

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO AUTOMAÇÃO E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Alex Sandro Roschildt Pinto

**Abordagens Autônomicas para Qualidade de Serviço da
Comunicação em Redes de Sensores sem Fio Densas com Requisitos
Temporais**

Florianópolis

2010

Alex Sandro Roschildt Pinto

**Abordagens Autônomicas para Qualidade de Serviço da
Comunicação em Redes de Sensores sem Fio Densas com Requisitos
Temporais**

Tese submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Barros
Montez

Co-orientador: Prof. Dr. Mario
Antonio Ribeiro Dantas

Florianópolis

2010

Alex Sandro Roschildt Pinto

**Abordagens Autônômicas para Qualidade de Serviço da
Comunicação em Redes de Sensores sem Fio Densas com Requisitos
Temporais**

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

Florianópolis, 6 de agosto de 2010.

Prof. Roberto de Souza Salgado, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Barros Montez, Dr.
Orientador
UFSC

Prof. Mario Antonio Ribeiro Dantas, PhD.
Co-Orientador
UFSC

Prof. Frank Siqueira, Dr.
UFSC

Prof. Luiz Affonso H. Guedes de Oliveira, Dr.
UFSC

Prof. Max Hering de Queiroz, Dr.
UFSC

Prof. Ricardo Moraes, Dr.
UNIFESP

AGRADECIMENTOS

A conclusão dessa jornada não teria sido possível sem a colaboração de diversas pessoas que foram muito importantes e que eu gostaria de prestar meus sinceros agradecimentos.

- Primeiramente a Deus;
- A CAPES pela concessão da bolsa de doutorado e bolsa PDEE;
- Ao meu orientador Prof. Carlos Montez, que me auxiliou durante os momentos mais complicados do doutorado, estando sempre comprometido com o trabalho, sua orientação foi fundamental na minha formação como cientista;
- Ao meu co-orientador Prof. Mário Dantas, pelos diversos conselhos que recebi durante o doutorado;
- Ao Prof. Fabian Vargas, por ter aceitado o desafio do projeto Hidromonitor;
- A Equipe Prosul, Prof. Carlos Silva, Edmundo Gatti, Letícia Pohls, Felipe Lavratti, Fernando Hernandez pelo empenho no projeto de monitoramento de águas latino-americanas
- Aos colegas do GRSSF: Denise Ferreira, Benedito Bitencort, Marcos Camada, Bruno Ferreira, Tiago Semprebom, Underléa Corrêa, Odilson Valle
- Ao Prof. Francisco Vasques e Prof. Paulo Portugal pela acolhida na Universidade do Porto e por todos os melhoramentos no modelo o meu muito obrigado;
- Aos colegas portuenses, Marcos Madruga, Silvio Sampaio e Robson Costa;
- Meus pais e irmãos que me deram grande apoio diversas vezes nos momentos mais difíceis;
- Aos grandes amigos: Déia, Marco, Elô, Fe, Maguila, Ni, Evandro Neuwald, Vitor Pontinha, Elaine, Mariana Cruz, Tati Miranda por todos os ensinamentos, momentos de descontração, praias;
- Ao meu filho Cão pelos ensinamentos “caninos”;
- Agradecimento especial a minha esposa Fe por me ajudar a ultrapassar todas as dificuldades com o otimismo que somente ela tem, sem você eu não teria chegado aqui. Te amo!

“Freedom of thought is best promoted by the gradual illumination of men’s minds, which follows from the advance of science”

(Charles Darwin, 1809-1882)

RESUMO

Em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), a fusão de dados com restrições temporais pode ser utilizada para gerar visões globais da rede e ainda compensar a baixa confiabilidade individual dos nodos. Entretanto, os nodos de uma rede com grande quantidade de nodos devem ser capazes de se auto-otimizar e auto-organizar sem a interferência de operadores humanos. Nesta tese, apresentamos diversas abordagens autonômicas para garantia de QoS em RSSF com aplicações de fusão de dados com restrições temporais. As abordagens foram validadas através de simulações utilizando TrueTime e testes em protótipos de RSSF. Uma das abordagens autonômicas utiliza algoritmo de aprendizado de máquina baseado em algoritmos genéticos. Esses algoritmos são inspirados na teoria da seleção natural e conseguem otimizar parâmetros como a eficiência da comunicação mesmo em problemas de otimização multi-objetivo. Abordagens autonômicas cientes de energia, assim como abordagens autonômicas mais simples, são também apresentadas. Uma vez que nossas abordagens foram modeladas para atuar na camada de aplicação de dispositivos compatíveis com o padrão IEEE 802.15.4, tornam-se de fácil implementação em dispositivos disponíveis comercialmente. As abordagens apresentadas mostraram um desempenho bem superior ao desempenho do protocolo IEEE 802.15.4.

Palavras-chave: Redes de Sensores sem Fio. Fusão de Dados. Computação Autonômica.

