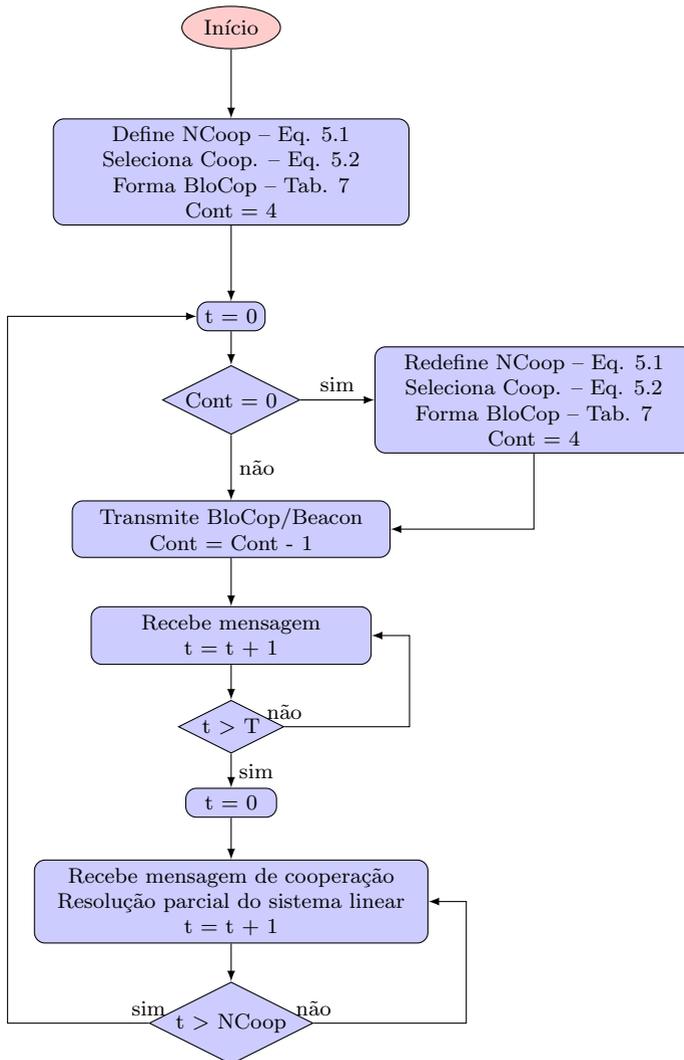
Deve-se atentar para o fato que este mecanismo da diversidade temporal reduz o poder de reatividade da rede. Ou seja, caso as mudanças na qualidade dos enlaces sofram alterações bruscas, o sistema demorará pelo menos 4 ciclos (BI) para reagir. Considerando os tempos de BI do IEEE 802.15.4, o tempo de reação às possíveis mudanças no comportamento da rede varia, com a variação de BI, entre aproximadamente 60 ms e 16 s, ou seja, quatro vezes os tempos de BI apresentados na Tabela 3 (Capítulo 2).

Importante observar que o **BlOCop** pode ser uma mensagem enviada separadamente, ou seja, uma mensagem somente para informar os nodos cooperantes ou, o conteúdo do **BlOCop** pode ser embutido no *beacon payload*. As duas hipóteses foram utilizadas, a primeira nos ensaios experimentais e a segunda nas simulações que são apresentadas no Capítulo 7.

Nas Figuras 22 e 23 apresentam-se, respectivamente, os fluxogramas de funcionamento do nodo coordenador e dos nodos sensores. Na Figura 22 representa-se o início de um ciclo de transmissão, onde tradicionalmente é transmitida a mensagem de *beacon*. Adicionalmente, no mecanismo **NetCOMeR** também é transmitida uma mensagem especial, denominada **BlOCop**, cujo conteúdo pode ser enviado juntamente com a mensagem de *beacon*. É importante ressaltar que, dada a diversidade temporal do **BlOCop**, a cada $Cont$ intervalos entre *beacons*, o nodo coordenador redefine o número de nodos cooperantes (N_{Coop}) - Equação 5.1, selecionará os cooperantes por meio da equação 5.2 e montará a mensagem **BlOCop** (tabela 7), além de ser definido o valor de T , que é o número total de compartimentos no período de transmissão. Portanto, cada período será composto por T compartimentos de transmissão mais N_{Coop} compartimentos de retransmissão. Com isso, o nodo coordenador inicialmente aguarda pelas transmissões das T mensagens de transmissão e, posteriormente, fica à espera do recebimento de mensagens codificadas de retransmissão em cada um dos N_{Coop} compartimentos de retransmissão, novamente controlados pela variável auxiliar t , e imediatamente vai extraindo mensagens incógnitas, se possível, o sistema linear e extraindo possíveis mensagens. Ao término do período de cooperação, reinicia o processo.

Os nodos sensores ao se ligarem na rede ficarão à espera do recebimento das mensagens de *beacon* e **BlOCop** (Figura 23). Portanto,

Figura 22: Fluxograma do coordenador.



Fonte: própria

no início de cada intervalo de **beacon**, o nodo coordenador informará o número total de compartimentos no período de transmissão (T), o número de nodos cooperantes ($NCoop$) e determinará quais serão os nodos cooperantes. Caso o nodo não pertença ao conjunto de cooperantes, este aguardará e realizará sua tentativa de transmissão no seu respectivo compartimento. Por outro lado, caso o nodo tenha sido definido como cooperante na mensagem de **BlOCop**, este passará a ouvir e armazenar todas as mensagens que são enviadas por todos os nodos durante cada um dos T compartimentos. Após o término dos T compartimentos, o nodo cooperante codificará a mensagens do *buffer* e aguardará o seu respectivo compartimento para efetuar a retransmissão da sua mensagem. Um novo ciclo inicia-se com o recebimento das próximas mensagens de **beacon** e **BlOCop**.

Importante destacar que os momentos em que os nodos operantes dormem não aparecem explicitamente nos algoritmos das Figuras 22 e 23. Assume-se que um nodo que não esteja executando uma das atividades do algoritmo irá dormir para reduzir seu consumo energético. Por exemplo, na Figura 23, um nodo não cooperante irá dormir aguardando o seu compartimento exclusivo para sua transmissão e, após a sua transmissão, o nodo irá dormir novamente aguardando o tempo do próximo **BlOCop**.

5.3 VIABILIDADE DO NETCOMER

A codificação de rede tradicional apresenta como principal vantagem uma maior taxa efetiva na transferência de dados. Por outro lado, apresenta intrinsecamente alguns limitantes que devem ser cuidadosamente estudados em cada aplicação: *i) overhead ii) overhear e iii) overload.*

O *overhead* advém da necessidade de envio dos coeficientes utilizados na codificação adicionados na mensagem. O *overhear* está relacionado com a necessidade de ouvir constantemente o meio para capturar as mensagens a serem codificadas. Em redes IEEE 802.15.4 isto deve ser cuidadosamente tratado, para não exaurir rapidamente a energia dos nodos que compõem a rede. Finalmente, o *overload* advém da necessidade computacional para codificar e decodificar as mensagens.

5.3.1 Discussões sobre o *overhead* nas mensagens codificadas

Na codificação de rede tradicional existe um *overhead* decorrente do fato que toda mensagem codificada é acrescida de cada um dos coeficientes utilizados para codificar cada uma das mensagens originais. Na presente proposta o *overhead* ocorre somente nas mensagens de retransmissão e é inerente a técnica. Se considerarmos que uma única mensagem contém um conjunto de mensagens originais mais os coeficientes, essa mensagem tende a ter um tamanho menor que o agrupamento das mensagens codificadas. Cabe salientar que, no esquema proposto, caso não haja perda de mensagens, não haverá codificação e retransmissão de mensagens, portanto não haverá *overhead*.

Outro detalhe a salientar é que o *overhead* nas mensagens codificadas é dependente de duas variáveis: *i*) do tamanho do corpo utilizado na codificação, que determina o tamanho do coeficiente e *ii*) da quantidade de mensagens codificadas. Quanto maior o número de mensagens codificadas maior será o número de coeficientes distintos necessários na codificação, e consequentemente maior será o tamanho da mensagem dedicada à sua transmissão.

No NetCOMeR, parte-se do pressuposto que os nodos integrantes conhecem qual é a posição de seu compartimento dedicado e a posição da mensagem BloCop. Ademais, optou-se pela fixação do tamanho do corpo em \mathbb{F}_{2^8} , para atender grande quantidade de nodos e evitar mecanismos de mudança no tamanho do corpo.

Partindo destas premissas os coeficientes não serão obtidos aleatoriamente, conforme sugerido na literatura, mas sim de maneira sistemática, conforme apresentado na Tabela 8. Essa é uma proposta inovadora dessa tese. Deve-se ressaltar que o coeficiente, que deve ser utilizado por cada nodo cooperante para cada um de seus vizinhos, é obtido da lista de coeficientes $C_0 = 00$, $C_1 = 01$, $C_2 = 02$, \dots , $C_{255} = FF$ pela simples seleção do coeficiente, com base em seu próprio endereço e do vizinho em questão, com a seguinte regra de formação: $c_{ij} = i + j$, onde $i =$ Endereço do nodo cooperante, $j =$ Endereço do vizinho e o valor do coeficiente é limitado ao tamanho do corpo, ou seja, usa somente os 8 bits menos significativos do resultado da operação. Por exemplo, se o nodo 02 vai codificar, entre outras, a mensagem do vizinho 01 ele utilizará o coeficiente 03.

O coordenador também consegue construir esta tabela e portanto tem condições de auferir quais foram os coeficientes utilizados nas mensagens codificadas. De qualquer modo, o coordenador precisa conhecer quais mensagens originais estão codificadas. Aqui está um grande dife-

Tabela 8: Regra para distribuição dos coeficientes no corpo \mathbb{F}_{2^8} .

		Endereço dos vizinhos				
		00	01	02	...	FF
Endereço do nodo cooperante	00	00	01	02	...	FF
	01	01	02	03	...	00
	02	02	03	04	...	01
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	FF	FF	00	01	...	FE

Fonte: própria

rencial desta proposta, para redução do *overhead*. Ao invés de adicionar todos os coeficientes utilizados na codificação da mensagem, cada nodo envia um vetor binário contendo a posição de cada vizinho que ele ouviu e portanto codificou a respectiva mensagem. Ou seja, o vetor, cujo tamanho em bits corresponde ao total de nodos da rede, é uma seqüência de zeros e uns, indicando a presença (1) ou ausência (0) de determinado vizinho. Por exemplo, para o caso de uma rede com até 16 nodos, um determinado nodo cooperante que codificou as mensagens dos vizinhos 1, 3, 4, 5, 9, 10, 13 e 14, montaria um número binário com o seguinte conteúdo: 0101110001100110_2 ou $5C66_{16}$. Este seria o parâmetro a ser enviado ao coordenador, ou seja, somente 2 bytes.

Na técnica de codificação de rede tradicional, todos os coeficientes utilizados são encaminhados, o que representa um *overhead* que varia de 2 bytes (só faz sentido codificar no mínimo duas mensagens) a 256 bytes, que é limite do tamanho da rede. Nesta proposta, o *overhead* ficaria limitado entre 1 byte, em redes com até 8 nodos, até 32 bytes, para redes com 256 nodos. Isto representa um decréscimo no *overhead* entre 50 a 87,5%, quando comparado com a proposta original da NC.

Outra vantagem é a garantia de que o sistema será linearmente independente. Como já foi mencionado, a escolha aleatória de coeficientes aumenta a probabilidade de que o sistema seja solúvel. Contudo, no NetCOMeR existe a garantia de que os coeficientes serão diferentes para cada mensagem codificada, e o sistema certamente será linearmente independente. Isso foi comprovado com o Matlab[®] através da determinação do posto da matriz, apresentada na Tabela 8, igual a 256.

5.3.2 Discussões sobre o *overhear* na NC

Na codificação de rede tradicional, todos os nodos ficam permanentemente ouvindo o meio e capturando mensagens para codificar. No NetCOMeR, para evitar a exaustão da energia dos nodos, propõe-se que somente existirão nodos ouvindo permanentemente o meio quando for detectado algum nível de perda de mensagens. Além disso, o número destes nodos é controlado justamente por este nível de perdas. Quanto maior o nível de perdas, maior será a quantidade de nodos selecionados para cooperar. Isso se constitui em uma seleção oportunista.

Há trabalhos na literatura que recomendam a escolha prioritária dos nodos atuadores para as funções energeticamente extenuantes. Seguindo essa ideia, os nodos cooperantes poderiam ser escolhidos entre os nodos atuadores, já que, os mesmos podem possuir hardware especial e possuir fonte contínua de energia por estarem ligados a máquinas e equipamentos elétricos (LI et al., 2007; WILLIG; SHAH, 2002) .

Em resumo, se os nodos atuadores dispuserem de energia contínua e forem os eleitos para cooperarem a rede apresentará um consumo energético muito baixo. No entanto, mesmo nas implementações onde isto não seja um fato, o consumo será baixo para canais com baixo ruído, a medida que o ruído aumenta vai aumentar a necessidade energética.

5.3.3 Discussões sobre o *overload* na NC

Em boa parte das implementações de NC, todos os nodos decodificam todas as mensagens entrantes e as agrupam em uma nova mensagem codificada para, em seguida, transmiti-la. Ou seja, cada nodo deve ter capacidade de processamento suficiente para decodificar e codificar mensagens. Dada as limitações do hardware normalmente presentes nas RSSF esta hipótese é limitante.

Neste trabalho, propõe-se que os nodos sensores comuns, que aparecem em maior número, somente precisam ter a capacidade de codificar mensagens, o que requer menor poder de processamento. A codificação de mensagens envolve a multiplicação em corpo finito da mensagem pelo respectivo coeficiente. Nesse trabalho, esta implementação foi feita num esquema de deslocamento de bits, o que diminui a necessidade do poder de processamento e torna compatível com nodos com baixa capacidade de processamento, como os MicaZ e outros nodos, conforme testes experimentais apresentados na Seção 6.2 (Capítulo 6).

Já a decodificação é feita somente nos coordenadores e envolve a resolução de um sistema linear. No **NetCOMeR**, a expectativa é que boa parte da mensagens/incógnitas sejam recebidas ordinariamente durante o período de transmissão e as mensagens codificadas, retransmissão, serão suficientes para extrair as mensagens faltantes. Assim sendo, a quantidade final de incógnitas tende a se manter baixo e, consequentemente, também a complexidade do sistema. Na Seção 6.2 também serão apresentados testes experimentais do tempo necessário para nodos de diversas arquiteturas resolverem sistemas lineares, indicando que para determinado tamanho de rede e/ou número de incógnitas, os coordenadores deverão possuir um hardware proporcional à complexidade da aplicação. Esses testes comprovam a factibilidade do **NetCOMeR**.

5.4 EXPANSÃO DE CLASSES DE SERVIÇO NO IEEE 802.15.4

Técnicas que alteram a norma do IEEE 802.15.4 inviabilizam a integração com as aplicações existentes. Contudo, segundo Cena e Vasques (2008) redes sem fio e cabeadas precisarão conviver ainda por um bom tempo na indústria. Nesse sentido, essa seção propõe um mecanismo que permite a integração de serviços legados com novos mecanismos propostos para redes IEEE 802.15.4 no modo com *beacon*.

5.4.1 Motivações

Redes baseadas no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011) vêm sendo propostas como um padrão viável a ser usado em ambientes industriais. No entanto, com relação ao tratamento dado a nodos que enviam mensagens que necessitam de confiabilidade na rede, o protocolo IEEE 802.15.4 apresenta diversos problemas em seus dois modos de operação: com e sem *beacon*. No modo de operação sem *beacon* não estão previstas quaisquer garantias de que não haverá colisões de mensagens no meio sem fio. No modo de operação com *beacon*, o superquadro é dividido em duas partes o CAP e CFP, sendo que no CFP há a possibilidade de uso de compartimentos garantidos (GTS), de uso exclusivo de um nodo, sem colisões. O uso de GTS é efetivo no sentido de evitar colisões de mensagens enviadas por dispositivos IEEE 802.15.4, no entanto apresenta alguns problemas. Os dois principais são:

- Há apenas 7 compartimentos garantidos. Essa é uma severa restrição dado que em uma aplicação industrial podem haver mensagens e alarmes de muito mais sensores que deveriam ter algum

tipo de garantia temporal (SEMPREBOM et al., 2009b).

- Há pouca flexibilidade para se escolher o tamanho dos compartimentos reservados no CFP: Estes dependem do valor do SO e dobram a cada aumento do mesmo, variando entre 960 μs a 15,7 s, conforme observado na Tabela 3 (Capítulo 2).

5.4.2 Terceira Classe – 3C

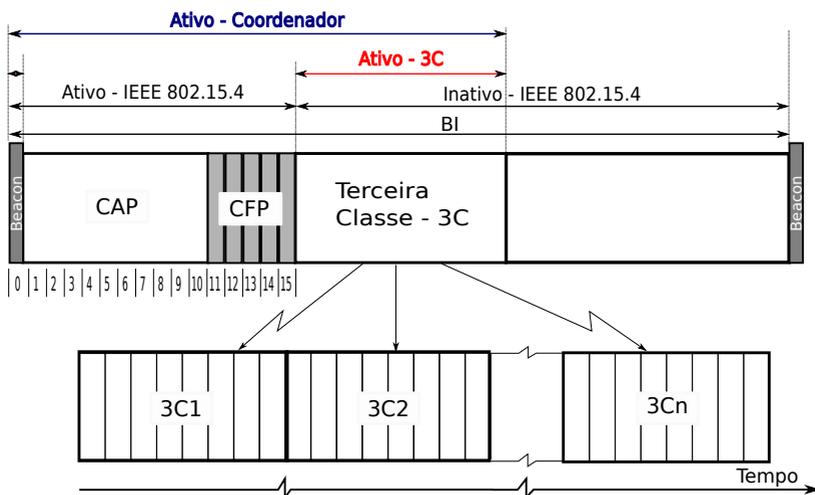
Para contornar as limitações descritas, nessa tese propõe-se a expansão do uso do quadro do IEEE 802.15.4 no sentido de ampliar as possibilidades de uso deste padrão, sem o comprometimento de sistemas legados. A proposta expande a utilização do superquadro, para além das duas classes de serviços existentes – com contenção (CAP) e sem contenção (CFP) – criando uma **Terceira Classe** (3C) de serviço. No superquadro, essa Terceira Classe está situada no período inativo (Figura 24). Com essa expansão, a rede passa a conter dois tipos de nodos: *i*) aqueles que acessam o meio através do CAP ou do CFP, denominados nesse texto, simplesmente, de nodos IEEE 802.15.4 e *ii*) e nodos 3C, os quais acessam o meio através do uso da Terceira Classe, com garantia de acesso ao meio sem contenção e com a possibilidade adicional de novos mecanismos de confiabilidade (VALLE et al., 2012, 2012b).

Importante ressaltar que a criação da Terceira Classe permite compatibilidade total com aplicações existentes, as quais poderão ter seus nodos IEEE 802.15.4 transmitindo durante o CAP e CFP sem interferir com as novas aplicações. Essas novas aplicações, por sua vez, terão seus nodos 3C transmitindo suas mensagens nos compartimentos alocados na Terceira Classe. No caso da topologia *cluster-tree* deve-se tomar especial cuidado no uso do 3C, já que deve-se prever um período específico para o mesmo.

Para alocar espaço para a 3C, o coordenador PAN define um superquadro com parâmetros BO e SO seguindo a seguinte regra: $BO > SO$. Ou seja, configura-se obrigatoriamente um período inativo para os nodos compatíveis com o padrão IEEE 802.15.4 (nodos (*i*)). O período de tempo alocado para 3C utiliza o período de tempo configurado como inativo para os nodos legado IEEE 802.15.4, e esse tempo pode variar entre a ocupação mínima do período inativo, até a ocupação total do mesmo.

Para a efetivação da 3C, somente o nodo coordenador PAN e nodos 3C (nodos (*ii*)) precisam ser programados diferentemente do pre-

Figura 24: Superquadro modificado com a criação da **Terceira Classe** de serviço.



Fonte: própria

visto na norma. O nodo coordenador precisa ter sua programação alterada de modo a conviver tanto com os nodos IEEE 802.15.4 como com os nodos 3C. Por conseguinte, este precisa permanecer ativo durante o período considerado inativo para os nodos convencionais, recebendo e tratando as mensagens enviadas pelos nodos 3C.

Como a Terceira Classe é destinada a aplicações com requisitos semelhantes aos de aplicações industriais, o acesso a essa classe possui tempos compartimentados, inibindo colisões de mensagens no acesso ao meio. Afora isso, o sistema é periódico, onde um conjunto de compartimentos alocados num período de inatividade do IEEE 802.15.4, serão repetidos nos próximos período de inatividade – $3C_1, 3C_2, \dots, 3C_n$, permitindo o agendamento temporal de mensagens.

Visando a minimização do consumo energético, os nodos terão seu período de atividade determinado pela classe a que pertencem. Os nodos IEEE 802.15.4 têm seu período de atividade conforme especificado na norma, já os nodos 3C têm seus períodos de atividade durante a inatividade dos nodos IEEE 802.15.4; por outro lado, o nodo coordenador PAN deverá estar ativo no período igual ao somatório dos demais períodos ativos.

O mecanismo de requisição de um ou mais compartimentos exclusivos 3C é semelhante ao proposto na norma para solicitação de compartimentos no CFP. Ou seja, um nodo que deseja este tipo de alocação precisa fazer uma requisição durante o período CAP, aguardar a confirmação do coordenador PAN, e então encaminhar suas mensagens nos seus compartimentos alocados. A mensagem de solicitação de compartimentos oriundos de nodos 3C possuem a informação de que se trata de um nodo 3C e, portanto, o coordenador consegue distinguir e alocar corretamente o compartimento solicitado.

5.4.3 Discussão sobre a terceira classe

Apesar de simples, o conceito da Terceira Classe de serviço é adequado para implementação de técnicas que estendem os serviços do padrão IEEE 802.15.4, sem necessitar alterar as aplicações existentes (sistema legado). Essa característica foi constatada na prática, neste trabalho, com implementação de um protótipo usando nodos MicaZ, cujos resultados são apresentados no Capítulo 6.

Importante notar que a implementação da técnica NetCOMeR proposta nessa tese, poderia prescindir do uso da Terceira Classe. Contudo, um dos resultados importantes demonstrados no Capítulo 6 tratou sobre a factibilidade da implementação de técnicas de NC em nodos reais. Nesse sentido, o uso da Terceira Classe se mostrou importante por mostrar que é possível viabilizar a implantação de forma gradual de novos serviços que melhorem a confiabilidade da rede, sem interferir com a comunicação entre nodos IEEE 802.15.4 “convencionais”.

Por fim, é importante ressaltar que existe um problema ainda a ser resolvido, o qual é decorrente do fato do mecanismo de requisição de compartimentos no CFP não ser determinista (Koubaa; ALVES; TOVAR, 2006), pois a solicitação é feita durante no período com contenção (CAP). Esse problema também pode ocorrer na solicitação de compartimentos 3C. Para mitigar esse problema existem alguns trabalhos na literatura que propõem novos mecanismos. Como exemplo, em Koubaa et al. (2006) é proposta uma abordagem que implementa níveis de prioridades que podem ser associados a requisições, manipulando parâmetros do CSMA/CA (`macMinBE`, `aMaxBE`, `CWinit` e `macMaxCSMABackoffs`). Apesar de não estar no escopo desta tese, ressalta-se que este tipo de abordagem poderia ser usada nas mensagens de solicitação de compartimentos enviadas por nodos 3C.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo contém as principais contribuições desta tese: **NetCOMeR** e **3C**. A técnica **NetCOMeR** é o foco principal desse trabalho e tem por objetivo aperfeiçoar vários aspectos deficientes observados com os ensaios das três técnicas tradicionais de retransmissão de mensagens. **NetCOMeR** faz uso dos mecanismos de codificação de rede, cooperação e diversidade temporal para aumentar a confiabilidade da rede.

Em seguida foi apresentada uma proposta de alteração no padrão IEEE 802.15.4 para fazer frente às demandas do uso das RSSF em ambientes industriais, ampliando o número de compartimentos com acesso exclusivo ao meio e mantendo a compatibilidade com sistemas legados. Além disto, foram discutidos vários aspectos da implementação prática da codificação de rede em RSSF e seus nodos. No próximo capítulo serão apresentados os resultados de ensaios experimentais e simulações que demonstram a factibilidade do **3C** e as melhorias de desempenho na confiabilidade de redes com a técnica **NetCOMeR**.

6 RESULTADOS

Este capítulo tem por objetivo analisar o **NetCOMeR** através de ensaios experimentais e simulações. Inicia com o detalhamento dos modelos adotados, tanto nos experimentos quanto nas simulações e em seguida são feitas as análises dos resultados obtidos.

O primeiro conjunto de ensaios experimentais demonstra a viabilidade do emprego da codificação e decodificação de rede com corpos finitos de base diferente de \mathbb{F}_{2^1} em RSSF. Esses ensaios apresentam um contraponto a autores que apregoam a inviabilidade ou dificuldade do emprego de técnicas de codificação de rede em RSSF, como por exemplo Wang et al. (2012). Essa dificuldade é atribuída principalmente à baixa capacidade computacional dos nodos. No entanto, essas limitações vêm sendo superadas pelo desenvolvimento de novos processadores, disponíveis para este tipo de dispositivo, e algoritmos otimizados.

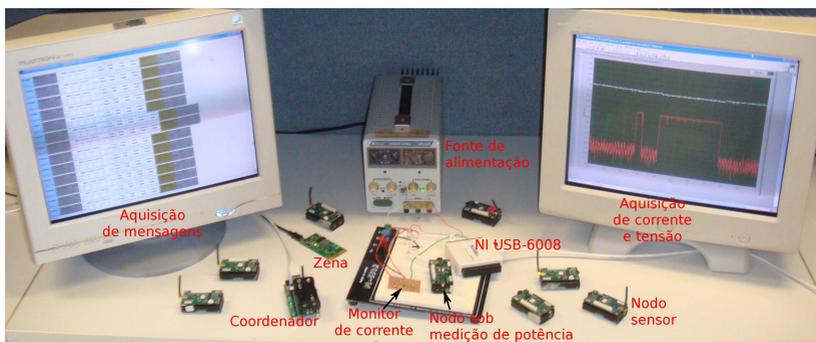
Em seguida é apresentado o modelo de falhas e/ou de perda de mensagens adotado em todos os ensaios para, logo em seguida, apresentar os resultados dos experimentos práticos. Na seção seguinte, os resultados dos ensaios experimentais são complementados com simulações e há uma comparação nos dados obtidos. Uma análise de sensibilidade dos parâmetros mais importantes nos algoritmos propostos é feita na seção seguinte, onde se analisa as consequências na mudança dos valores desses parâmetros com a consequente adoção de determinados valores padrão na técnica **NetCOMeR**. Para finalizar a avaliação de desempenho do **NetCOMeR**, foram realizadas simulações em uma topologia *cluster-tree* composta por vários agrupamentos estrela, contendo diferentes quantidades de nodos em cada uma delas. No final do capítulo, algumas conclusões são tecidas.

6.1 MODELO DOS ENSAIOS

Para comparar o desempenho do **NetCOMeR** com outras técnicas, foram realizados ensaios experimentais e simulações. A junção destes dois ferramentais propicia uma complementaridade que permite análises mais profundas e detalhadas da técnica proposta em comparação com outras técnicas.

Os ensaios experimentais buscam mostrar a viabilidade técnica de implementação, além de propiciarem uma série de conclusões levadas em consideração no projeto da proposta **NetCOMeR**, já que estes foram

Figura 25: Fotografia da bancada de ensaios, com destaque aos principais elementos.



Fonte: própria

os primeiros ensaios realizados. Algumas das técnicas “tradicionais” foram implementadas e ensaiadas durante o projeto do NetCOMeR, permitindo conclusões intermediárias no processo de construção da nova proposta.

Já as simulações complementaram a análise de desempenho do NetCOMeR, dando uma maior liberdade para ampliação de cenários e ao mesmo tempo permitem um maior controle na simulação dos erros nos enlaces físicos.

6.1.1 Ensaios experimentais

Para a realização dos ensaios experimentais optou-se por um conjunto de nodos MicaZ (MEMSIC, 2010) escolhidos devido a sua ampla utilização pela comunidade acadêmica. Diversos ensaios foram feitos usando os nodos MicaZ, que assumem o papel de coordenador ou de nodos convencionais, executando o *micro-kernel* OpenZB (ZB.NET., 2010). O OpenZB implementa a pilha de protocolos especificada pelo padrão IEEE 802.15.4, desenvolvidas na linguagem nesC (PROJECT, 2010) sobre o sistema operacional TinyOS (TINYOS, 2010). Para monitorar a rede foi utilizado um capturador de pacotes da Microchip Technology Inc. denominado Zena (INC., 2010), com versão de *software* 3.0.0. A Figura 25 mostra a bancada de experimentação, com os nodos, Zena e a coleta de dados no PC.

Em todas as técnicas, cada nodo sensor envia mensagens de 17 *bytes*, com carga útil simulada de 8 *bytes*. O nodo coordenador pode enviar mensagens diferenciadas para controle da rede, que depende da técnica em questão. A duração de cada compartimento foi configurada como sendo 20 *ms* em todas as técnicas. Conforme periodicidade da aplicação dada pelo intervalos entre *beacons*, os nodos geram um determinado dado, simulando o ato de coleta de grandezas do meio ambiente e processamento da informação, armazenam num *buffer* e enviam na primeira e segunda chance (quando existente).

Uma topologia estrela foi utilizada, composta por 9 nodos, sendo um deles o nodo coordenador. Não houve a intenção de testar o comportamento das técnicas frente a mudanças de topologia e/ou de tamanho de rede, mas sim de verificar as funcionalidades de cada proposta, comparando-as diretamente entre si. Os nodos foram organizados aleatoriamente, contudo, cuidou-se para que e a distância entre si não ultrapassasse 1*m*. Diante deste fato, cabe destaque que em nenhum momento e em nenhuma das técnicas ocorreu perda do *beacon*, ou seja, todos os nodos sempre receberam as mensagens de *beacon* enviadas pelo coordenador.

Para todos os experimentos, em cada uma das variações possíveis, foram feitas coletas de mensagens durante 10 minutos, tempo este que permite um total de aproximadamente 5159 compartimentos, já descontados os compartimentos específicos do protocolo IEEE 802.15.4. Esta quantidade de dados caracteriza uma amostragem estatística relevante que garante um intervalo de confiança dos resultados de 95%.

Para medição do consumo energético com precisão, um nodo sensor foi selecionado e uma fonte de alimentação foi utilizada para alimentá-lo. A corrente foi medida por um monitor de corrente ZXCT1022 (SEMICONDUCTORS, 2011), que converte corrente em tensão, permitindo então a aquisição dos valores em um computador, por meio do dispositivo de aquisição de dados NI PCI-6251 (INSTRUMENTS, 2011c) ou NI USB-6008 (INSTRUMENTS, 2011d). Para maiores detalhes sobre o subsistema de medição do consumo energético acessar o Anexo A (VALLE et al., 2013a, 2013b).

Outro detalhe importante é que nos ensaios experimentais foi utilizado o período 3C, Seção 5.4.2, para comportar os compartimentos de tempo, seja no período de transmissão ou retransmissão.

6.1.2 Simulações

Para as simulações foi adotada a plataforma OMNeT++ (COMMUNITY, 2011) por ser amplamente utilizada pela comunidade acadêmica, possuindo mais de 250 publicações referenciadas somente em 2011 e por apresentar nativamente todos os atributos e ferramentas necessários às simulações planejadas nessa tese.

O OMNeT++ é um *framework* para simulação de eventos discretos, desenvolvida principalmente para simulação de redes de comunicação. Provê infraestrutura para construção de ambientes de simulação com abordagem modular e orientada a objetos. Com modelos bem construídos, é possível a reutilização dos blocos e sua combinação para a formação de estruturas mais complexas.

O *framework* INET é um pacote aberto para simulação de redes de comunicação para o ambiente de simulação OMNeT++. O *framework* INET contém modelos para vários protocolos de redes com e sem fio. Suas funcionalidades foram estendidas através do *framework* INETMANET que contém protocolos adicionais e é especialmente útil para a modelagem de redes sem fio, por apresentar, entre outras, implementações intrinsecamente relacionadas a esta tese: *i*) um protocolo da camada de enlace do padrão IEEE 802.15.4, mais especificamente o modo com *beacon*, *ii*) um modelo de propagação com sombreamento log-normal e *iii*) um modelo de bateria que representa o consumo energético dos nodos em suas operações básicas de processamento e comunicação.

Em todos os experimentos o tempo total simulado corresponde a 60 minutos, onde os dados são coletados, exceptuando-se os primeiros 40 s (basicamente o primeiro ciclo onde há a formação da rede), os quais foram excluídos para evitar que a transitoriedade inicial da rede provocasse algum viés nos resultados. Um total de 30 nodos foi implantado em posições aleatórias dentro do cenário simulado, mantendo sempre o coordenador PAN no centro espacial do cenário. As mensagens de reconhecimento (ACK) foram desabilitadas no protocolo e, conforme já explicado, a variação do PER foi simulada através do espaçamento entre os nodos. Nesse sentido, as dimensões espaciais do cenário variavam desde 200 m (0% de perdas) até 400 m ($\sim 45\%$ de perdas) com intervalos de 20 m, sendo que a disposição dos nodos foi feita aleatoriamente com exceção do coordenador que sempre permaneceu no centro espacial da rede.

Outros parâmetros usados no ensaios foram: tamanho do quadro: 127 bytes, BO = 8 (correspondente a um BI de 3932,16 ms) e

$SO = 3$ (correspondente a um período ativo de 122,88 ms). Os demais parâmetros não explicitados foram mantidos conforme o padrão do simulador.

Para contrastar com os ensaios experimentais, nas simulações não foi utilizado o período 3C. Para comportar os compartimentos de tempo, seja no período de transmissão ou retransmissão, o superquadro original do IEEE 802.15.4 foi sobreposto com compartimentos suficientes para atender as demandas. Além disso, nesse caso o quadro **Bl0Cop** foi embutido no *payload* do *beacon*, diferentemente dos ensaios experimentais onde o mesmo utilizou uma mensagem própria.

6.2 ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CODIFICAÇÃO DE REDE EM RSSF

O principal objetivo desta seção é mostrar que a codificação de rede é computacionalmente tratável, mesmo para corpos finitos de base \mathbb{F}_{2^s} , o que é diferente do padrão normalmente adotado em RSSF: \mathbb{F}_{2^1} . Para atingir tal objetivo mediu-se o tempo gasto na codificação e na decodificação de um conjunto de mensagens em um conjunto distinto de processadores/plataformas.

Para estes testes, usou-se uma implementação simplificada do **NetCOMeR** contendo três métodos. *i*) O primeiro deles gera mensagens aleatórias, com o tamanho e quantidade parametrizáveis. Este método não faz parte da implementação original. *ii*) O segundo método, implementa a codificação de rede do conjunto de mensagens geradas e, *iii*) o terceiro, decodifica este conjunto de mensagens. Nos métodos *ii*) e *iii*), para medir o tempo gasto em cada execução, optou-se pelo uso de uma base única (único sistema de medição) para todas as arquiteturas. Esta medição é realizada em um PC através da diferença entre os tempos de recepção de um caractere exatamente no início e outro exatamente no final de cada método, via porta serial/USB. Cabe ressaltar que os métodos *ii*) e *iii*), apesar de serem os utilizados no **NetCOMeR**, implementam modelos genéricos de codificação e decodificação de mensagens para corpos finitos de base \mathbb{F}_{2^s} e, portanto, podem ser portados para qualquer sistema, sem necessidades de adaptações.

Este código simplificado foi portado para as plataformas descritas na Tabela 9. Em comum, estas plataformas possuem implementações da pilha de protocolos compatível com o padrão IEEE 802.15.4.

A porta USB destes nodos foi conectada a um PC que executa

Tabela 9: Arquitetura dos nodos.

Plataforma	Processador (PartNumber)	Processador Modelo	Clock (MHz)	EPROM (kB)	Flash (kB)	SRAM (kB)
SAM4S-Xplained	ATSAM4SC16	CortexM4	120	–	1000	128
WM-400	ATSAM4LC4B	CortexM4	48	–	2560	32
UC-3A-Xplained	AT32UC3A3256	AVR32	66	–	2560	128
WM-200	ATXMEGA256A3U	AVR8/XMEGA	32	4	2560	16
Arduino-Uno	ATMEGA32	AVR8	16	1	32	2
MicaZ	ATMEGA128	AVR8	8	4	128	4

Fonte: própria

um programa que a monitora em busca dos caracteres pré-definidos. Esse programa, assim que detecta o caractere de início de codificação, dispara um contador com resolução de microssegundos e, assim que recebe o caractere de fim, salva o tempo transcorrido. O mesmo procedimento é feito com a decodificação.

Na Tabela 10 são apresentadas as médias de 100 medições de tempo realizadas em cada arquitetura, tanto para a codificação quanto para a decodificação. Variou-se o tamanho e a quantidade de mensagens. O tamanho é limitado a um máximo de 127 bytes, atendendo a norma IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011).

Analisando a tabela é possível concluir que a codificação de rede é computacionalmente tratável pelos processadores dos nodos, mas deve-se fazer uma escolha adequada da arquitetura a ser utilizada. Esta escolha depende da quantidade de nodos existentes na rede (com respeito à quantidade de mensagens codificadas que é dada pela quantidade de vizinhos de um nodo cooperante), do tamanho das mensagens e da função exercida pelo nodo que implica na necessidade de somente codificar e/ou também decodificar mensagens. Dependendo destas características, deve-se proceder a adequada escolha da arquitetura a ser empregada no nodo comum e/ou coordenador.

Os campos NaN (do inglês *Not a Number*) refletem a falta de capacidade para determinado nodo executar tal tarefa, neste caso explicitamente relacionado à falta de memória. Por exemplo, na Tabela 11 são apresentados os valores de alocação de memória para executar o NetCOMeR simplificado na plataforma MicaZ, percebe-se que em alguns casos há um transbordo da memória disponível no componente.

A Tabela 10 pode ser encarada como uma mapa para determinação da melhor plataforma a ser utilizada em determinada aplicação. Na fase de projeto de uma rede pode-se utilizá-la para a devida escolha da plataforma que atenda as demandas de tempo de

Tabela 10: Tempo computacional para codificação e decodificação de um conjunto com tamanho e quantidades variáveis de mensagens.

Plataforma	3 mensagens		5 mensagens		10 mensagens		20 mensagens		30 mensagens	
	cod. (ms)	decod. (ms)	cod. (ms)	dec. (ms)	cod. (ms)	decod. (ms)	cod. (ms)	decod. (ms)	cod. (ms)	decod. (ms)
SAM4S-Xplained	0.01	0.01	0.01	1.21	0.99	4.70	2.79	19.47	6.46	44.86
WM-400	0.01	1.12	0.99	3.04	1.84	11.69	7.20	49.12	16.02	112.43
UC-3A-Xplained	0.98	7.11	0.99	13.99	2.81	36.50	11.12	117.93	25.03	235.76
WM-200	2.24	15.81	6.45	47.32	25.53	180.61	62.85	463.27	237.79	1762.08
Arduino-Uno	2.99	86.67	8.25	171.14	33.21	444.58	134.93	1440.25	305.76	2880.53
MicaZ	26.08	735.16	72.32	1453.26	295.08	3787.06	1123.24	12208.63	2421.87	23125.56
SAM4S-Xplained	0.01	0.01	0.99	1.31	1.90	4.99	5.53	22.37	12.36	50.58
WM-400	0.99	1.08	0.99	3.41	3.53	13.17	13.96	55.38	31.41	125.79
UC-3A-Xplained	0.99	13.64	1.39	25.38	5.54	59.88	22.12	174.02	49.75	324.27
WM-200	4.54	18.13	12.98	53.92	51.52	206.59	207.16	868.86	285.05	1192.90
Arduino-Uno	5.90	166.94	16.38	310.64	66.04	730.50	268.83	2129.08	NaN	NaN
MicaZ	49.10	1415.49	135.87	2636.71	556.47	6209.46	2239.24	18060.39	4716.37	31196.26
SAM4S-Xplained	0.01	0.01	1.00	1.89	2.69	6.64	10.75	27.59	24.00	62.03
WM-400	0.99	1.48	1.91	4.04	6.90	16.15	27.58	67.60	62.13	152.56
UC-3A-Xplained	0.99	26.64	2.75	48.20	11.06	106.68	44.12	286.17	99.24	501.52
WM-200	4.52	18.09	26.28	66.87	103.28	257.11	413.27	1068.32	995.64	2560.23
Arduino-Uno	11.70	327.47	32.61	589.63	131.65	1302.23	536.80	3506.56	NaN	NaN
MicaZ	97.72	2778.85	272.10	5004.66	1110.86	11078.25	NaN	NaN	NaN	NaN
SAM4S-Xplained	0.99	0.99	1.39	2.33	4.97	9.85	21.27	38.20	47.94	85.42
WM-400	1.27	1.99	3.47	5.67	13.70	22.20	54.81	91.99	123.72	206.04
UC-3A-Xplained	1.99	52.89	5.55	93.76	22.04	200.20	88.11	510.61	198.31	855.95
WM-200	18.60	31.50	52.68	92.91	204.38	352.98	832.03	1487.95	1983.34	3503.75
Arduino-Uno	23.31	648.54	65.03	1147.61	262.97	2445.65	NaN	NaN	NaN	NaN
MicaZ	194.35	5505.38	548.05	9830.83	2341.01	20797.11	NaN	NaN	NaN	NaN
SAM4S-Xplained	0.99	1.32	2.67	3.69	10.48	14.41	41.99	58.94	94.25	130.80
WM-400	2.45	3.05	6.77	8.62	27.08	34.07	108.68	140.02	245.13	311.42
UC-3A-Xplained	3.94	104.47	10.93	183.47	43.68	384.40	174.78	952.30	393.21	1553.81
WM-200	37.16	49.05	100.54	138.02	244.51	330.32	1658.39	2306.91	3943.79	5375.19
Arduino-Uno	46.35	1280.61	129.44	2246.12	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
MicaZ	398.43	10863.44	1125.56	19064.85	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Fonte: coleta de dados via medição experimental

Tabela 11: Demanda de alocação de memória para o MicaZ. Células destacadas indicam situações de transbordo de memória.