ABSTRACT

Real-time data fusion can be used in wireless sensor networks (WSN) applications in order to generate a global vision of the network. This way, the low dependability of individual nodes can be overcome. However, this kind of WSN is supposed to self-optimize and self-organize itself without human intervention. Several autonomic approaches that guarantee Quality of Service in WSN with real-time data fusion applications are presented in this thesis. The most important of them is based on genetic machine learning algorithm. This evolutionary algorithm is able to optimize WSN parameters like communication efficiency even when it faces multi-goal optimization problems. Autonomic approaches that consider energy levels and more simple approaches are also presented. These approaches were modeled to actuate in the application layer of IEEE 802.15.4 components, thus they can be easily implemented in off-the-shelf components. All the proposed approaches had shown a better performance than the IEEE 802.15.4 standard.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Data Fusion, Autonomic Computing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: ESQUEMA DE UM NODO DE RSSF [AKYILDIZ, 2002]	36
FIGURA 2.2: CICLO DE VIDA DE UMA RSSF [LOUREIRO <i>ET AL</i> , 2003]	37
FIGURA 2.3: ALGORITMO CSMA/CA IEEE 802.15.4 MODO SEM <i>BEACON</i> .	40
FIGURA 2.4 : ABORDAGENS DE FUSÃO DE DADOS	42
FIGURA 3.1: TRANSIÇÃO DE ESTADOS DO ASCENT.	49
FIGURA 4.1. CENÁRIO DE REDE DE SENSORES SEM FIO DENSA.	60
FIGURA 4.2. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE MACROCICLO E MICROCICLO	61
FIGURA 4.3. ALGORITMOS DE FUSÃO DE DADOS NOS NODOS ESCRAVO E NODO MESTRE.	63
FIGURA 5.1. RELAÇÃO EM REDES DENSAS ENTRE MENSAGENS RECEBIDAS POR <i>MI</i> E EFICIÊNCIA.	68
FIGURA 5.2. ALGORITMO MESTRE FUSÃO DE DADOS PROBABILISTA.	69
FIGURA 5.3. ENVIO PROBABILISTA EM DIVERSOS <i>NE</i> .	70
FIGURA 5.4. RESULTADOS OBTIDOS COM ABORDAGEM PROBABILISTA (<i>NE</i> 50 NODOS).	71
FIGURA 5.5. ALGORITMOS DA ABORDAGEM CEARSSF.	73
FIGURA 5.6. EF ALCANÇADAS PELO CEARSSF ATRAVÉS DAS EF REQUERIDAS.	74
FIGURA 5.7. QOF ATINGIDA PELO CEARSSF ATRAVÉS DAS QOF REQUERIDAS (1-20).	75
FIGURA 6.1. DIAGRAMA DE ESTADOS AAMG	82
FIGURA 6.2. RESULTADOS REFERENTES À VARIAÇÃO DE <i>NE</i> .	83
FIGURA 6.3. RELAÇÃO ENTRE QOF E EFICIÊNCIA NOMINAL COM VARIADAS <i>NE</i> .	85
FIGURA 6.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE <i>EF</i> DO AAMG E IEEE 802.15.4.	86
FIGURA 6.5. COMPARAÇÃO DA MÁXIMA EF. ATINGIDA.	87
FIGURA 6.6 COMPARAÇÃO DA MÁXIMA EF ATINGIDA	88
FIGURA 6.7. COMPARAÇÃO ENTRE MENSAGENS ENVIADAS(SM) E MENSAGENS RECEBIDAS(RM).	88
FIGURA 6.8. DETALHE DA RSSF COMPOSTA POR 30 MICAZ UTILIZADA NOS TESTES	90
FIGURA 6.9. EF. E QOF DO AAMG, AAMG2 (QOF > 7) E IEEE 802.15.4 COM 14, 19, 24 E 29 ESCRAVOS.	92
FIGURA 6.10. EFICIÊNCIA DO AAMG AO LONGO DO TEMPO. PARA FINS DE COMPARAÇÃO, É TRAÇADA UMA RETA COM O VALOR DA EFICIÊNCIA OBTIDA PELO PADRÃO IEEE PARA A MESMA <i>NE</i> (29 NODOS ESCRAVOS).	92