	Tamanho da mensagem				
	8 B	16 B	32 B	64 B	127 B
3 mensagens	2728 B	2775 B	2871 B	3063 B	3441 B
5 mensagens	2777 B	2857 B	3017 B	3337 B	3968 B
10 mensagens	2937 B	3097 B	3417 B	4058 B	5318 B
20 mensagens	3047 B	3727 B	4368 B	5648 B	8167 B
30 mensagens	4078 B	4077 B	5518 B	7437 B	11217 B

Fonte: própria

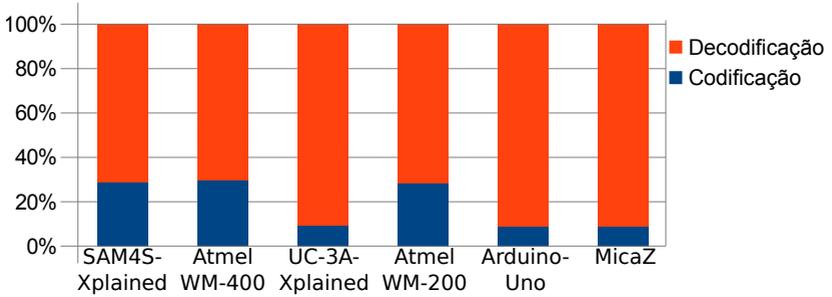
resposta para a aplicação em questão. Cabe salientar que na proposta dessa tese de tese, devido ao fato de um nodo comum executar somente a função de codificação e, por outro lado, o coordenador a decodificação, pode-se adotar diferentes plataformas para a mesma rede dependendo da função exercida por cada nodo.

Na Figura 26 é apresentada a razão entre o tempo para codificação e o respectivo tempo para decodificação de um conjunto de mensagens. Uma conclusão imediata é que o tempo para decodificação de mensagens é sempre maior que o tempo para codificá-las. Isto leva à conclusão direta que a arquitetura do coordenador PAN, que em nosso modelo de sistema é o único nodo que executa a decodificação de mensagens, deve preferencialmente ser diferenciada para atender as demandas computacionais. Também pode-se observar que diferentes plataformas apresentam diferentes razões entre o tempo de codificação e decodificação levando a conclusão que umas são mais ágeis na codificação, por exemplo MicaZ, e outras na decodificação, por exemplo SAM4S-Explained.

Para uma melhor compreensão dos dados, pode-se verificar a dependência do tempo de computação com a variação do tamanho das mensagens. Por exemplo na Figura 27 é apresentado o tempo computacional (em escala exponencial) necessário para a decodificação de um conjunto de 5 mensagens com o tamanho da mensagem variando de 8 a 127 bytes. Percebe-se que os tempos de decodificação de mensagens são dependentes da plataforma e diretamente proporcional ao tamanho das mensagens codificadas.

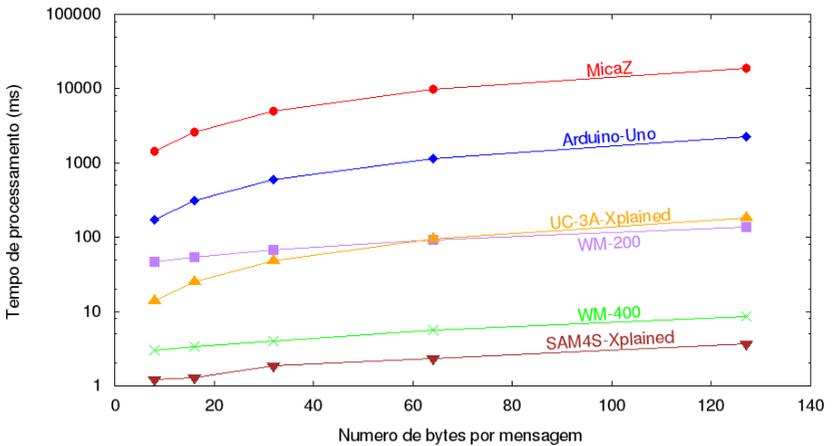
Na Figura 28 é apresentado o tempo computacional necessário para a decodificação de um conjunto de mensagens com quantidade variando de 3 a 30, sendo que cada uma das mensagens contém 8 bytes.

Figura 26: Razão entre o tempo de codificação e decodificação de 10 mensagens de 32 bytes.



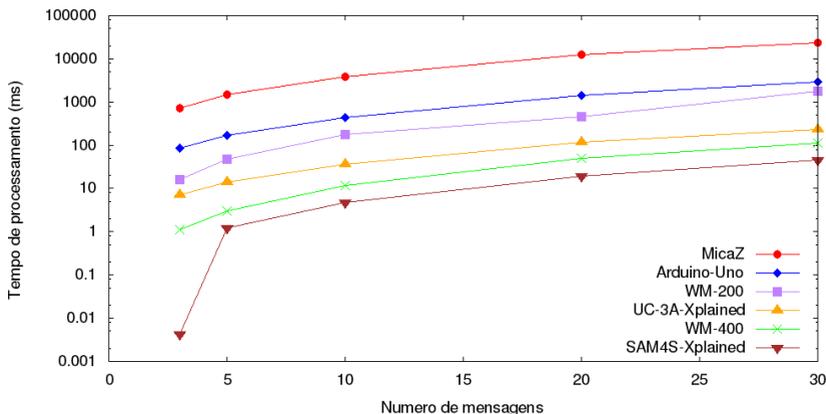
Fonte: processamento de dados coletados

Figura 27: Tempo computacional para decodificação de 5 mensagens com a variação do tamanho das mensagens.



Fonte: processamento de dados coletados

Figura 28: Tempo computacional para decodificação de mensagens de 8 bytes com a variação da quantidade de mensagens.



Fonte: processamento de dados coletados

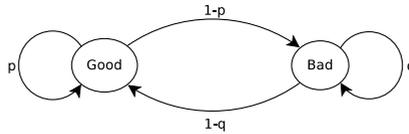
Percebe-se que, do mesmo modo que no caso anterior, os tempos para decodificação de mensagens são dependentes da plataforma e diretamente proporcional ao tamanho do conjunto de mensagens codificadas. Uma observação cabe ao primeiro ponto da curva relativa à plataforma SAM4S-Xplained, está claro que este ponto está fora da tendência do comportamento geral da curva, isto é atribuído ao sistema de medição que chegou ao seu limite de sensibilidade. De qualquer forma entende-se que este ponto, assim como alguns outros da tabela 10, não compromete a análise dos demais resultados.

Além disto também é perceptível que a variável que mais afeta o tempo de processamento é a quantidade de mensagens a codificar/decodificar (sentido horizontal da Tabela 10), que, com seu crescimento, provoca um crescimento praticamente exponencial no tempo de processamento. Já a variação do tamanho das mensagens provoca um crescimento praticamente linear no tempo de processamento.

Para ter-se noção relativa dos tempos apresentados na tabela, cabe relembrar que a norma IEEE 802.15.4 prevê que o tempo de um compartimento varia de 0,96 ms a pouco mais de 15 s, dependendo do valor de SO parametrizado na rede. Isto significa que, mesmo no pior caso aqui apresentado, a melhor arquitetura consegue processar com folga a NC dentro do intervalo de tempo de um compartimento.

Um exemplo prático de projeto de plataformas a serem utiliza-

Figura 29: Cadeia de Markov de dois estados.



Fonte: própria

das: ao se implantar uma rede com até 20 nodos, com mensagens de 16 *bytes* e com BO igual a 5 (implica em um compartimento de 30,72 ms), deve-se optar pela plataforma UC-3A-Xplained para os nodos comuns (codificação) e SAM4S-Xplained para o coordenador (decodificação). Com a adoção destas plataformas, ambas as operações, codificação e decodificação, poderão ser realizadas num tempo inferior ao tempo de um compartimento.

6.3 MODELO DE FALHAS ADOTADO

Uma das técnicas escolhidas para avaliar o desempenho do Net-COMeR foi através de testes experimentais sobre um protótipo desenvolvido. Nesse sentido, um dos obstáculos encontrados foi o de reproduzir cenários semelhantes aos encontrados em ambientes industriais. O meio sem fio encontrado nesses ambientes é sujeito a ruídos e interferências, os quais ocorrem geralmente na forma de rajadas e que, portanto, necessitam ser cuidadosamente modelados e reproduzidos durante os experimentos.

No trabalho Ebert e Willig (1999) é apresentado um modelo de erro de bit para canais de rádio frequência entre dois dispositivos. Este modelo é o denominado modelo de Gilbert-Elliot que consiste de uma cadeia de Markov de dois estados nomeados **Good** e **Bad** (Figura 29). A cada estado é associado uma taxa de erro de bit (BER) constante; e_G no estado **Good**, e_B no estado **Bad**, sendo que $e_G \ll e_B$. Em cada estado é assumido que os erros ocorrem de modo independente ao do outro estado e, por simplicidade, alguns trabalhos consideram $e_G = 0$ (0%) e $e_B = 1$ (100%) (ANASTASI; CONTI; Di Francesco, 2011).

Neste modelo, o estado inicial é o estado **Good**, e para cada novo *bit*, o canal pode permanecer nesse estado ou mudar. As probabilidades de transição apresentados são: p é a probabilidade de estar no estado **Good** e permanecer nele, e q é a probabilidade de estar no estado **Bad**

e permanecer nele depois de uma transição. Estas probabilidades são dadas pelas equações 6.1 (EBERT; WILLIG, 1999).

$$p = 1 - \frac{1}{T_{good}} \quad q = 1 - \frac{1}{T_{bad}} \quad (6.1)$$

onde T_{good} e T_{bad} representam, respectivamente, os tempos de permanência no estado *good* e *bad*.

Obtidos p e q pode-se determinar a probabilidade de estado estacionário para os estados **Good** (P_g) e **Bad** (P_b) com as seguintes equações (NOBRE et al., 2010):

$$P_g = \frac{1 - q}{2 - (p + q)} \quad P_b = \frac{1 - p}{2 - (p + q)} \quad (6.2)$$

E, por fim, pode-se determinar o PER, em função do tamanho da mensagem (n) dado em *bytes*, pela equação (NOBRE et al., 2010):

$$PER(n) = 1 - (P_g p^{8n} + P_b (1 - q) p^{8n-1}) \quad (6.3)$$

No trabalho Willig et al. (2002) foram realizadas medições de ruídos em rádios compatíveis com o padrão IEEE 802.11 em ambientes industriais e, baseado nestas, foi proposto uma alteração no modelo Gilbert-Elliot, onde propõe-se que os tempos de permanência nos estados *Good* e *Bad* são aproximados por distribuições log-normal.

Nesta tese, durante os ensaios experimentais os nodos foram depositados próximos um dos outros, de tal modo a minimizar a interferência externa no sinal de rádio das comunicações e antes de qualquer ensaio foram feitos testes para verificar se havia perda de mensagens. Em todos os testes não houve perda de mensagens.

Para simular a perda de mensagens nos ensaios experimentais foi adotado um procedimento indireto. A perda foi simulada em cada nodo, assumindo que existe uma probabilidade fixa de corrupção de uma mensagem durante sua transmissão. Esta probabilidade é portanto equivalente a PER. Quando um nodo recebe uma mensagem, ele decide, baseado no valor da PER, se a mensagem está ou não corrompida. Mensagens corrompidas são descartadas. Assume-se que a faixa de perda de mensagens varia entre 0 a 50% e que qualquer mensagem pode ser perdida, independente de ser mensagem de nodos sensores ou do coordenador. Vale ressaltar que o nível mais alto de perdas (50%) torna impraticável muitas aplicações de rede, mas foram consideradas devido a alguns trabalhos apontarem níveis próximos a estes (WILLIG et al., 2002).

Nos ensaios experimentais realizados, o valor do PER é explicitado em cada coleta de dados para um determinado cenário e este valor é adotado de forma independente a cada mensagem.

Outra técnica adotada para avaliar o desempenho do NetCOMeR foi através de simulações com o OMNeT++ e framework INETMANET. Nessas simulações, a adoção do modelo de ruídos foi mais simples, já que o Framework INETMANET tem implementado o modelo de sombreamento log-normal. Cabendo a ressalva que o modelo implementado no simulador leva em consideração principalmente o SNR (*Signal-to-noise ratio*) que é inversamente proporcional a distância entre os nodos comunicantes. Já o modelo Gilbert-Elliot considera que o sombreamento é dado pela possível presença de uma fonte de ruído no meio de propagação, independentemente da distância. De qualquer forma, uma aproximação a ser adotada é representar este ruído pelo afastamento espacial de determinado nodo, culminando com comportamentos similares na taxa de perda de mensagens, seja pela presença de ruído, seja pelo afastamento espacial. Nas simulações realizadas, o modelo de ruído adotado foi obtido com o afastamento espacial entre os nodos, já que o simulador contém este modelo de ruídos embutido no modelo do meio sem fio.

6.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO

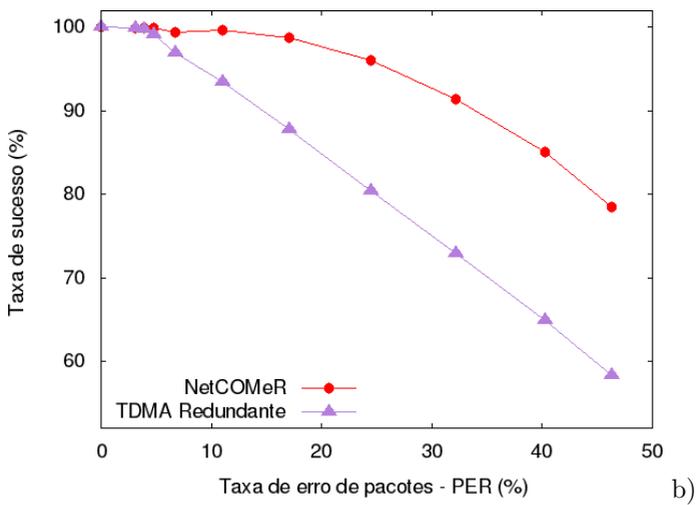
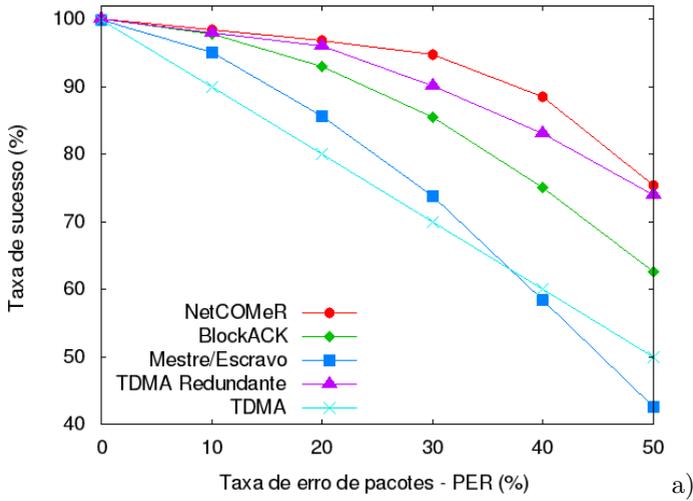
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos do comparativo das técnicas apresentadas nas seções 4.4 e 5.1 utilizando os modelos de ensaios apresentados na seção 6.1.1 (VALLE et al., 2012a) e 6.1.2.

Sempre que pertinente os resultados dos experimentos serão comparados com os resultados obtidos via simulações. No entanto, o comparativo feito a partir das simulações trata somente das técnicas NetCOMeR e TDMA Redundante, que apresentaram melhor desempenho nas análises feitas a partir dos testes experimentais. Por outro lado, nas simulações são explorados mais detalhadamente alguns aspectos referentes a um maior número de nodos e possibilidades de falhas, dada a maior facilidade de modelagem e rapidez na execução de simulações.

Na Figura 30 pode-se observar a Taxa de Sucessos, a qual é definida como a relação entre cada dado enviado pelo nodo sensor e sua efetiva chegada ao coordenador, seja na primeira ou na segunda chance, com relação a variação da taxa de perda de pacotes.

Os resultados da Figura 30a) mostram que, em geral, todas as técnicas têm um desempenho melhor que o TDMA básico. Pode-se per-

Figura 30: Taxa de sucessos: a) ensaios experimentais, b) simulações.



Fonte: processamento de dados coletados

ceber que, considerando essa técnica, a técnica **NetCOMeR** é a que apresenta um melhor desempenho, seguida logo de perto pela técnica **TDMA Redundante**. Para taxa de perda de até 30%, os ganhos são bem significativos: para a **NetCOMeR** este ganho é da ordem de 25% quando comparado com a técnica **TDMA** básico, e o sucesso é da ordem de 95%, representando um aumento significativo na confiabilidade da rede.

Na Figura 30b) são apresentadas as taxas de sucesso das técnicas **TDMA Redundante** e **NetCOMeR** obtidas a partir de simulações. Percebe-se que o comportamento tem o mesmo padrão do ensaios experimentais, mas ambas com uma taxa de perdas um pouco maior que nesse caso. Isto é devido ao fato de que nos testes experimentais com nodos MicaZ nunca houve a perda do *beacon*, dada a proximidade entre os nodos. No entanto, já nos experimentos simulados, a medida que aumenta o distanciamento entre os nodos, aumenta também a taxa de perda de mensagens, inclusive dos *beacons*. Ao não receber um *beacon* um nodo não encaminha seus dados.

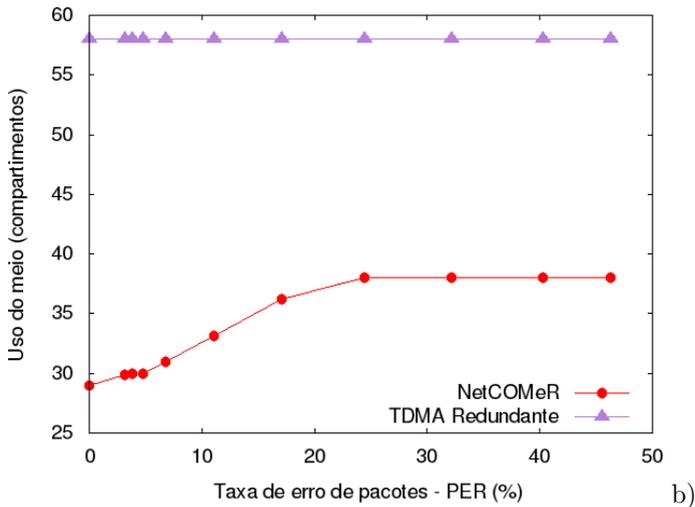
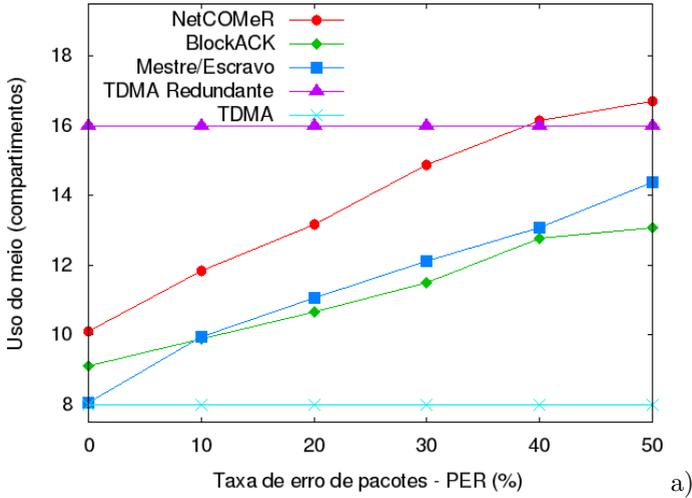
Nas simulações é perceptível também que ampliou-se a diferença no desempenho entre ambas as técnicas. Esta melhora no desempenho da técnica **NetCOMeR** é devido principalmente ao mecanismo de diversidade temporal empregado na mensagem do coordenador PAN aos nodos que, nessa implementação, foi embutida no próprio *beacon*. Portanto, nessa técnica o *beacon* apresenta diversidade temporal. Esta análise ficará mais clara na Seção 6.5, Figura 36.

Na Figura 31 é apresentada a taxa média de ocupação do meio em número de compartimentos, em relação a variação da taxa de perdas de pacotes. Neste caso, quanto menor a ocupação melhor é a técnica. Este parâmetro é importante pois o meio sem fio tem se tornado cada vez mais escasso em ambientes industriais, dada a alta densidade de redes sem fio. Assim sendo, uma menor ocupação do meio significa uma menor interferência mútua entre as redes.

A primeira observação com os resultados obtidos na Figura 31, é que o **TDMA Redundante** e **TDMA** tem uma taxa de ocupação do meio uniforme para qualquer nível de perdas. Por outro lado, é visível o bom desempenho da técnica **NetCOMeR** que, mesmo com uma taxa de sucesso um pouco maior, apresenta em média uma menor ocupação do meio quando comparada à **TDMA Redundante** e esta ocupação é diretamente proporcional ao nível de perdas na rede. Um comportamento similar pode ser observado nas técnicas **BlockACK** e **Mestre/Escravo**, mas estas com taxas de sucesso consideravelmente menor.

Na Figura 31b) percebe-se que a técnica **NetCOMeR** apresenta uma taxa de ocupação crescente, saturando com o PER na ordem de

Figura 31: Uso do meio: a) ensaios experimentais, b) simulações.



Fonte: processamento de dados coletados

25%. Essa saturação se deve ao fato de o mecanismo de escolha dos nodos cooperantes (equação 5.2) não encontrar mais nenhum nodo apto a cooperar quando a taxa de erros de comunicação é muito alta. Isto leva a uma limitação no número de cooperantes que, conseqüentemente, limita o número de compartimentos utilizados na retransmissão. Por sua vez, essa característica também limita a taxa de sucesso, conforme apresentado na Figura 30b).

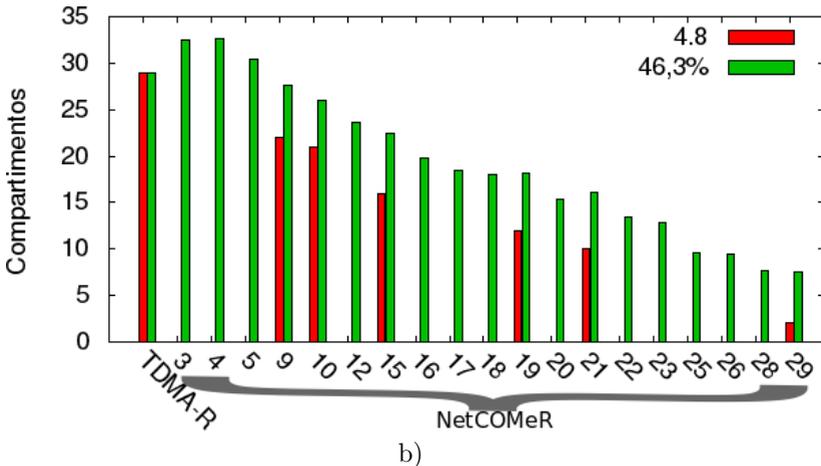
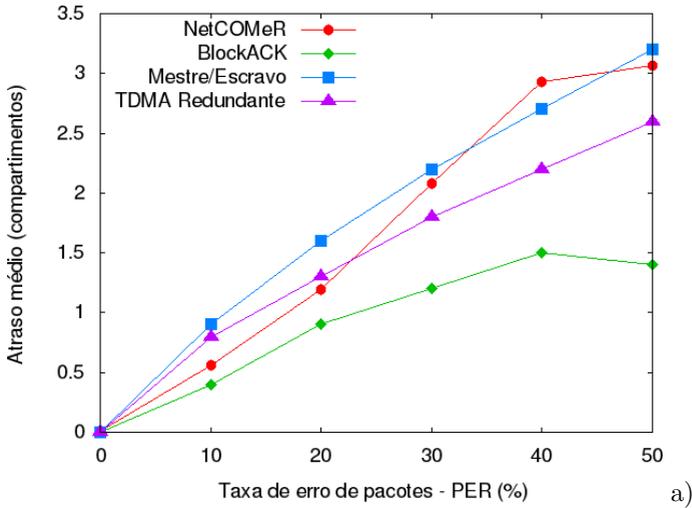
Com o conjunto de figuras 30 e 31 pode-se observar que as técnicas que mais se destacam são a *NetCOMeR* e *TDMA Redundante*, esta última apresentando um pior desempenho no quesito uso do meio.

É importante observar que as técnicas *Mestre/Escravo* e *BlockACK* são as que apresentam pior desempenho quando se verifica taxa de sucesso, apesar de serem propostas bastante utilizadas e hipoteticamente apresentarem um bom desempenho. Essa característica é decorrente do fato de serem as técnicas que mais necessitam de troca de mensagens por dado gerado, ou seja, mensagens de controle. Como nos ensaios considerou-se que qualquer mensagem poderia ser perdida, sem exceção, e como as mensagens, neste caso, são inter-relacionadas isto acarreta num efeito dominó. Por exemplo, no caso da técnica *Mestre/Escravo*, para o devido recebimento de uma mensagem de dados é necessário que seja emitida pelo coordenador uma mensagem de requisição, a qual pode ser perdida. Ainda que o nodo receba esta mensagem, ele deverá responder com a respectiva mensagem contendo dados, que também pode ser perdida. Neste caso, a probabilidade média de perdas é maior que o dobro do caso *TDMA Redundante*, já que nesta última técnica nunca há a mensagem de controle.

A Figura 32 apresenta o atraso no recebimento de dados contabilizado a partir do compartimento dedicado a transmissão do referido dado, medido em número de compartimentos, em relação a taxa de perdas de pacotes. Na Figura 32a) é apresentado o atraso médio entre os diversos nodos e na Figura 32b) o atraso é apresentado de forma individualizada. Essa métrica de desempenho precisa ser analisada em conjunto com a taxa de sucesso para se ter uma exata noção comparativa das técnicas. Dependendo da aplicação pode ser mais interessante priorizar baixas perdas ou baixos atrasos.

Na Figura 32a), já que os resultados mostram o atraso médio calculado pelos dados de todos os nodos, podem ocultar comportamentos individuais. Por exemplo, no caso da técnica *BlockACK*, o primeiro nodo pode ter um atraso maior que o último, devido ao fato de o último poder retransmitir imediatamente após o quadro do *BlockACK* (caso tenha sido o único a ter sua mensagem perdida), com atraso de

Figura 32: Atraso no recebimento de dados: a) ensaios experimentais (atraso médio), b) simulações.



Fonte: processamento de dados coletados

2 compartimentos. Já para o caso do primeiro nodo o atraso seria de 10 compartimentos (na mesma situação).

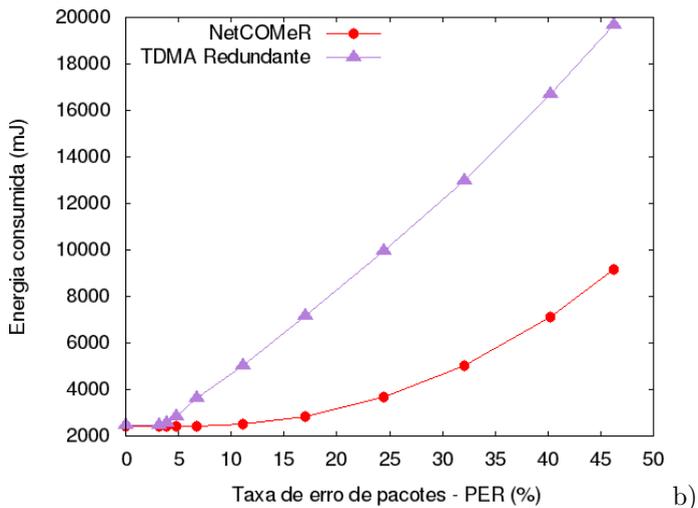
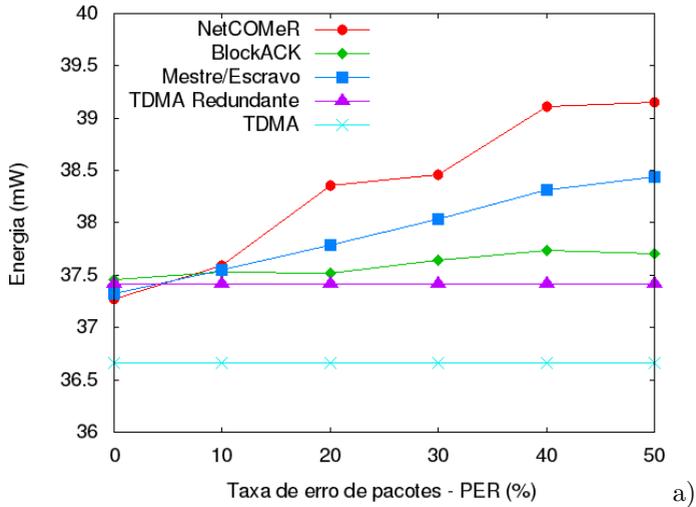
Na Figura 32b) é apresentado o atraso no recebimento das mensagens de cada um dos nodos em cada uma das técnicas, fixando as taxas de perdas em 4,8 % e 46,3%, os dois valores extremos na faixa de perdas. No eixo das abscissas é apresentado o endereço do nodo (que nesse caso é o mesmo do compartimento por ele ocupado) e/ou a técnica a qual ele pertence. Nessa figura somente são apresentados os nodos que apresentaram algum percentual de perdas na transmissão de suas mensagens. No caso da técnica **TDMA Redundante** foi apresentada somente uma amostra já que o atraso, quando há, é sempre constante para qualquer PER ou nodo.

No caso da técnica **NetCOMeR** fica evidente que quanto mais alto o endereço do nodo menor é o atraso médio sofrido, já que, quanto mais próximo do período de retransmissão o nodo enviar sua mensagem, mais rapidamente ela tenderá a ser retransmitida, minimizando seu atraso. Este comportamento leva a uma possível decisão de alocação dos nodos com maiores restrições temporais mais ao final do ciclo de transmissão, permitindo assim que os mesmos apresentem um menor atraso no caso de retransmissão de suas mensagens.

A energia consumida por um nodo sensor nas diferentes técnicas, pode ser observada na Figura 33, em relação a taxa de perdas de pacotes. Nos ensaios experimentais, as medições energéticas foram realizadas com o sistema de medição descrito no Apêndice A. Aqui cabe uma observação: nos ensaios experimentais usou-se a medição do consumo energético em medida de potência (mW), já nesses resultados simulados optou-se por manter o padrão adotado no OMNeT++ que é a apresentação da energia residual da bateria (mJ). Os nodos no OMNeT++ iniciam a simulação com um valor parametrizado de energia e , a medida que os nodos executam tarefas e , conseqüentemente, gastam energia, há redução na energia residual.

Na Figura 33a), pode ser observado que todas as técnicas apresentam um consumo maior que a TDMA. Isto é o esperado, já que a segunda chance foi habilitada nas demais técnicas. A técnica **TDMA Redundante** é insensível à variação de perdas, isto é, o consumo dos nodos se mantém constante em todos os níveis de perda já que os nodos retransmitem os dados, sendo ou não necessário. Por outro lado, as técnicas **NetCOMeR**, **Mestre/Escravo** e **BlockACK** são mais sensíveis as perdas, sendo a **NetCOMeR** a mais sensível. Este comportamento está intrinsecamente relacionado ao comportamento reativo das técnicas, já que as mesmas somente utilizam a retransmissão proporcional à neces-

Figura 33: Energia consumida por um nodo sensor: a) ensaios experimentais, b) simulações.



Fonte: processamento de dados coletados

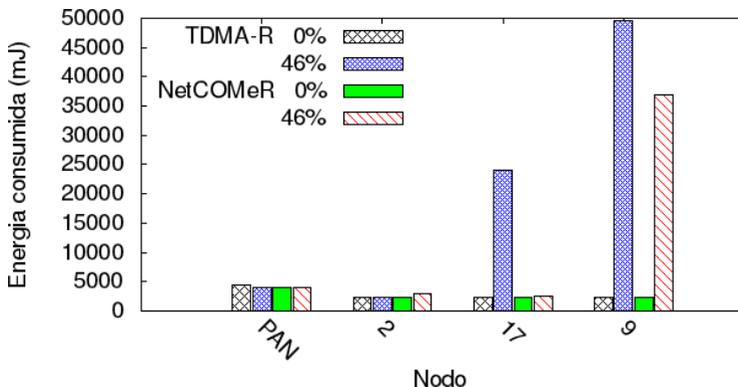
cidade. O pior comportamento da técnica NetCOMeR deve-se ao fato de os nodos cooperantes permanecerem com os rádios ativos durante todo o período de transmissão para poderem capturar as mensagens de seus vizinhos, como é ilustrado no Apêndice A.

Diferentemente do apresentado nos ensaios experimentais, onde a técnica NetCOMeR consumia em média mais que a técnica TDMA Redundante, nas simulações, Figura 33b), a técnica NetCOMeR tem um desempenho melhor. Isto também se deve à diversidade temporal do *beacon*. O padrão IEEE 802.15.4, em sua seção 4.5.2.1, prevê que um nodo configurado no modo *beacon-enable*, deve ouvir permanentemente o meio em busca de um *beacon* na rede, quando o dispositivo encontra o *beacon* ele se sincroniza na estrutura do superquadro e, no tempo apropriado ele transmite seus dados. Nas simulações, o que ocorre é que os nodos mais afastados (com maior ruído) acabam perdendo o *beacon* e, portanto, precisam ligar seu rádio e ficar ouvindo constantemente o meio em busca de um novo *beacon* para se resincronizarem na rede. Isto faz com que estes nodos gastem muito mais energia que um nodo que ouve sistematicamente o *beacon*, desliga seu rádio e acorda somente para transmitir seus dados em seu compartimento. A diferença no consumo energético entre as duas técnicas reside no fato de que no caso da NetCOMeR, os nodos podem perder 3 a cada 4 *beacons* e ainda assim se manterem sincronizados na rede, ou seja, enviando seus dados no seu respectivo compartimento e dormindo o restante do tempo.

Aqui cabe uma observação quanto ao atendimento do padrão IEEE 802.15.4. Ao definir que os nodos na técnica NetCOMeR podem perder 3 a cada 4 *beacons*. Em uma rede com *beacon*, se o nodo perde sincronização, perde o *beacon*, cabe a aplicação determinar o procedimento a ser adotado pelo nodo, por exemplo, ele pode tentar transmitir mas nada garante que a mensagem será recebida pelo coordenador ou demais nodos irão receber tal mensagem. Em nossa proposta, tanto o nodo quanto o coordenador sabem da possibilidade de perda de *beacons*, portanto a rede pode funcionar adequadamente, sem infringir o padrão IEEE 802.15.4.

Para melhor entender o comportamento individual dos nodos, na Figura 34 é apresentado o consumo energético individual, obtido via simulações, para alguns nodos chave no sistema: *i*) o coordenador (PAN) que tem um comportamento homogêneo em ambas as técnicas; *ii*) o nodo 2, que em ambas as técnicas é um nodo que não apresenta perda na transmissão de mensagens mas na técnica NetCOMeR é “exaustivamente” escolhido como cooperante e, portanto, tem um leve acréscimo no seu consumo quando a taxa de perda de mensagens aumenta; *iii*) o

Figura 34: Energia individual consumida das baterias.



Fonte: processamento de dados coletados

nodo 17 é um nodo que apresenta um nível intermediário de perda de mensagens e, no caso do NetCOMeR, praticamente não perde *beacons* e, portanto, seu consumo praticamente não se altera, mas que na técnica TDMA Redundante tem sucessivas perda de *beacons* e conseqüente aumento do consumo energético; *iv*) o nodo 9 que é um nodo que em ambas as técnicas apresenta a mais alta taxa de perda de mensagens e, conseqüentemente do *beacon*, e, portanto, passa muito tempo em busca do mesmo, fazendo seu consumo energético aumentar. O menor consumo no NetCOMeR neste caso é atribuído à diversidade temporal intrínseca da técnica.

Uma observação, para o caso do coordenador em ambas as técnicas: percebe-se que com a taxa de perdas maior há um ligeiro decréscimo no consumo energético. Isto se deve ao fato de o mesmo acabar recebendo menos mensagens/quadros (maior taxa de perdas) e, conseqüentemente, processa menos informações.

Outra observação à qual deve-se chamar a atenção é o comportamento do nodo 2 na faixa de perdas de 46%, nesse caso fica explícito o acréscimo do consumo energético exigido a um nodo cooperante, já que este é sistematicamente (sempre) escolhido como cooperante nesse ensaio. Nesse ensaio o consumo energético do nodo 2 teve um acréscimo aproximado de 20%.

Baseado nos consumos obtidos via experimentação, construiu-se a Tabela 12, que apresenta uma estimativa de vida útil de um nodo alimentado por duas baterias de 2700 mAh. É importante observar que a

Tabela 12: Estimativa da vida útil média dos nodos (h).

Taxa de perdas	NetCOMeR	BlockACK	Mestre/Escravo	TDMA Redundante	TDMA
0%	435	432	434	433	442
50%	414	430	421	433	442

Fonte: processamento de dados coletados

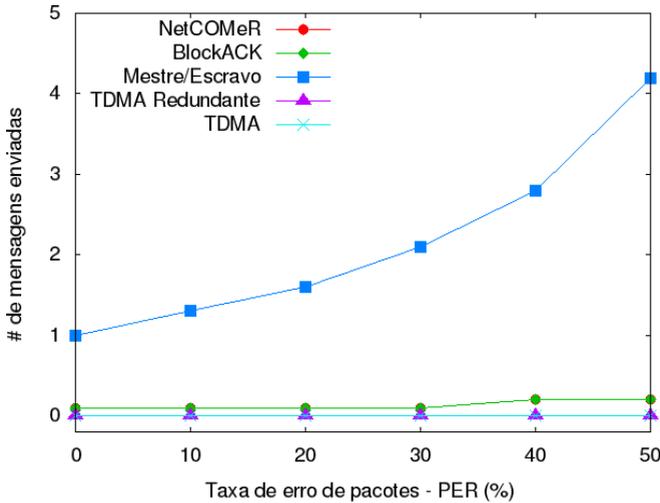
variação do consumo energético entre as técnicas que implementam retransmissão de mensagens não passa de 5% no pior caso. Esta pequena diferença é devido principalmente à compartimentação do tempo, dado à compartimentação do tempo, e ao ciclo de trabalho (*duty-cycle*) o que permite que os nodos tenham períodos bem específicos de atividade e inatividade, passando a maior parte do tempo na inatividade.

Na Figura 35 pode-se observar a quantidade de mensagens que o coordenador deve enviar para cada dado efetivamente recebido, ou seja, as mensagens de controle da rede. Essa análise foi feita somente nos ensaios experimentais, já que, nas simulações o **BlOCoP** era encaminhado no *payload* do *beacon*. Essa é uma informação que ilustra a maior ou menor carga de trabalho do coordenador. Fica evidente no gráfico que a técnica **Mestre/Escravo** é a que mais sobrecarrega o coordenador no que diz respeito à quantidade de mensagens enviadas. Para o caso do **TDMA Redundante** e **TDMA** o número de mensagens é sempre zero. Para o **NetCOMeR** e **BlockACK** a quantidade de mensagens enviadas é muito baixa e inversamente proporcional ao número de nodos sensores. Nessas últimas técnicas, como para cada ciclo sempre será enviada uma única mensagem de controle pelo coordenador, independente do número de nodos na rede, quanto maior o número destes, menor será o peso proporcional desta mensagem.

6.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO NETCOMER

O objetivo desta seção é analisar em detalhes a técnica **NetCOMeR** no sentido de verificar sua sensibilidade em relação à variação dos principais parâmetros presentes em seus algoritmos. Estes são alterados variando-se seus valores dentro de certos limites, e os resultados coletados dão subsídios a discussões mais aprofundadas e embasam a adoção dos valores adotados nos experimentos e/ou nas simulações do **NetCOMeR**. Por outro lado, esta análise permite que em determinada aplicação alvo otimize-se os valores dos seus parâmetros para atender

Figura 35: Mensagens encaminhadas pelo coordenador por dado recebido.



Fonte: processamento de dados coletados

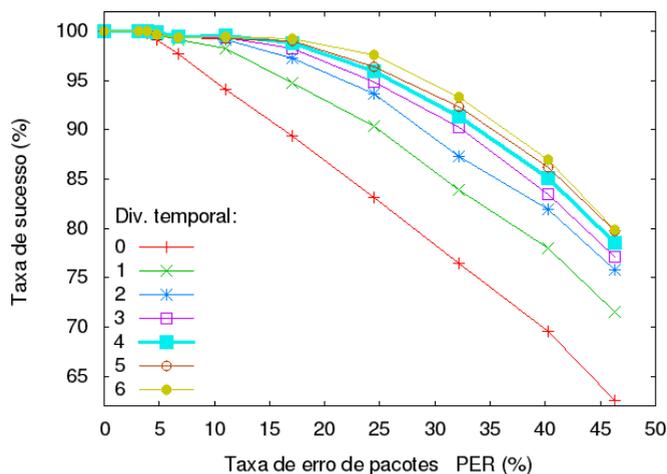
as demandas propostas.

Na Figura 36 é apresentado o comportamento da taxa de sucesso na rede com a variação da diversidade temporal do *BlCoP* (Seção 5.2.1) que, neste caso, está embutido no *beacon*. Ou seja, a diversidade temporal indica exatamente o número mínimo de repetições do conteúdo de interesse no *beacon*. A curva em destaque (4) é o valor padrão utilizado na técnica durante as simulações com OMNeT++.

Fica evidente que, quanto maior a diversidade temporal, melhor é a taxa de sucesso na entrega de mensagens, chegando a uma saturação. Isto é devido ao fato de que nodos que perdem o *beacon* perdem o sincronismo com a rede e, portanto, não conseguem sequer utilizar seu compartimento no período de transmissão. A medida que aumenta-se a tolerância a perda de *beacons*, os nodos passam a utilizar mais seus compartimentos aumentando sua probabilidade de sucesso, seja de maneira direta, com sua mensagem chegando diretamente ao coordenador ou de maneira indireta, com sua mensagem sendo reencaminhada por um nodo cooperante e posteriormente retransmitida.

Nos nodos, a diversidade temporal do *beacon* se traduz pela autogeração de um *beacon* caso o *beacon* gerado pelo coordenador seja

Figura 36: Sensibilidade da taxa de sucesso em relação a variação da diversidade temporal do *beacon*.



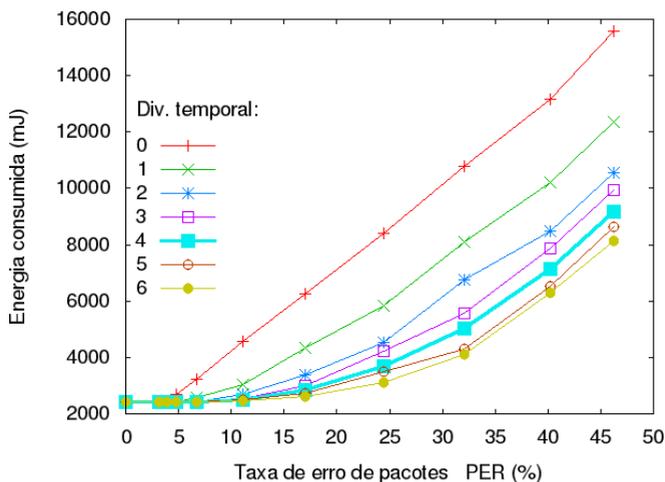
efetivamente perdido, este fato pode acarretar dois problemas:

- A perda de sincronismo propriamente dito, caso em que um nodo tenha seu tempo de relógio deslocado em relação ao tempo de seus vizinhos e haja sobreposição no uso dos compartimentos, provocando colisões. A solução para este problema passa pelo investimento em hardware de melhor qualidade e, portanto, de maior custo.
- A rede perde o poder de reatividade, ou seja, a medida que se incrementa a repetição do *beacon* perde-se a agilidade em reagir a uma mudança brusca na taxa de perda de mensagens, com sua consequente necessidade de aumento do número de cooperantes.

Na Figura 37 é apresentado o comportamento do consumo energético na rede com a variação da diversidade temporal e taxa de perda de mensagens. Também a curva em destaque é o valor adotado como padrão na técnica. Aqui também fica evidente que, quanto maior a diversidade temporal, menor o consumo energético, dada a menor perda de *beacons*, ou seja, nodos que não perdem o *beacon* são energeticamente mais econômicos.

Na Figura 38 é apresentada a variação da taxa de sucesso em

Figura 37: Sensibilidade do consumo médio de energia em relação a variação da diversidade temporal do *beacon*.



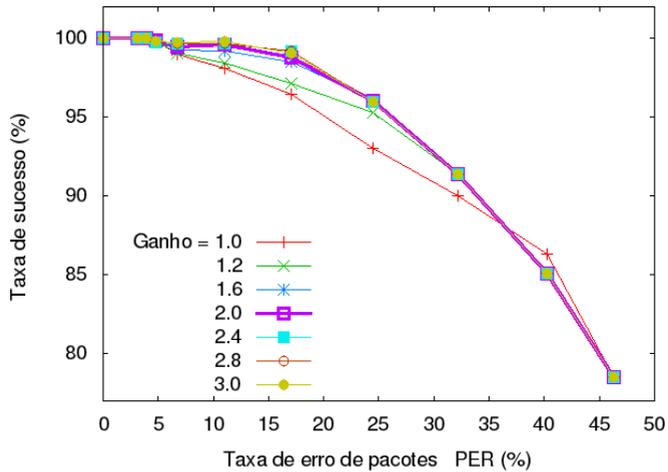
Fonte: processamento de dados coletados

relação a variação do parâmetro G (ganho) da Equação 5.1. Este parâmetro tem uma influência direta na quantidade de nodos cooperantes escolhidos pelo coordenador. Evidencia-se que, quanto mais cooperantes houver na rede, menor será a taxa de perdas. Por outro lado, maior serão os custos energéticos e o uso do meio.

Na Figura fica claro que a maior quantidade de cooperantes melhora a taxa de sucesso da rede mas, neste caso, há a saturação de cooperantes aptos a cooperar. Ou seja, enquanto houver cooperantes aptos disponíveis o sistema tende a manter a taxa de sucesso próxima a 100%. A partir do ponto em que começa a faltar cooperantes, a queda é praticamente linear. A curva em destaque é relativa ao padrão adotado durante os experimentos para avaliar o NetCOMeR.

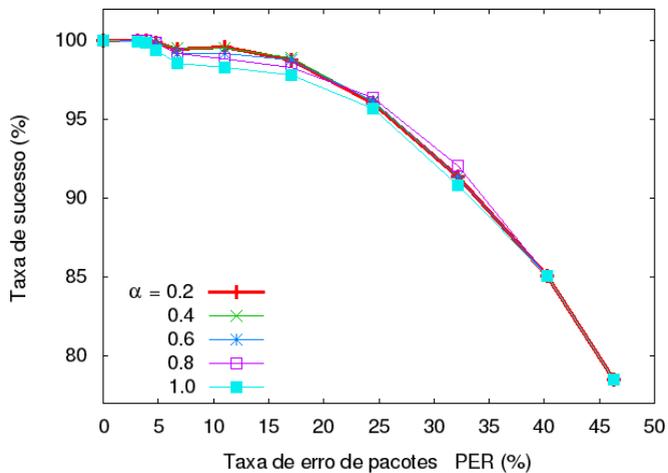
Na Figura 39 é apresentado o comportamento da taxa de sucesso em relação à variação do parâmetro α da Equação 5.1. Como já enfatizado anteriormente, esse parâmetro define o comportamento da reatividade da rede no cálculo da quantidade de nodos cooperantes necessários. O comportamento pode ser modificado dando mais ou menos peso as amostras mais recentes: quanto maior o valor de α maior peso às amostras mais antigas. A curva em destaque, é relativa ao valor padrão adotado nos experimentos.

Figura 38: Sensibilidade da taxa de sucesso em relação à variação do parâmetro G .



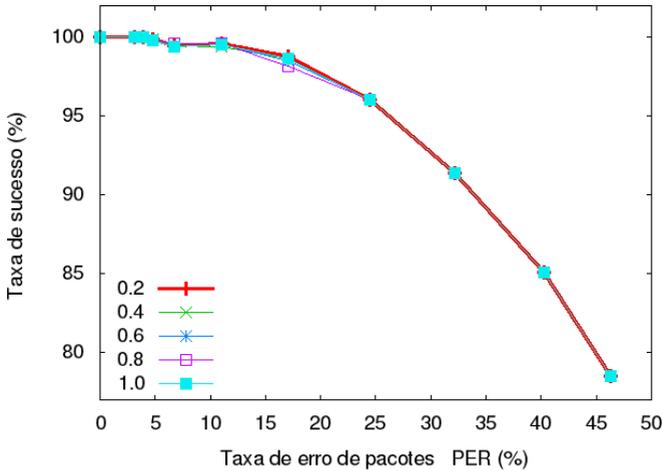
Fonte: processamento de dados coletados

Figura 39: Sensibilidade da taxa de sucesso em relação a variação do parâmetro α .



Fonte: processamento de dados coletados

Figura 40: Sensibilidade da taxa de sucesso em relação a variação do parâmetro β .



Fonte: processamento de dados coletados

Na Figura percebe-se que, quanto menor o α , melhor é o comportamento do sistema. Ou seja, dando-se maior peso às amostras mais recentes o sistema se torna mais reativo. Por outro lado, a diversidade temporal deixa o sistema menos reativo, alongando o uso das amostras, já que, a cada quatro medidas, três são desprezadas o que seria equivalente a aumentar o α . Fica claro que deve existir uma solução de compromisso na escolha do tamanho da diversidade temporal e desse parâmetro.

Na Figura 40 é apresentado o comportamento da taxa de sucesso em relação a variação do parâmetro β , da Equação 5.1. Como já enfatizado anteriormente, este parâmetro define o comportamento da reação às variações na perda de mensagens na rede. O comportamento pode ser modificado dando maior ou menor peso às amostras mais recentes: quanto maior o valor de β , maior peso às amostras mais antigas. A curva em destaque é relativa ao padrão adotado durante os experimentos com o NetCOMeR.

Como é perceptível na Figura, o parâmetro β tem pouca influência na taxa de sucesso neste cenário, principalmente devido ao já comentado mascaramento pela diversidade temporal.

6.6 NETCOMER NA TOPOLOGIA *CLUSTER-TREE*

Em uma topologia estrela, cada nodo da rede está conectado diretamente ao seu coordenador por apenas um salto. Numa topologia *cluster-tree*, a rede é organizada em agrupamentos (onde cada agrupamento pode ser uma estrela). Cada agrupamento é gerenciado por seu coordenador ou líder de agrupamento, enquanto os coordenadores são hierarquicamente conectados para formar um árvore centralizada no coordenador PAN, conforme já definido na Seção 4.2, Figura 15.

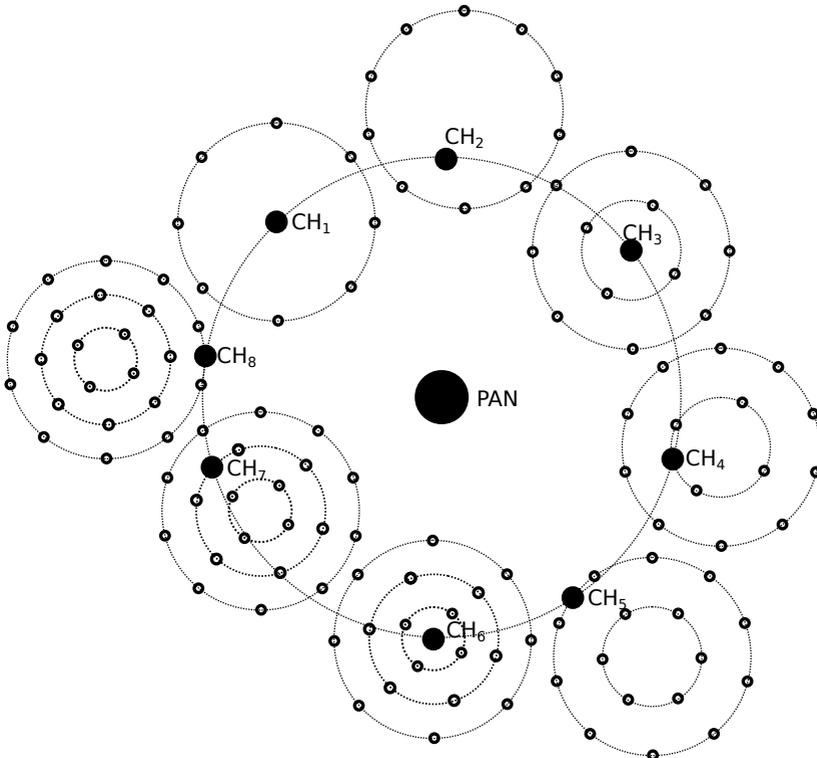
Na topologia *cluster-tree* um nodo sensor coleta os dados, forma um quadro e transmite a seu tempo para seu coordenador, um do CH's. Se houver perdas na rede, o CH seleciona alguns nodos para cooperarem, exatamente como descrito na Seção 5.1, e os nodos desse conjunto codificam suas mensagens armazenadas e as transmitem para o coordenador. O coordenador recebe o conjunto de mensagens originais e codificadas, decodifica todas as possíveis e armazena-as. Ao seu tempo, o CH atua exatamente como um nodo sensor convencional, exceto pelo fato de não transmitir seus próprios dados, mas sim os do seu agrupamento e, novamente, se houver algum nível de perdas na rede, e ele for um dos selecionados para cooperar, este nodo codificará sua mensagem juntamente com o conjunto de mensagens ouvidas durante o período de transmissão daquele agrupamento. O coordenador PAN, com o conjunto de mensagens recebidas durante o período de transmissão, mais o conjunto recebido durante a cooperação, juntamente com o processo de decodificação, está habilitado a obter todo o conjunto possível de mensagens originalmente transmitidas pelos nodos sensores.

6.6.1 Descrição da implementação

Para demonstrar a aplicabilidade da técnica na topologia *cluster-tree* simulou-se um cenário que contém oito agrupamentos estrela no primeiro plano mais um no segundo plano, conforme apresentado na Figura 41. Cada uma dos oito agrupamentos tem um superquadro – SD, Figura 42, com tempo exclusivamente dedicado, numerados de 1 a 8 ($SD_1 \dots SD_8$), e com seu respectivo coordenador – $CH_1 \dots CH_8$. O coordenador PAN (PAN) tem, em seu tempo, a coordenação geral com dois períodos SD_0 (Figura 42) e representa o destino final de todos os dados.

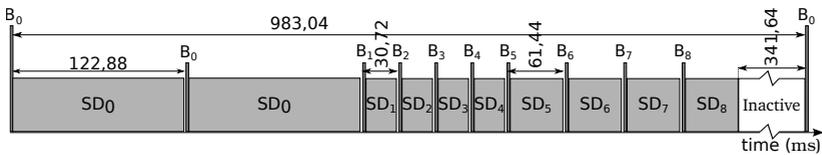
Todos os nodos operam no mesmo canal de rádio e em um agrupamento estrela certamente todos os nodos estão ao alcance do sinal

Figura 41: Diagrama esquemático da topologia *cluster-tree* utilizada.



Fonte: própria

Figura 42: Superquadro com os SD's dedicados à cada agrupamento.



Fonte: própria

Tabela 13: Definição dos parâmetros para cada agrupamento pertencente a topologia *cluster-tree*.

Coordenador do agrupamento	Número de nodos/compartimentos	Tempo mínimo (ms)	SO	SD (ms)	diâmetro da circunferência (m)
PAN	8/16	65,024	3	122,88	300
CH_1	8/16	15,36	1	30,72	220
CH_2	10/20	19,2	1	30,72	180
CH_3	12/24	23,04	1	30,72	200
CH_4	14/28	26,88	1	30,72	220
CH_5	16/32	30,72	2	61,44	180
CH_6	18/36	34,56	2	61,44	200
CH_7	20/40	38,4	2	61,44	220
CH_8	22/44	42,24	2	61,44	180
Total time				614,4	

Fonte: própria

de rádio entre seus vizinhos o que, possivelmente, pode provocar interferência mútua entre os agrupamentos. Isso justifica o espalhamento do tempos de superquadro propostos na literatura. Por outro lado, este experimento não tem o objetivo de otimizar o intervalo entre *beacons*, o que poderia ser feito com um diagnóstico de mútua interferência e, para os casos onde não há esta interferência, sobrepor os períodos de funcionamento dos agrupamentos.

Todas os agrupamentos possuem diferentes números de nodos para melhor exemplificar o emprego da técnica **NetCOMeR**, e tem parametrização conforme apresentada na Tabela 13. Foi considerado que cada compartimento tem o tamanho mínimo (0,96 ms) previsto pela norma e que cada dado de um nodo sensor possui tamanho de 8 bytes. A exceção é o agrupamento do PAN que, por fazer agrupamento de dados, no pior caso (CH_8) poderá ter de enviar 176 bytes (22×8) para o PAN. Como já dito, o tamanho máximo do quadro previsto na norma é 127 bytes, portanto neste caso será necessário o uso de dois compartimentos de tempo. Isto justifica a existência de dois tempos SD_0 na Figura 42, ou seja, cada nodo do agrupamento de nível mais alto terá dois compartimentos a sua disposição.

Na Tabela 13, o Número de nodos/compartimentos explicita a quantidade de nodos em cada agrupamento e a respectiva necessidade máxima de compartimentos: transmissão mais cooperação. O Tempo mínimo retrata o tempo para atender minimamente todos os compar-

timentos dentro do respectivo agrupamento, obtido pelo produto entre número máximo de compartimentos dentro do agrupamento e o tempo de cada compartimento. O SO e SD são parâmetros da norma (Equação 2.2) obtidos a partir dos demais dados da tabela. O **diâmetro da circunferência** determina o afastamento/posicionamento espacial dos nodos em cada agrupamento. Este diâmetro foi aleatoriamente escolhido.

Baseado na Tabela 13 e nas equações 2.1 e 2.2 pode-se concluir que o BO mínimo para atender a todos os SD é 6. Um pequeno período entre SD 's deve ser previsto e é necessário para prevenir qualquer sobreposição nas transmissões, devido a diferenças entre a resolução dos relógios dos dispositivos utilizados. Este valor é ajustado para ser no mínimo 3 ms em todos os casos (HERNÁNDEZ; PARK, 2011). Com isto chega-se ao BI de 983,04 ms, deixando um período inativo de 341,64 ms, conforme mostrado na Figura 42.

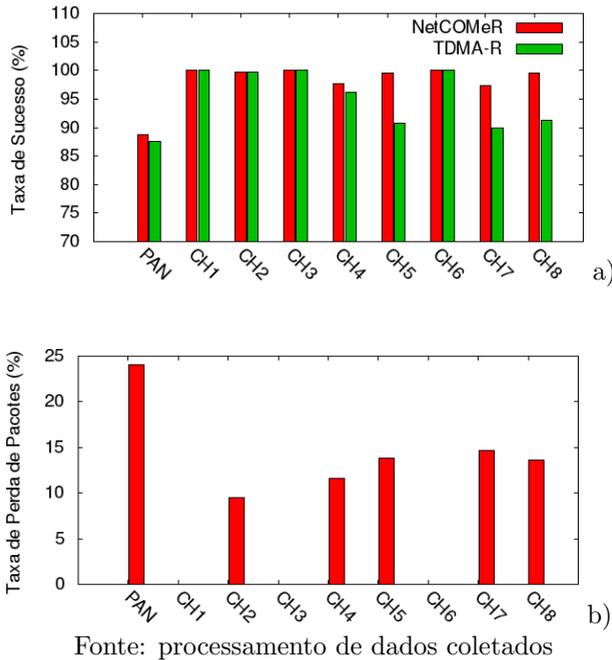
6.6.2 Resultados obtidos

Para simplificar os resultados, neste caso optou-se por apresentar somente os resultados das métricas mais relevantes: taxa de sucesso e consumo energético. A métrica atraso também é importante mas, neste caso, fica estritamente relacionada ao escalonamento de tempo feito entre os superquadros. Portanto a variação a variação no interior de um superquadro torna-se insignificante perante o tempo total gasto para uma mensagem de um nodo qualquer chegar ao PAN.

Inicialmente é apresentada na Figura 43a) a taxa de sucesso em cada agrupamento isoladamente, diferenciadas pelos nomes dos respectivos coordenadores, tanto na técnica **NetCOMeR** como na **TDMA Redundante**. Como é perceptível, a técnica **NetCOMeR** sempre apresenta uma taxa de sucesso superior ou igual a **TDMA Redundante**. De qualquer modo ambas apresentam um ganho na taxa de sucesso quando comparada com a taxa de perda de mensagens presente em cada agrupamento individual, conforme apresentado logo abaixo na Figura 43b). Nessa figura percebe-se também que, em alguns agrupamentos, não há perda de mensagens: *CH1*, *CH3* e *CH6*.

Na Figura 44 é apresentada a taxa de sucesso de cada agrupamento em cada técnica e a taxa de sucesso média total, quando considerada a composição de perdas ao longo de todo o caminho percorrido por uma mensagem qualquer. A taxa de sucesso total retrata o percentual de mensagens recebidas pelo coordenador PAN em relação

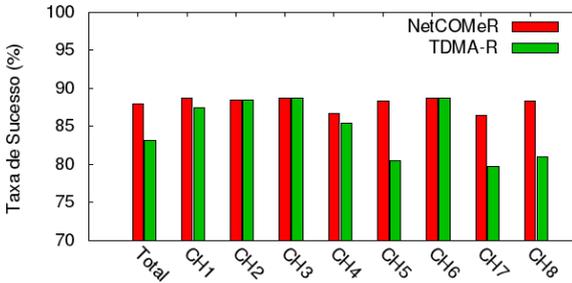
Figura 43: a) Taxa de sucesso individual em cada agrupamento e b) taxa de perdas equivalente.



ao conjunto de mensagens emitidas individualmente por cada nodo da base da topologia *cluster-tree*. As demais taxas de sucesso representam a composição final da taxa de sucesso considerada individualmente em cada agrupamento. Ou seja, representar o percentual de mensagens geradas nos nodos da base de cada agrupamento que chegam em média ao coordenador PAN. Percebe-se que cada agrupamento tem um comportamento diferenciado devido à variedade na taxa de perdas. Novamente, para todos os casos a técnica NetCOMeR apresenta um melhor desempenho.

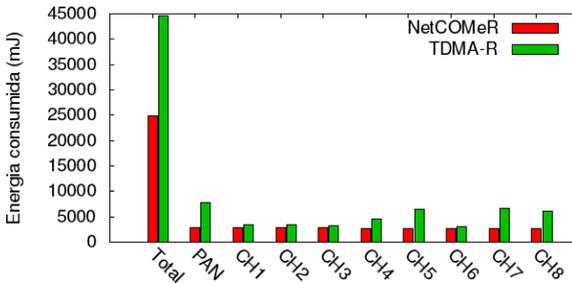
Cabe salientar que o encadeamento dos agrupamentos em níveis provoca um conseqüente acúmulo de perda de mensagens ao longo do caminho percorrido pela mensagem. No agrupamento realizado nessa tese o agrupamento “PAN” (agrupamento central da Figura 41) apresentou o maior índice de perdas dentre todos os agrupamentos, que prejudicou todos os demais agrupamentos da rede. Nesse caso seria

Figura 44: Taxa de sucesso conjunta nos dois níveis da topologia *cluster-tree*.



Fonte: processamento de dados coletados

Figura 45: Carga elétrica consumida na topologia *cluster-tree*.



Fonte: processamento de dados coletados

interessante um cuidado especial ao distribuir os nodos dessa rede, no sentido de minimizar ao máximo a influência dos ruídos do meio, em especial no agrupamento central. Isto refletiria na melhoria do desempenho em toda a rede.

Na Figura 45 é apresentada a energia consumida globalmente e em cada agrupamento individualmente. A energia total é o resultado da soma das energias de cada agrupamento. Como já apresentado na Seção 6.4, o consumo energético da técnica *NetCOMeR* é menor quando comparado à *TDMA Redundante* e o resultado cumulativo segue a mesma tendência.

6.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DO NetCOMeR

O NetCOMeR se mostrou um protocolo para retransmissão de mensagens melhor em todas as métricas de desempenho propostas nesse trabalho de tese, quando comparado as técnicas também aqui descritas. Na principal métrica de desempenho – taxa de sucesso – essa proposta se mostrou melhor que todas as demais apresentadas nesse trabalho, em todas as situações: nos ensaios experimentais, nas simulações, na alteração da quantidade de nodos, na submissão a diferentes taxas de perda de pacotes, seja em topologia de agrupamento ou árvore de agrupamentos.

Dada a aplicação fim, proposta na introdução dessa tese que é o uso de RSSF em ambientes industriais, a proposta NetCOMeR se mostrou recomendável nesse tipo de cenário, dado que aumenta a confiabilidade na troca de mensagens em redes industriais submetidas a altas taxas de erro de pacotes. Mesmo com a ampliação da quantidade de nodos, obtida com a formação de topologia *cluster-tree*, a técnica NetCOMeR aparece em destaque nos comparativos realizados.

Quanto à questão de consumo energético, que é uma característica importante nas RSSF, os ensaios mostraram que o NetCOMeR também apresenta um desempenho superior as demais técnicas quando se utiliza a diversidade temporal do *beacon*, que possibilita uma diminuição considerável no consumo energético dos nodos.

Os ensaios mostraram que, tomando-se cuidado na escolha da arquitetura do nodos, a técnica NetCOMeR é implementável em nodos de RSSF sem fio baseadas no padrão IEEE 802.15.4, mesmo ao se considerar os processos de codificação e decodificação de um conjunto de mensagens.

Além de aplicações industriais o NetCOMeR pode ser empregado em outros cenários que necessitem da ampliação da confiabilidade na troca de mensagens.

6.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado um conjunto de resultados e análises tanto em experimentos práticos como em simulações, além do modelo de ruído inerente a estes ensaios.

A maior conclusão do capítulo é que a técnica NetCOMeR se mostra uma técnica de retransmissão de mensagens com resultados expressivos quando comparado às demais técnicas, nas métricas apresentadas.

Independente da técnica adotada, observa-se que os protocolos de rede, que atuam em redes com taxas de perda de mensagens, devem ser simplificados ao máximo quanto a troca de mensagens, evitando, se possível, mensagens de controle, já que, esta interdependência de mensagens provoca um aumento significativo na taxa de perdas total na rede.

Outra observação importante é eficácia na taxa de sucesso com a aplicação da diversidade temporal. Por outro lado, essa técnica somente pode ser empregada com protocolos proativos (em avanço) na recuperação de perda de mensagens em redes cooperativas.

Para finalizar, a complementariedade de ensaios experimentais com simulações, permite a observação mais ampla de protocolos de rede e seus aspectos específicos, já que, cada modelo apresenta particularidades relevantes em diferentes cenários.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 VISÃO GERAL DO TRABALHO

Essa tese apresentou algumas propostas e contribuições que buscam responder a pergunta realizada na Introdução. – Como aumentar a tolerância a perda de mensagens em redes IEEE 802.15.4 empregadas no ambiente fabril?

Das análises dos ensaios e revisão da literatura surgiu então a proposição do NetCOMeR. Essa proposta prevê um mecanismo de retransmissão oportunista de mensagens codificadas utilizando a técnica de codificação de rede. O protocolo do NetCOMeR prevê que cada nodo sensor, numa topologia com agrupamento tipo estrela, disponha de um compartimento de tempo exclusivo para a transmissão de seus dados e, no caso de ocorrerem perda de mensagens na rede, alguns nodos serão escolhidos para auxiliarem os demais a obterem sucesso na transmissão de seus dados.

Das análises dos ensaios e revisão da literatura surgiu então a proposição do NetCOMeR. Essa proposta prevê um mecanismo de retransmissão oportunista de mensagens codificadas utilizando a técnica de codificação de rede. O protocolo do NetCOMeR prevê que cada nodo sensor, numa topologia com agrupamento tipo estrela, disponha de um compartimento de tempo exclusivo para a transmissão de seus dados e, no caso de ocorrerem perda de mensagens na rede, alguns nodos serão escolhidos para auxiliarem os demais a obterem sucesso na transmissão de seus dados.

A quantificação e qualificação dos nodos retransmissores é feita pelo coordenador da rede baseado em critérios de estado de enlace e histórico de transmissões bem sucedidas que seleciona os melhores nodos retransmissores. Os nodos escolhidos passam então a ouvir o meio, capturar todas as mensagens que ouvirem corretamente, codificar esse conjunto de mensagens e, num compartimento exclusivo no período de retransmissão, enviar a mensagem codificada. O coordenador da rede, de posse das mensagens originais e codificadas consegue decodificar as mensagens faltantes, ou boa parte delas.

O uso da técnica NetCOMeR na topologia com agrupamento em estrela, pode ser estendido para um agrupamento *cluster-tree*, sem perda de generalidade. Para isso, nos *cluster heads* é feita a transmissão do agrupamento de mensagens recebidas e não das mensagens coletadas dos sensores, como seria em um nodo sensor convencional.

O NetCOMeR foi extensivamente avaliado por ensaios experimentais e simulações, onde sua eficiência foi demonstrada pelo comparativo com outras técnicas de retransmissão de mensagens. As avaliações ocorreram tanto na topologia estrela quanto *cluster-tree*.

Após um estudo da literatura sobre técnicas para aumentar a confiabilidade nas comunicações sem fio em rede industriais, três técnicas de retransmissão de mensagens foram propostas e implementadas em nodos MicaZ, utilizando efetivamente o novo período de tempo para a terceira classe de nodos: *i) BloCACK*, *ii) Mestre/Escravo* e *iii) TDMA Redundante*. Essas técnicas foram submetidas a ensaios experimentais e várias análises realizadas podem embasar o planejamento de protocolos de redes com propostas para incrementar a tolerância a falhas nas mesmas.

Outra contribuição diz respeito à ampliação de classes de nodos presentes numa rede IEEE 802.15.4. A ideia básica é agregar mais uma classe de nodos à classe já existente nas redes IEEE 802.15.4 no modo com *beacon*. Um período de tempo exclusivo aos nodos desta classe é proposto, sendo que esse período de tempo é compartimentado, garantindo assim o acesso ao meio físico, além de permitir a implementação de mecanismos de retransmissão de mensagens em redes sujeitas à perda de pacotes, como são as redes industriais.

7.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas com o desenvolvimento dessa tese foram:

- A técnica NetCOMeR apresentou um comportamento satisfatório em todos os quesitos testados: *i) taxa de sucesso de mensagens*, *ii) uso do meio*, *iii) atraso médio* e *iv) consumo energético*.
- A técnica NetCOMeR também apresentou um comportamento satisfatório quando empregada na topologia *cluster-tree*, seja com relação à taxa de sucesso ou à energia consumida.
- A codificação de rede se mostrou viável em arquiteturas de nodos de RSSF, mesmo com suas restrições de *hardware*. Ensaios com diferentes arquiteturas de nodos foram realizados e mostraram claramente esta viabilidade.
- As técnicas de cooperação ampliam a robustez da rede, no sentido de permitir maior diversidade espacial na comunicação mútua.

Característica esta não nativa nos nodos das RSSF.

- A diversidade temporal nas mensagens mais críticas da rede (ex. alarmes) deve ser utilizada, sempre que possível. Esta diversidade amplia consideravelmente a robustez quanto a perda de mensagens na rede.
- No projeto de novos protocolos de rede deve-se ter especial atenção à quantidade de troca de mensagens dentro desse protocolo, principalmente nos casos onde a rede está submetida a altas taxas de perda de mensagens. Mostra-se que o encadeamento/interdependência de mensagens, leva a uma reação em cadeia de perda de mensagens, podendo tornar a rede praticamente inoperante.
- Existe a necessidade premente do desenvolvimento de mecanismos para ampliar a capacidade de integração das RSSF IEEE 802.15.4 no ambiente industrial. Apresentou-se um mecanismo de expansão de classes de nodos que atende este requisito. Ensaios foram realizados com algumas técnicas de retransmissão de mensagens mostrando os ganhos de desempenho obtidos em relação ao comportamento padrão dos nodos IEEE 802.15.4.

7.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

As principais contribuições desta tese são:

- **Proposição e implementação da técnica NetCOMeR.** Esta é sem dúvida a principal contribuição dessa tese. Esta técnica é original e foi construída baseada nas deficiências e qualidades observadas nas demais técnicas implementadas. O NetCOMeR introduz implementações e usos inovadores de alguns mecanismos, objetivando o aumento da robustez da rede:
 - ✓ Uso da cooperação em RSSF para aumento da diversidade espacial;
 - ✓ Algoritmo oportunista para escolha dos nodos cooperantes, que considera a qualidade do enlace e a quantidade adequada de nodos necessários para retransmissão de mensagens;
 - ✓ Algoritmo oportunista que reduz o uso do meio, baseado na quantidade de nodos cooperantes escolhidos;

- ✓ Uso da codificação de rede como mecanismo de redução na retransmissão de mensagens;
 - ✓ Uso da diversidade temporal como mecanismo de fortalecimento na taxa de sucesso de mensagens de controle.
- **Comprovação da factibilidade da codificação de rede em nodos de RSSF.** Sabidamente, os nodos das RSSF possuem um hardware limitado, o que leva a dúvidas quanto à implementação da codificação de rede nesses dispositivos, dada a demanda computacional exigida por essa técnica. Nessa tese foram mostradas várias arquiteturas que suportam satisfatoriamente a codificação de rede em corpos finitos de tamanho \mathbb{F}_{2^8} .
 - **Proposição da terceira classe de nodos.** Nas redes IEEE 802.15.4, no modo com *beacon* nativamente existem dois tipos de nodo: os que utilizam o GTS e os que não utilizam. Os que utilizam o GTS têm o acesso ao meio garantido através do uso de um compartimento de tempo exclusivo. Os que não o usam são desprovidos de quaisquer garantias no acesso ao meio. Um problema na alocação de GTS é a sua quantidade, limitada em 7 pela norma, o que pode ser insuficiente para uma rede industrial. A terceira classe vem ao encontro desta demanda industrial, ampliando o número de nodos com acesso garantido ao meio e prevenindo a possibilidade de implementação de novos mecanismos de retransmissão de mensagens.
 - **Análise de técnicas tradicionais de retransmissão de mensagens.** A implementação e análise comparativa dessas técnicas fornece subsídios para o desenvolvimento/aprimoramento de protocolos para ambientes industriais.
 - **Sistema de medição de energia.** Um dos quesitos mais importantes das RSSF é minimizar o consumo energético dos seus nodos. Para proceder a medição desse consumo energético durante a operação de nodos em determinados protocolos, foi proposto um sistema de medição de energia de baixo custo e adaptável aos mais diversos nodos.

7.4 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESSA TESE

As publicações decorrentes diretamente dessa tese foram:

- Periódico:
 - ✓ Odilson T. Valle, C. Montez, G.M. Araújo, Paulo Portugal, Francisco Vasques. Enhancing Wireless Sensor Network Simulators with a Realistic Battery Discharge Function. *Information (Yamaguchi)*, v. 16, p. 8767–8780, 2013.
- Congressos:
 - ✓ Odilson T. Valle, André V. Milack, Carlos Montez, Paulo Portugal, Francisco Vasques. Experimental Evaluation of Multiple Retransmission Schemes in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks. *Proceedings of Factory Communication Systems (WFCS), 2012 9th IEEE International Workshop on.* p. 201–210, 2012.
 - ✓ Odilson T. Valle, André V. Milack, Carlos Montez, Paulo Portugal, Francisco Vasques. Uma nova classe de mensagens para redes IEEE 802.15.4. *Anais do XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações.* 2012.
 - ✓ Odilson T. Valle, Carlos Montez, Paulo Portugal, Francisco Vasques, Daniel G. Expansion of the available Use Classes in IEEE 802.15.4 Networks for usage in the industrial environment. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Wireless Communication Systems.* p. 131–135, 2012.
- Capítulo de livro:
 - ✓ Odilson T. Valle, C. Montez, G.M. Araújo, Paulo Portugal, Francisco Vasques. Polynomial Approximation of the Battery Discharge Function in IEEE 802.15.4 Nodes: Case Study of MicaZ. *Advances in Information Systems and Technologies.* Springer Berlin Heidelberg. p. 901–910, 2013.

7.5 TRABALHOS FUTUROS

A ideia central dos trabalhos futuros é a expansão do modelo NetCOMeR, visando atender demandas não tratadas nessa tese de teses mas que podem ampliar seu uso nas mais diferentes áreas.

A Figura 14 (Capítulo 4) ilustra os possíveis estados dos nodos no NetCOMeR. No entanto, nem todos os mecanismos e políticas referentes às transições entre os estados são descritos nesta tese. Por exemplo, os mecanismos e políticas associados à transição que envolvam nodos

inoperantes (ex. tempo máximo de queda de um enlace para um nodo ser classificado como inoperante) é uma proposta de trabalho futuro.

Outra questão importante que deve ser considerada é análise das consequências de possíveis mudanças para um corpo de tamanho menor. Qual o critério para a escolha do tamanho do corpo? Qual seria o impacto energético com a alteração frente a atual implementação?

Nesse tese uma questão importante é a determinação de quais nodos devem cooperar, na atual abordagem foi levado em consideração somente a qualidade do enlace entre o possível nodo cooperante e o coordenador, bem como o histórico de transmissão com sucesso desse nodo. Deve-se fazer um estudo para ampliar escolha considerando ainda outros critérios, como por exemplo:

- O índice de vizinhança de um determinado nodo, quando mais vizinhos (boa qualidade de comunicação) possuir um nodo mais chances ele terá de ser escolhido.
- Nodos mais “próximos” de nodos com baixo histórico de transmissão devem ser escolhidos.
- Levar em consideração a disponibilidade energética dos nodos para a escolha como cooperantes, os nodos com maior carga energética devem ser escolhidos. Isto pode ser obtido, por exemplo, por variações dos algoritmos apresentados em Iyer e Kleirock (2003) e Ayers (2011). Esses algoritmos são distribuídos e permitem, conseqüentemente, decisões distribuídas, diferentemente da abordagem dessa tese que centralizou essa decisão.
- Seja quais forem os parâmetros a serem considerados, dever-se-ia utilizar métodos, matemáticos ou algorítmicos, para escolha ótima dos mesmos.

Uma importante contribuição dessa tese foi a verificação dos ganhos obtidos com a diversidade temporal do *beacon*. Essa diversidade poderia ser testada com outras técnicas que não possuam conteúdo com dados dinâmicos, como por exemplo, com o TDMA Redundante.

Para finalizar, numa outra frente de trabalho, em redes densas e com nodos de baixa capacidade computacional, pode-se explorar a cooperação pura (sem codificação) entre nodos, com algum algoritmo próprio para escolha dos nodos cooperantes que simplesmente retransmitiriam as mensagens recebidas. Essa abordagem pode se apresentar como uma boa estratégia para alguns cenários e tem como vantagem menor custo computacional para os nodos envolvidos, quando comparado à aplicação de técnicas de codificação de rede.

REFERÊNCIAS

- ABOUELSEUD, M.; NOSRATINIA, A. Opportunistic wireless relay networks: Diversity-multiplexing tradeoff. *CoRR*, abs/1104.4491, 2011.
- AGHA, K. A. et al. Which Wireless Technology for Industrial Wireless Sensor Networks? The Development of OCARI Technology. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, v. 56, n. 10, p. 4266–4278, 2009.
- AHLWEDE, R.; LI, S.-Y.; YEUNG, R. Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 46, n. 4, p. 1204–1216, jul. 2000. ISSN 00189448. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=850663>>.
- AKYILDIZ, I. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, v. 38, n. 4, p. 393–422, mar. 2002. ISSN 13891286. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389128601003024>>.
- ANASTASI, G.; CONTI, M.; Di Francesco, M. A Comprehensive Analysis of the MAC Unreliability Problem in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 7, n. 99, p. 1–1, 2011. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5613224>.
- AYERS, M. Gureen Game: An energy-efficient QoS control scheme for wireless sensor networks. *2011 International Green Computing Conference and Workshops*, Ieee, p. 1–8, jul. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6008613>>.
- BAILLIEUL, J.; ANTSAKLIS, P. J. Control and Communication Challenges in Networked Real-Time Systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 1, p. 9–28, jan. 2007. ISSN 0018-9219. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4118454>>.
- BALOCHIAN, S.; BALOOCHIAN, H. Optimal Data Spreading in Sensor Networks Using Network Coding. *Advances in Information Technology and Management*, v. 1, n. 1, p. 28–32, 2012. Disponível em:

<<http://www.worldsciencepublisher.org/journals/index.php/AITM/article/view/203>>.

BOSE, B. Wireless Broadcast Using Network Coding. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 58, n. 2, p. 914–925, fev. 2009. ISSN 0018-9545. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4549741>>.

CENA, G.; VASQUES, F. Guest editorial special section on communication in automation mdash;part i. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, v. 4, n. 1, p. 2–5, Feb 2008. ISSN 1551-3203.

CHANG, C.-C.; NAGEL, D. J.; MUFTIC, S. Assessment of Energy Consumption in Wireless Sensor Networks: A Case Study for Security Algorithms. *2007 IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*, Ieee, p. 1–6, out. 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4428758>>.

CHEN, F. et al. Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 LR-WPAN for Industrial Applications. *2008 Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services*, IEEE, p. 89–96, jan. 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4459361>>.

CHEN, Y.; ZHANG, J.; MARSIC, I. Link-layer-and-above diversity in multihop wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 47, n. 2, p. 118–124, fev. 2009. ISSN 0163-6804. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4785389>>.

CHOU, P.; WU, Y. Practical network coding. *of the Annual Allerton Conference on*, 2003. Disponível em: <<http://web.ics.purdue.edu/~kim309/seminar/chou03practical.pdf>>.

CO., E. B. *Eveready 1215*. mar. 2011. Disponível em: <<http://data.energizer.com/PDFs/1215.pdf>>.

COMMUNITY, O. *OMNeT++*. set. 2011. Disponível em: <<http://www.omnetpp.org/>>.

EATON, J. W. *GNU Octave*. maio 2011. Disponível em: <<http://www.gnu.org/software/octave/>>.

- EBERT, J.; WILLIG, A. A Gilbert-Elliot bit error model and the efficient use in packet level simulation. *TKN Tech Rep TKN99002*, Berlin, p. 31, 1999. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.36.4113>>.
- ESTRIN, D. et al. Instrumenting the physical world with pervasive networks. *Pervasive Computing*, 2002. Disponível em: <http://www2.parc.com/spl/members/zhao/stanford-cs428/readings/General/Estrin_IEEE-physical-jan24.pdf>.
- FARINES, J.-M.; FRAGA, J. da S.; OLIVEIRA, R. S. de. *Sistemas de Tempo Real*. São Paulo-SP: 12 Escola de Computação, IME-USP, 2000.
- FRAGOULI, C. et al. Wireless Network Coding: Opportunities & Challenges. *MILCOM 2007 - IEEE Military Communications Conference*, Ieee, p. 1–8, out. 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4454988>>.
- FRAGOULI, C.; Le Boudec, J.; WIDMER, J. Network coding: an instant primer. *Computer Communication Review*, Citeseer, v. 36, n. 1, p. 63, 2006. ISSN 0146-4833. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.127.8036&rep=rep1&type=pdf>>.
- FRAGOULI, C.; SOLJANIN, E. Network Coding Fundamentals. *Foundations and Trends in Networking*, v. 2, n. 1, p. 1–133, 2006. ISSN 1554-057X. Disponível em: <<http://www.nowpublishers.com/product.aspx?product=NET&doi=1300000003>>.
- GIRS, S.; UHLEMANN, E.; BJORKMAN, M. The effects of relay behavior and position in wireless industrial networks. In: *2012 9th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*. Ieee, 2012. p. 183–190. ISBN 978-1-4673-0692-8. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6242566>>.
- GNUPLOT. *gnuplot homepage*. out. 2010. Disponível em: <<http://www.gnuplot.info/>>.
- GUNGOR, V.; HANCKE, G. Industrial wireless sensor networks: challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE*

Transactions on Industrial, v. 56, n. 10, p. 4258–4265, 2009. Disponível em: <<http://repository.up.ac.za/dspace/handle/2263/13189>>.

HANZALEK, Z.; JURCIK, P. Energy efficient scheduling for cluster-tree Wireless Sensor Networks with time-bounded data flows: application to IEEE 802.15. 4/ZigBee. *Industrial Informatics, IEEE ...*, v. 6, n. 3, p. 438–450, ago. 2010. ISSN 1551-3203. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5475355> http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5475355>.

HERGENRODER, A.; WILKE, J.; MEIER, D. Distributed Energy Measurements in WSN Testbeds with a Sensor Node Management Device (SNMD). *Architecture of Computing Systems (ARCS), 2010 23rd International Conference on*, p. 1–7, 2010. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5759025>.

HERNÁNDEZ, A.; PARK, P. *IEEE 802.15. 4 Implementation based on TKN15. 4 using TinyOS*. Stockholm, 2011. 64 p. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:IEEE+802.15.4+Implementation+based+on+TKN15.4+using+TinyOS#0>>.

HO, T. et al. A random linear network coding approach to multicast. *IEEE TRANS. INFORM. THEORY*, v. 52, n. 10, p. 4413–4430, 2006.

HOU, I.-H. et al. AdapCode: Adaptive Network Coding for Code Updates in Wireless Sensor Networks. *2008 IEEE INFOCOM - The 27th Conference on Computer Communications*, Ieee, p. 1517–1525, abr. 2008. ISSN 0743-166X. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4509806>>.

IEC. *IEC 62591: Industrial communication networks - Wireless communication network and communication profiles - WirelessHART*. [S.l.], dez. 2009. v. 1, 427 p.

IEEE. *IEEE P802.15.4e/D0.01 Draft Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between system - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer*. New York, 2010. 186 p.

IEEE. *IEEE 802.15.4 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. New York: [s.n.], 2011. 314 p. ISBN 9780738166834.

IEEE. *IEEE 802.15.4e-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011) IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)—Amendment 1: MAC sublayer*. New York: IEEE, 2012. 225 p. ISBN 9780738172040.

INC., M. T. *ZENA Wireless Network Analyzer User's Guide*. jun. 2010. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ZENA%20Analyzer%20Users%20Guide%2051606b.pdf>>.

INDUSTRIAL_WIRELESS_COMMUNITY. *Industrial wireless technology for the 21st century*. San Francisco, California, 2002. 50 p.

INSTRUMENTS, N. *Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW*. mar. 2011a. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/pt/>>.

INSTRUMENTS, N. *Digital Multimeter*. mar. 2011b. Disponível em: <<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?cc=BR&lc=por&ckey=1000001295:epsg:pro&nid=-33228.536880933.00&id=1000001295:epsg:pro&cmpid=90131>>.

INSTRUMENTS, N. *NI PCI-6251 16-Bit, 1 MS/s (Multichannel), 1.25 MS/s (1-Channel), 16 Analog Inputs*. mar. 2011c. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/14124>>.

INSTRUMENTS, N. *NI USB-6008 DAQ multifuncional de baixo custo, 10 kS/s, 12 bits*. mar. 2011d. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/201986>>.

ISA. ISA100.11a, Release 1 - An Update on the First Wireless Standard Emerging from the Industry for the Industry. *ISA*, 2007.

ISA. *ISA-100.11a-2011 Wireless systems for industrial automation: Process control and related applications*. [S.l.]: ISA, 2011. 792 p. ISBN 9781936007967.

IYER, R.; KLEINROCK, L. QoS control for sensor networks. *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC '03.*, Ieee, v. 1, p. 517–521, 2003. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1204230>>.

JONSSON, M.; KUNERT, K. Towards Reliable Wireless Industrial Communication With Real-Time Guarantees. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 5, n. 4, p. 429–442, 2009.

KARL, H.; WILLIG, A. Protocols and architectures for wireless sensor networks. In: . John Wiley & Sons, Ltd, 2007. p. 497. ISBN 0-470-09510-5. Disponível em: <<http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470095105.html>>.

KATTI, S. et al. XORs in the air: practical wireless network coding. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, v. 16, n. 3, p. 497–510, jun. 2008. ISSN 1063-6692. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4512941&tag=1>.

KATTI, S. et al. XORs in the Air: Practical Wireless Network Coding. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, v. 36, n. 4, p. 243–254, jun. 2006. ISSN 1063-6692. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1159913.1159942>>.

KELLER, L. et al. Sensecode: Network coding for reliable sensor networks. *ACM Trans. Sen. Netw.*, ACM, New York, NY, USA, v. 9, n. 2, p. 25:1–25:20, abr. 2013. ISSN 1550-4859. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2422966.2422982>>.

KOUBAA, A. et al. Improving the IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA MAC for Time-Critical Events in Wireless Sensor Networks. In: Jean-Dominique Decotignie. *Proceedings of the Workshop of Real-Time Networks (RTN 2006), Satellite Workshop to ECRTS 2006*. Dresden, Germany, 2006. Disponível em: <<https://hal.inria.fr/inria-00114519>>.

KOUBAA, A.; ALVES, M.; TOVAR, E. Gts allocation analysis in ieee 802.15.4 for real-time wireless sensor networks. In: *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2006. IPDPS 2006. 20th International*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 8 pp.–.

KOUBAA, A.; CUNHA, A. A time division beacon scheduling mechanism for IEEE 802.15. 4/Zigbee cluster-tree wireless sensor networks. In: *Real-Time Systems, 2007. ECRTS '07. 19th Euromicro Conference on*. [s.n.], 2007. p. 125–135. ISSN 1068-3070. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4271687>.

- KRÄMER, M.; GERALDY, A. Energy measurements for micaz node. *GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensor-netze*, p. 61–68, 2006. Disponível em: <<http://vs.cs.uni-kl.de/en/publications/2006/KrGe06/energy.pdf>>.
- KRISHNAMURTHY, L. et al. Design and deployment of industrial sensor networks: experiences from a semiconductor plant and the north sea. In *Sensys'05: Proceedings of the 3rd international*, p. 64–75, 2005. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1098918.1098926>>.
- KUNERT, K.; UHLEMANN, E.; JONSSON, M. Predictable real-time communications with improved reliability for IEEE 802.15. 4 based industrial networks. In: *Proc. 8th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2010)*. Nancy: IEEE, 2010. p. 13–22. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5548639>.
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. *Redes de Computadores e a Internet: Uma abordagem top-down*. Trad. 6 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda., 2014.
- LEWIS, F. L. Wireless sensor networks. In: DAS, D. C.; S.K. (Ed.). *Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications*. New York: John Wiley, 2004. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=706478>.
- LI, S.; YEUNG, R.; CAI, N. Linear network coding. *Information Theory, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 49, n. 2, p. 371–381, 2003. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1176612>.
- LI, Y. et al. Real-time QoS support in wireless sensor networks: a survey. *Solutions*, 2007. Disponível em: <<http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00188265/>>.
- MAINWARING, A. et al. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*. New York: ACM, 2002. p. 88–97. ISBN 1581135890. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=570751>>.
- MEMSIC, I. *MICAZ datasheet*. jun. 2010. Disponível em: <http://www.memsic.com/userfiles/files/DataSheets/WSN/micaz_datasheet-t.pdf>.

MOGHE, R. et al. A scoping study of electric and magnetic field energy harvesting for wireless sensor networks in power system applications. *Energy Conversion*, p. 3550–3557, 2009. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5316052>.

NOBRE, M. et al. Towards a WirelessHART module for the Ns-3 Simulator. In: *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010 IEEE Conference on*. IEEE, 2010. p. 1–4. ISSN 1946-0740. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5641011>.

NOSRATINIA, A.; HUNTER, T.; HEDAYAT, A. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 10, p. 74–80, out. 2004. ISSN 0163-6804. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1341264>>.

PINTO, A.; MONTEZ, C. Decentralized Power Aware Approach for Data Fusion in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks. *2012 Second Brazilian Conference on Critical Embedded Systems*, Ieee, p. 64–69, maio 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6227658>>.

PROJECT, U. B. W. *nesC: A Programming Language for Deeply Networked Systems*. jun. 2010. Disponível em: <<http://nesc.sourceforge.net/>>.

RAKHMATOV, D.; VRUDHULA, S.; WALLACH, D. A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, v. 11, n. 6, p. 1019–1030, dez. 2003. ISSN 1063-8210. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1255477>>.

REBELATTO, J. L. *Codificação de rede baseada em códigos corretores de erros clássicos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ROUT, R. R.; GHOSH, S. K. Enhancement of Lifetime using Duty Cycle and Network Coding in Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 12, n. 2, p. 656–667, fev. 2013. ISSN 1536-1276. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6399490>>.

RUIZ, L. B. et al. Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fio. In: *22 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 167 – 218.

SEMICONDUCTORS, Z. *ZXCT1022 Low offset high-side current monitor*. mar. 2011. Disponível em: <<http://www.diodes.com/datasheets/ZXCT1022.pdf>>.

SEMPREBOM, T. et al. Distributed DBP: a (m, k)-firm based distributed approach for QoS provision in IEEE 802.15. 4 networks. In: *Emerging Technologies Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference on*. [S.l.: s.n.], 2009a. p. 1–8.

SEMPREBOM, T. et al. Dynamic GTS Scheduling of Periodic Skip-pable Slots in IEEE 802.15. 4 Wireless Sensor Networks. In: *8th IFAC International Conference on Fieldbuses and Networks in Industrial and Embedded Systems (2009)*. [s.n.], 2009b. p. 110–117. Disponível em: <http://www.fe.up.pt/si/publs_pesquisa.FormView?P_ID=18100>.

SHARMA, A. B.; GOLUBCHIK, L.; GOVINDAN, R. Sensor Faults: Detection Methods and Prevalence in Real-World Datasets. *ACM Transactions on Sensor Networks*, v. 6, n. 3, p. 1–39, 2010. ISSN 15504859. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1754414.1754419>>.

TINYOS. *TinyOS*. jun. 2010. Disponível em: <<http://www.tinyos.net/>>.

TOSCANO, E.; Lo Bello, L. Multichannel Superframe Scheduling for IEEE 802.15. 4 Industrial Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 58, 2011. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6009195>.

VALLE, O. T. et al. Experimental Evaluation of Multiple Retransmission Schemes in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of Factory Communication Systems (WFCS), 2012 9th IEEE International Workshop on*. Lemgo/Detmold: [s.n.], 2012a. p. 201–210. ISBN 978-1-4673-0693-5. Disponível em: <<http://www.hs-owl.de/init/wfcs2012/admin/index.php>>.

VALLE, O. T. et al. Uma nova classe de mensagens para redes IEEE 802.15.4. In: *Anais do XXX SIMPOSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICACOES*. [S.l.: s.n.], 2012b. ISBN 978-85-89748-07-0.

VALLE, O. T. et al. Polynomial Approximation of the Battery Discharge Function in IEEE 802.15.4 Nodes: Case Study of MicaZ. In: Rocha, Álvaro and Correia, Ana Maria and Wilson, Tom and Stroetmann, K. A. (Ed.). *Advances in Information Systems and Technologies*. Algarve, Portugal: Springer Berlin Heidelberg, 2013a. p. 901–910. ISBN 978-3-642-36980-3. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-36981-0_84>.

VALLE, O. T. et al. Enhancing Wireless Sensor Network Simulators with a Realistic Battery Discharge Function. *Information (Yamaguchi)*, v. 16, p. 8767–8780, 2013b.

VALLE, O. T. et al. Expansion of the available Use Classes in IEEE 802.15.4 Networks for usage in the industrial environment. In: *Proceedings of the Ninth International Symposium on Wireless Communication Systems*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 131–135. ISBN 978-1-4673-0761-1. ISSN 2154-0217.

VITTURI, S.; TRAMARIN, F.; SENO, L. Industrial Wireless Networks: The Significance of Timeliness in Communication Systems. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, v. 7, n. 2, p. 40–51, 2013.

WANG, J. et al. An efficient reliable communication scheme in wireless sensor networks using linear network coding. *IJDSN*, v. 2012, 2012. Disponível em: <<http://dblp.uni-trier.de/db/journals/ijdsn/ijdsn2012.html#WangWZZJ12>>.

WANG, S. et al. Network coding over connected dominating set: energy minimal broadcasting in wireless ad hoc networks. *Wireless Networks*, Springer US, v. 20, n. 5, p. 1023–1036, 2014. ISSN 1022-0038. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11276-013-0648-z>>.

WEST, D. B. *Introduction to Graph Theory*. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2000. ISBN 0130144002.

WILLIG, A. Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 4, n. 2, p. 102–124, 2008.

WILLIG, a. et al. Measurements of a wireless link in an industrial environment using an IEEE 802.11-compliant physical

layer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 49, n. 6, p. 1265–1282, dez. 2002. ISSN 0278-0046. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1097747>>.

WILLIG, a.; MATHEUS, K.; WOLISZ, a. Wireless Technology in Industrial Networks. *Proceedings of the IEEE*, v. 93, n. 6, p. 1130–1151, jun. 2005. ISSN 0018-9219. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1435743>>.

WILLIG, A.; SHAH, R. Altruists in the PicoRadio sensor network. In: *Proceedings of 4th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*. Ieee, 2002. p. 175–184. ISBN 0-7803-7586-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1159715> http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1159715>.

XIAO, M.; SKOGLUND, M. M-user cooperative wireless communications based on nonbinary network codes. In: *Networking and Information Theory, 2009. ITW 2009. IEEE Information Theory Workshop on*. IEEE, 2009. p. 316–320. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5158594>.

YAN, Y. et al. Mechanism for Coding-Aware Opportunistic Retransmission in Wireless Networks. *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, IEEE, p. 1–6, nov. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5425249>>.

YONEKI, E.; BACON, J. *A survey of Wireless Sensor Network technologies: research trends and middleware's role*. Cambridge, 2005. v. 1, n. 646, 46 p. Disponível em: <<http://www.cl.cam.ac.uk/TechReports/UCAM-CL-TR-646.html> <http://www.mendeley.com/research/survey-wireless-sensor-network-technologies-research-trends-middleware-s-role/>>.

YOO, S.-e. et al. Guaranteeing Real-Time Services for Industrial Wireless Sensor Networks with IEEE 802.15. 4. *IEEE Transactions on Industrial*, n. c, p. 1–9, 2009. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Guaranteeing+Real-Time+Services+for+Industrial+Wireless+Sensor+Networks+with+IEEE+802.15.4#0>>.

ZB.NET. open. *OpenSource Toolset for IEEE 802.15.4 and ZigBee*. jun. 2010. Disponível em: <<http://www.open-zb.net/>>.

ZHANG, S.; LIEW, S. C.; LAM, P. P. Hot topic: Physical-layer network coding. In: *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York, NY, USA: ACM, 2006. (MobiCom '06), p. 358–365. ISBN 1-59593-286-0. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1161089.1161129>>.

ZVEI. *Coexistence of Wireless Systems in Automation Technology. Explanations on reliable parallel operation of wireless radio solutions*. [S.l.], 2009. 20 p.

**APÊNDICE A – Sistema para Medição de Consumo
Energético**

Nas RSSF o consumo energético sempre é um fator determinante na concepção dos sistemas a embutir. Nesse sentido, existem algumas propostas que realizam essa medição durante o funcionamento regular da rede, já que usualmente os nodos são equipados com sensores da tensão de suas baterias, como é o caso dos nodos MicaZ. Entretanto, esse tipo de mecanismo de monitoramento faz crescer o consumo energético do próprio nodo, degradando sua vida útil e da rede em que está inserido, além de mascarar os dados do consumo energético do protocolo sob análise. Então, há a necessidade de um sistema para a medição do consumo energético do nodo que não interfira no funcionamento padrão do mesmo.

Um bom sistema de medição de consumo energético é fundamental para comprovar modelos teóricos e/ou simulados em testes experimentais. Este sistema deve ter baixo custo, ser de fácil construção e operação. O sistema deve também permitir coleta e armazenamento de dados de forma autônoma, de tal maneira a permitir ensaios exaustivos e de longa duração, sem a necessidade da presença constante de um operador.

Nesse sentido, nesse apêndice é proposto um sistema de medição do consumo energético que pode ser diretamente acoplado a um nodo sensor qualquer. O intuito é que se possa proceder a medição do consumo energético de um nodo durante sua operação normal, sem interferir em seu funcionamento e sem a necessidade da presença de algoritmos de monitoramento energético no próprio nodo.

Na literatura são encontrados alguns trabalhos que apresentam propostas para este tipo de sistema de medição, alguns de destaque são apresentados a seguir. Estes trabalhos deram subsídios para montagem da proposta apresentada nesse capítulo.

Em Hergenroder, Wilke e Meier (2010) foi proposto o *Sensor Node Management Device* (SNMD), um sistema de monitoramento energético completo para RSSFs. Foi projetado um dispositivo de gerenciamento de nodo sensor que é acoplado a um MicaZ e a um PC, via porta USB, permitindo o monitoramento do consumo energético do nodo bem como o de outras características. Como todos os dispositivos da RSSF podem ser facilmente monitorados, desde que se disponha de tantos dispositivos quanto nodos, pode-se montar uma bancada de teste que monitore cada nodo individualmente e, conseqüentemente, a rede como um todo. Por ser um sistema bastante completo, complexo e caro, permite também controlar individualmente cada nodo tanto no sentido de reprogramá-lo, des/ligá-lo bem como simular as baterias (descarga) do nodo. Uma das limitações é que possui um soquete para conexão

dos nodos, ou seja, somente nodos com o mesmo tipo de soquete é que poderão ser submetidos ao ensaio, MicaZ no caso.

No trabalho Chang, Nagel e Muftic (2007) é proposto um sistema para avaliação de consumo energético em RSSF similar ao aqui proposto, mas com duas diferenças fundamentais daquela proposta: *i*) o instrumento de medição é um osciloscópio que deve ter conexão com um PC, o que nem sempre é usual em laboratórios com equipamentos mais antigos e normalmente apresenta um alto custo; *ii*) o resistor de sensoriamento utilizado é de 10Ω , valor que é dez vezes maior que o utilizado nesse trabalho e apresenta uma queda de tensão proporcionalmente maior, o que prejudica a precisão da medição.

O sistema de medição não foi a principal preocupação no trabalho Krämer e Geraldly (2006) mas sim a medida do consumo energético de alguns modos de operação e subsistemas do MicaZ. Para tal foi utilizado um osciloscópio digital incluindo um regulador DC/DC para medir o consumo energético do nodo. Foram medidos o consumo energético de alguns modos de operação do processador, bem como do transceptor de rádio e dos LEDs. Estas medições tiveram influência nesse trabalho onde foram repetidos alguns ensaios e medições específicas para os dispositivos disponíveis.

A ideia central em Rakhmatov, Vrudhula e Wallach (2003) foi criar um modelo genérico para análise da vida útil de bateria, direcionado a qualquer tipo de dispositivo eletrônico. Uma série de análises foram feitas e os resultados comparados com um simulador de baixo nível, DUALFOIL, e com a medição de baterias reais. Os resultados obtidos mostraram que com este modelo é possível prever a vida útil para um determinado conjunto de baterias com um balanço entre precisão e carga computacional.

A.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO

Dado as necessidades de comparação do consumo energético dos nodos quando trabalhando nas diversas técnicas, foi necessário o projeto e implementação de um sistema de medição de consumo energético dos nodos. O objetivo foi construir um sistema simples, de fácil implementação e de baixo custo. A ideia é que todos os componentes devam ser facilmente acessíveis e disponíveis em boa parte dos laboratórios de eletrônica.

O modelo do sistema de medição proposto é apresentado na Figura 46, onde o nodo sob análise tem sua tensão (\mathbf{V}_n) e corrente (\mathbf{I}_s)

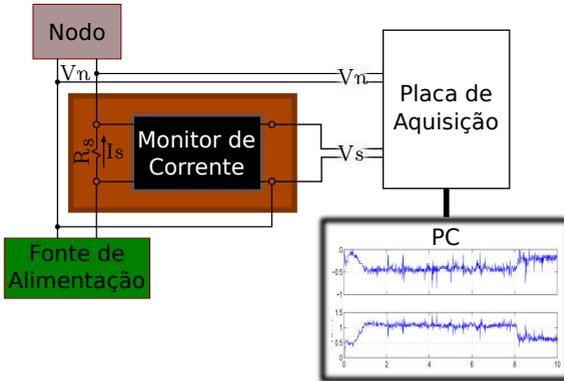


Figura 46: Sistema de medição de consumo energético.

fisicamente medidas de tal maneira a possibilitar o cálculo da potência consumida ($P = 1/T \int_0^T V(t)I(t) dt$).

A Placa de Aquisição faz amostragens dos valores de tensão e corrente, converte-os para valores binários e os transmite ao PC (*Personal Computer*). No PC, com um sistema de coleta de dados pode-se programar a frequência de amostragem e então o armazenamento destes valores associado ao tempo de cada amostra (como a Placa de Aquisição está conectada ao PC a base de tempo é comum). De posse dos dados armazenados é possível usar-se um sistema para processamento e tratamento de dados e, por conseguinte, determinar a potência e energia consumida pelo nodo ($E = p \cdot \Delta t$) durante um determinado intervalo de tempo e/ou de uma determinada operação que o nodo esteja executando.

O nodo sob medição é utilizado sem qualquer modificação a não ser o interrompimento da ligação do polo positivo da alimentação para inserção do monitor de corrente. A alimentação pode ser realizada normalmente, por meio de baterias, ou com alimentação através de uma fonte DC, neste caso permitindo um monitoramento contínuo do nodo, sem a preocupação com o nível de carga das baterias.

A.1.1 Circuito monitor de corrente

Para permitir a fácil aquisição dos dados num PC, optou-se pelo uso um monitor de corrente de alta precisão – ZXCT1022 (SEMICONDUCTORS, 2011). Este tipo de dispositivo converte valores de cor-

rente em valores equivalentes de tensão. Isto permite o uso de placas de aquisição de dados comuns que, normalmente, conseguem capturar somente valores de tensão.

A utilização desse tipo de dispositivo elimina a necessidade de interromper o plano de terra no monitoramento de uma corrente de carga. Além disso o ZXCT1022 proporciona um ganho fixo de 100 vezes, ideal para aplicações onde a sensibilidade a tensões muito baixas é necessária, como é o caso de nodos das RSSF. O ZXCT1022 possui uma tensão de *offset* muito baixa, permitindo uma precisão típica de 3% para tensões de 10 mV, segundo o fabricante. Este componente tem como tensão mínima de entrada 2,5 V, o que atende as especificações da maioria dos nodos sensores como, por exemplo, o MicaZ (MEMSIC, 2010) que possui um tensão de operação mínima de 2,7 V, segundo seu fabricante.

Em nosso sistema utilizou-se um resistor de sensoriamento – R_s – de precisão com valor nominal de 1 Ω sendo, portanto, o V_s equivalente a 100 vezes o valor de I_s . Para o caso do MicaZ a corrente no modo *sleep* (caso crítico) é anunciada como sendo 1 μA , o que equivalerá a uma tensão de 0,1 mV, que está acima da mínima sensibilidade nominal de tensão admitida pela placa de aquisição utilizada.

A.1.2 Placa de aquisição

Usar uma placa de aquisição de dados é uma opção que traz algumas vantagens: *i*) baixo custo, *ii*) sua integração direta com o PC que facilita a aquisição, armazenamento e manipulação dos dados e *iii*) a existência de vários canais de aquisição que permite o monitoramento de vários nodos simultaneamente, se houver interesse.

Objetivando a manipulação e contabilização dos dados, optou-se por usar uma placa de aquisição de dados – NI PCI-6251 (INSTRUMENTS, 2011c) ou NI USB-6008 (INSTRUMENTS, 2011d) – que converte os valores de tensão analógicos em valores digitais, com taxa de amostragem de até 1 MS/s (uma leitura a cada 1 μs) e sua transferência para o PC. A NI PCI-6251 é uma placa de aquisição multifunção de alta velocidade com 16-bit de resolução. Possui 16 entradas analógicas, o que é mais do que suficiente para a aquisição das duas tensões (V_n e V_s) em um nodo. É sensível a variações de até 6 μV que, nesse trabalho, é o equivalente a variações de corrente na ordem de 60 pA. No sistema de medição proposto, essa mesma placa pode ser utilizada para monitorar o consumo energético de até 8 nodos sensores simultaneamente, desde

que se disponha de 8 monitores de corrente.

A.1.3 PC

No PC, com a placa de aquisição devidamente instalada e configurada, é possível fazer-se um pequeno software numa linguagem qualquer para coleta e armazenamento dos dados. De posse dos dados armazenados é possível fazer-se todo o tipo de manipulação, de acordo com os objetivos.

Uma solução bastante simples é o tratamento dos dados numa planilha eletrônica, onde pode-se computar a potência instantânea de cada coleta e em seguida fazer-se, por exemplo, o cálculo da potência média consumida durante um determinado intervalo de tempo, significando, por exemplo, a recepção ou a transmissão de um dado. Após o tratamento dos dados pode-se fazer uso de um utilitário gráfico para gerar análises e comparativos de acordo com a necessidades, sendo um bom exemplo para isto o Gnuplot (GNU PLOT, 2010).

Uma outra possibilidade é o uso do software LabVIEW©(INSTRUMENTS, 2011a) que permite a execução de todas as etapas desde a coleta e armazenamento até a manipulação, tratamento e análise destes dados, através de uma interface simples e intuitiva.

A.2 CASO DE ESTUDO: MICAZ SOB O IEEE 802.15.4

O objetivo dessa seção é mostrar o funcionamento do sistema de medição de energia bem como apresentar resultados relevantes em seu uso. Para isto usou-se um nodo MicaZ rodando o micro-kernel TinyOS (TINYOS, 2010), versão 1.1.15. Sobre o TinyOS roda o OpenZB (ZB.NET., 2010) versão 1.2, que implementa a pilha de protocolos do IEEE 802.15.4. O sistema foi configurado para fazer 100 aquisições de dados por segundo, com algumas exceções explicitamente definidas.

Na Figura 47 são apresentadas as curvas de tensão e corrente de um nodo programado em vários modos de operação que são alterados a cada 60 s, intercalados por um modo econômico. O objetivo é verificar o consumo energético de um nodo submetido a várias configurações padrão definidas em seu software embutido.

O que é surpreendente é que (nessa configuração) o nodo não atende perfeitamente aos comandos e/ou não há uma mudança signi-

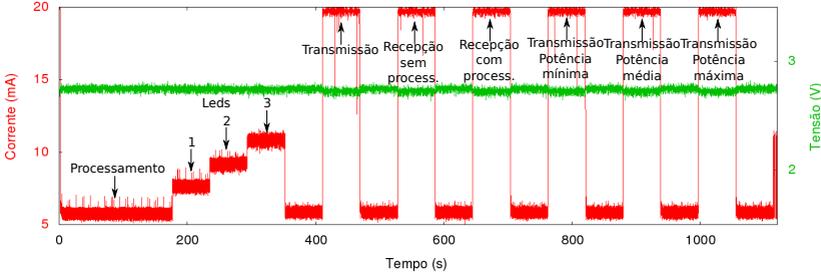


Figura 47: Corrente e tensão de um nó em diferentes estados de funcionamento.

ficativa na corrente consumida. Em primeiro lugar, o que se vê é que não há nenhuma mudança na corrente quando o nó é submetido ao processamento “pesado”, a explicação para isso pode ter três origens: ou o processador do nó está sempre ativo, pois o TinyOS é um sistema operacional baseado em eventos, ou seu consumo é insignificante quando comparado aos demais consumos ou o nó nunca é posto em modo de hibernação, mesmo que o programa seja escrito para isto.

Também é perceptível que cada LED é responsável pelo acréscimo de aproximadamente 1.6 mA ou, de outro modo, 4,3 mW. Ou seja, como é óbvio, não é recomendado o uso de LEDs em aplicações finais.

Um comportamento que chama atenção é observado nos modos com o rádio ligado, é claramente perceptível que seja qual for a potência ajustada, seja em modo de recepção ou transmissão a corrente drenada é a mesma. Analisando-se somente os modos de transmissão (últimos três picos) é visível que o sistema não responde aos pedidos de ajuste e potência de transmissão do rádio (`MCPS_DATA.setRFPower`) que admite valores entre 0 e 31. Nesse ensaio foram utilizados os valores 0 (mínimo), 15 (médio) e 31 (máximo).

Na Figura 48 pode-se observar o comportamento da descarga de um conjunto de baterias sob utilização no MicaZ e suas aproximações polinomiais relativas ao período de funcionamento normal. Nesse ensaio programou-se um nó para acender todos os três LEDs e para transmitir continuamente em potência máxima. O conjunto de baterias é formado por um par de pilhas comuns com composição zinco-carbono (CO., 2011), que possuem tipicamente carga nominal variando entre 635 a 1100 mAh, segundo os fabricantes. O objetivo de utilização desse tipo de bateria é encurtar o período do teste, já que são as que apre-

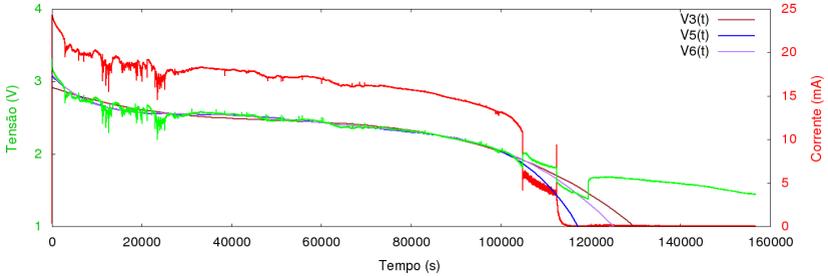


Figura 48: Curvas de descarga de um conjunto de baterias sob uso de um nodo.

sentam a menor carga inicial, mas que serve plenamente como exemplo de uso do sistema de medição. Nesse ensaio foi realizada uma coleta de dados a cada segundo.

As oscilações percebidas no período inicial das curvas de tensão e corrente (até ~ 25000 s) são típicas em curvas de descarga de baterias desse tipo. Para outros tipos de baterias o comportamento deve ser diferenciado.

A Figura 48 mostra que o nodo sob teste funcionou normalmente até aproximadamente 29 h (105.000 s), em que a corrente teve uma queda abrupta e a tensão deu um salto, e então entrou num modo de funcionamento irregular. Por volta de 31 h (112.500 s) o nodo praticamente deixou de drenar qualquer corrente, onde a tensão deu um novo salto e voltou a cair vagarosamente.

Analisando somente o período de funcionamento regular (normal), pode-se chegar a algumas conclusões. Primeiro, o nodo tem um comportamento tipicamente resistivo, ou seja, a medida que a tensão vai caindo, cai proporcionalmente a corrente. Isto indica claramente que não há qualquer regulador de tensão no mesmo, o que leva a comportamentos indesejados do tipo: quanto menor a tensão de entrada, menor a potência do sinal transmitido. Isto pode ser crítico onde os nodos trabalham no limite da distância de transmissão, levando a morte prematura da rede sem necessariamente o(s) nodo(s) estar(em) morto(s).

Outro fato que chama bastante a atenção é a não linearidade da queda de tensão. Existem vários trabalhos que propõe algoritmos de roteamento baseados na capacidade residual da bateria, como por exemplo os citados na Seção 11.3.1 do livro Karl e Willig (2007). Outros trabalhos utilizam este tipo de parâmetro para ajuste nos algoritmos

de fusão de dados, como por exemplo Pinto e Montez (2012). A maneira usual de obter o atual estado energético das baterias é pelo nível de tensão e, portanto, essa não linearidade pode provocar oscilações não desejadas nos algoritmos e dificultar sua convergência. Evidentemente esse tipo de não linearidade está diretamente relacionado ao tipo de bateria utilizado, deve-se fazer um levantamento prévio desse comportamento para o tipo de bateria a ser empregada ou projetar algoritmos que sejam imunes a oscilações de tensão, por exemplo, introduzindo algum grau de histerese.

As aproximações polinomiais da curva de tensão visam a obtenção de funções que possam ser implementadas em um simulador de rede e que represente a curva de descarga da bateria. Com o processador numérico Octave (EATON, 2011), obteve-se polinômios de ordem 2-11 representando a parte funcional da curva de voltagem, ou seja, até 102.000 s. Na figura são mostradas curvas obtidas pela aproximação polinomial de ordem 3, 5 e 6, que foram os que mais se aproximaram da curva original e suas expressões são apresentados na Equação A.1.

$$\begin{aligned}
 V3(t) &= - 2.5446 \cdot 10^{-15} \cdot t^3 + 3.8635 \cdot 10^{-10} \cdot t^2 \\
 &\quad - 2.2062 \cdot 10^{-05} \cdot t + 2.9178 \cdot 10^{00} \\
 V5(t) &= - 1.8603 \cdot 10^{-24} \cdot t^5 + 5.2037 \cdot 10^{-19} \cdot t^4 \\
 &\quad - 5.4938 \cdot 10^{-14} \cdot t^3 + 2.6468 \cdot 10^{-09} \cdot t^2 \\
 &\quad - 5.9981 \cdot 10^{-05} \cdot t + 3.0704 \cdot 10^{00} \\
 V6(t) &= 1.4807 \cdot 10^{-29} \cdot t^6 - 6.3913 \cdot 10^{-24} \cdot t^5 \\
 &\quad + 1.0456 \cdot 10^{-18} \cdot t^4 - 8.3508 \cdot 10^{-14} \cdot t^3 \\
 &\quad + 3.3753 \cdot 10^{-09} \cdot t^2 - 6.7412 \cdot 10^{-05} \cdot t \\
 &\quad + 3.0885 \cdot 10^{00}
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

Observando as curvas polinomiais percebe-se que a $V5(t)$ é a melhor escolha e pode ser facilmente implementada num simulador.

Esse tipo de curva pode ser usada como base para gerar uma função mais realista de descarga energética de nodos e essa função pode ser inserida em simuladores de rede, objetivando aperfeiçoar os modelos e resultados obtidos das simulações. Evidentemente que deve-se obter essas curvas e funções para cada tipo de bateria utilizada em nodos sensores.

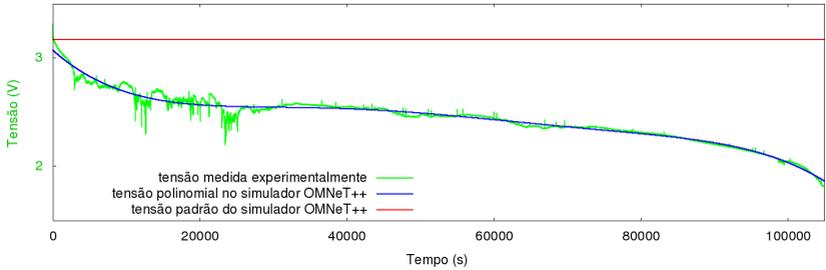


Figura 49: Comportamento da tensão.

A.3 IMPLEMENTAÇÃO POLINOMIAL NO OMNeT++

Para demonstrar a efetividade da inserção polinomial em um simulador de redes, inseriu-se o polinômio $V5(t)$ no simulador OMNeT++, onde foi reconfigurado o nível de tensão em função do tempo. A seguir são apresentados os detalhes desta implementação e alguns resultados obtidos.

Nos ensaios foram utilizados o OMNeT++ 4.2.2 e o *framework* INETMANET 2.0, onde foi programado um cenário contendo dois nós estáticos transmitindo mensagens nulas mutuamente, com a única intenção de consumir energia. A capacidade nominal das baterias foram ajustadas para 500 mAh e sua tensão inicial para 3,17 V (o mesmo valor inicial obtido no experimento). Mais nenhum parâmetro foi alterado no simulador, para observar e comparar o comportamento tradicional com a redefinição da curva de tensão.

Na Figura 49 pode ser observado o comportamento da variação de tensão até 105.000 s de um nó em seu modo normal de operação. Nesta figura são mostrados as curvas de tensão medidas experimentalmente bem como os valores obtidos pelo simulador, tanto no modo de funcionamento padrão do *framework* INETMANET bem como no modo polinomial.

Como pode ser observado a curva do modelo de tensão polinomial segue muito próximo o comportamento real, permitindo simulações com nós apresentando comportamento próximo do comportamento da curva real. Por outro lado o comportamento da curva de tensão padrão do INETMANET é uma linha horizontal (valor fixo), ou seja, é um modelo muito simplista mas que pode ser identificado como o comportamento de um fonte de tensão DC. Na documentação do modelo de baterias no INETMANET (*BasicBattery.ned*) é explicitado este

modelo simplista das baterias e enfatizado/recomendado a adoção de outros modelos que levam a um comportamento mais próximo do real.

A.4 ERROS NO SISTEMA DE MEDIÇÃO

As curvas apresentadas na Seção A.2, mostram o comportamento de um nodo MicaZ. Evidentemente, esses valores de corrente e tensão não são absolutamente precisos, assim sendo o objetivo desta seção é fazer um levantamento dos erros de medição, com o intuito de se ter o conhecimento dos erros incorridos e, caso sejam erros sistemáticos, propor-se uma metodologia para calibração do sistema de medição. Calibração esta que poderia ocorrer no próprio software de análise de dados.

Para o sistema proposto, na faixa de operação utilizado nos experimentos, o levantamento de erros é apresentado na Tabela 14. Para formar esta tabela usou-se um conjunto de resistores de precisão, com intuito de serem utilizados como elementos calibradores, já que, a obtenção de seu consumo energético é fácil e já amplamente empregado. Cada um destes resistores substituiu o nodo no sistema apresentado na Figura 46. Além disto inseriu-se em série um multímetro digital para medir o valor que foi considerado como valor verdadeiro da corrente. Para cada resistor é apresentado:

1. Seu valor nominal, obtido pela leitura de suas faixas de cores.
2. Seu valor medido por um multímetro digital de $6\frac{1}{2}$ dígitos, modelo HP34401A (INSTRUMENTS, 2011b).
3. A tensão de alimentação V_S medida diretamente pela placa de aquisição.
4. A corrente medida pelo multímetro HP34401A.
5. A corrente obtida pelo sistema de medição proposto. Ou seja, a tensão equivalente gerada pelo ZXCT1022, que é medida pela placa de aquisição, permitindo então o cálculo da corrente no PC.
6. O erro relativo percentual $= \frac{I_0 - I}{I_0} \cdot 100$. Onde I_0 é o valor verdadeiro, neste caso o obtido pela medição via multímetro e I é o valor medido pelo sistema proposto.

Observando a coluna dos erros pode-se perceber que o erro é maior nas extremidades da faixa de medição. Com valores baixos de resistores, o resistor em série – R_S – tem uma “grande” influência na queda de tensão como um todo, influenciando diretamente o valor da medida final. Por outro lado, com valores altos de resistores, a corrente circulando no sistema diminui bastante, levando o sistema de medição

Tabela 14: Levantamento do erro relativo.

Resistor		V_s	I_n	I_n	I_n
Nominal (Ω)	Medido (Ω)	Sistema proposto (V)	Medido (mA)	Calculado (mA)	Erro relativo (%)
105	114.74	2.4742558	26.945	24.742558	8.17
536	542.67	0.5959466	5.5711	5.959466	6.97
1.00 k	1.0060 k	0.3141877	3.0345	3.141877	3.54
5.11 k	5.1275 k	0.0625797	0.5967	0.625797	4.88
10.5 k	10.497 k	0.0308690	0.2913	0.308690	5.97
51.1 k	51.071 k	0.0064104	0.0599	0.064104	7.02

a seus limites.

A.5 CONCLUSÕES

Nesse apêndice foi descrito em detalhes o sistema subjacente utilizado em parte dos ensaios realizados bem como suas limitações. Tal sistema é composto por um sistema de medição de consumo energético de nodos, de baixo custo, simples de fácil implementação e que permite a medição do consumo energético de nodos de uma RSSF de maneira autônoma, permitindo a realização de ensaios de longa duração.

Foi apresentado um estudo de caso, onde um nodo MicaZ, submetido a diversos modos de operação, teve sua tensão e corrente monitoradas, permitindo visualizar seu comportamento energético ao longo do ensaio e extrair importantes conclusões a respeito de seu funcionamento.

Outro resultado importante foi a curva real de descarga de um conjunto de baterias alimentando um nodo MicaZ. Esta curva é importante por dar subsídios a melhor compreensão do consumo energético de um nodo vinculado a suas baterias. Este tipo de curva permite também o aperfeiçoamento de algoritmos cientes de energia e permite também sua implementação em simuladores de redes, como foi o caso apresentado no simulador OMNeT++.