FIGURA 6.11. AAMG AO LONGO DO TEMPO, NA METADE DO TEMPO DE MONITORAMENTO A QUANTIDADE DE NODOS DA REDE DOBRA.	93
FIGURA 6.12. AAMG AO LONGO DO TEMPO, NA METADE DO TEMPO DE TESTE O <i>NE</i> DA REDE FOI DIMINUÍDO PELA METADE	94
FIGURA 6.13 ALGORITMO AAMG2	96
FIGURA 6.14. REDE COM 24 NODOS ESCRAVOS. AAMG COM QOF MÍNIMO DE VALOR 7. OS CINCO MINUTOS INICIAIS REFEREM-SE A FASE DE APRENDIZAGEM.	97
FIGURA 6.15. REDE COM 29 NODOS ESCRAVOS. AAMG COM QOF MÍNIMO DE VALOR 7. OS CINCO MINUTOS INICIAIS REFEREM-SE À FASE DE APRENDIZAGEM.	98
FIGURA 6.16. REDE COM 19 NODOS ESCRAVOS. AAMG COM QOF MÍNIMO DE VALOR 7. OS CINCO MINUTOS INICIAIS REFEREM-SE À FASE DE APRENDIZAGEM.	98
FIGURA 6.17. REDE COM 14 NODOS ESCRAVOS. AAMG COM QOF MÍNIMO DE VALOR 7. OS CINCO MINUTOS INICIAIS REFEREM-SE A FASE DE APRENDIZAGEM.	99
FIGURA 6.18. AAMG AO LONGO DO TEMPO, NA METADE DO TEMPO DE MONITORAMENTO O <i>NE</i> DA REDE DOBRA.	100
FIGURA 6.19 AAMG AO LONGO DO TEMPO, NA METADE DO TEMPO DE MONITORAMENTO O <i>NE</i> DA REDE DIMINUI PELA METADE	101
FIGURA 6.20. REDE COM 29 NODOS ESCRAVOS. AAMG COM QOF MÍNIMO DE VALOR 7. OS CINCO MINUTOS INICIAIS REFEREM-SE A FASE DE APRENDIZAGEM.	102
FIGURA 6.21. AAMG AO LONGO DO TEMPO, COM A DIMINUIÇÃO PELA METADE DO <i>NE</i> DA REDE NA METADE DO TEMPO DE MONITORAMENTO.	103
FIGURA 6.22. AAMG AO LONGO DO TEMPO, NA METADE DO TEMPO DE MONITORAMENTO O <i>NE</i> DA REDE DOBRA.	103
FIGURA 7.1: ALGORITMO CPTA.	107
FIGURA 7.2: AMBIENTE EMI UTILIZADO.	109
FIGURA 7.3. INFLUÊNCIA DA EMI NA <i>EF</i> DE UMA RSSF.	110
FIGURA 7.4 COMPARAÇÃO DA <i>EF</i> DE UMA RSSF COM E SEM EMI.	111
FIGURA 7.5. AVALIAÇÃO DA ABORDAGEM CPTA CONSIDERANDO <i>EF</i> E ENERGIA CONSUMIDA DE UMA RSSF SUBMETIDA A UM RUÍDO DE - 20 DBM.	112
FIGURA 7.6: ALGORITMO DO MESTRE.	113
FIGURA 7.7 ALGORITMO DO ESCRAVO.	114
FIGURA 7.15: TOPOLOGIA DE RSSF CONSIDERADA.	115
FIGURA 7.8. EVOLUÇÃO DO QOF MÉDIO CALCULADO A CADA INTEVALO DE 10S.	116

FIGURA 7.9. GRÁFICO DE DISPERSÃO DE 30 TESTES (CADA PONTO REPRESENTA O NÚMERO DE MENSAGENS ENVIADAS DOS NODOS COM MAIOR E MENOR NÍVEL DE BATERIA).	116
FIGURA 8.1: ALGORITMO AOV – MESTRE.	123
FIGURA 8.2: ALGORITMO AOV – ESCRAVO.	124
TABELA 8.1 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	125
FIGURA 8.3: RELAÇÃO ENTRE MENSAGENS REQUERIDAS E MENSAGENS RECEBIDAS	126
FIGURA 8.4: QOF E EF	126
FIGURA 8.5: MENSAGENS REQUERIDAS E RECEBIDAS	128
FIGURA 8.6: QOF E EF	128
FIGURA 8.7: EXPERIMENTO COM <i>NE</i> VARIÁVEL	129

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1. PARÂMETROS DE REDE (MAC E FÍSICO) ¹ .	67
TABELA 5.2 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COM 2000 MI.	68
TABELA 5.3 COMPARAÇÃO QUALITATIVA ENTRE AS ABORDAGENS DE FUSÃO DE DADOS.	76
TABELA 6.1. EXEMPLO DE CONJUNTO DE CLASSIFICADORES.	79
TABELA 6.2. DESCRIÇÃO DOS CLASSIFICADORES UTILIZADOS NO SISTEMA CLASSIFICADOR.	80
TABELA 6.3. POSSÍVEL POPULAÇÃO DE CLASSIFICADORES.	81
TABELA 6.4. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO DO ALGORITMO DE APRENDIZAGEM.	83
TABELA 6.5. MÉDIA DAS EFICIÊNCIAS.	87
TABELA 6.6 COMPARAÇÃO QUALITATIVA ENTRE AS ABORDAGENS DE RELACIONADAS AO AAMG E AAMG2.	104
TABELA 7.1 NÍVEIS DE POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO.	108
TABELA 7.2. NÍVEIS DE PROBABILIDADE DE ENVIO (PE) NOS NODOS ESCRAVOS.	113
TABELA 7.3. MENSAGENS ENVIADAS: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DE 30 TESTES.	117
TABELA 7.4. EF E QOF DO RSSFCE EM 30 TESTES.	117
TABELA 7.5. TENSÃO INICIAL DOS NODOS COM MENOR E MAIOR NÍVEL DE TENSÃO EM 30 TESTES.	117
TABELA 7.6 COMPARAÇÃO QUALITATIVA ENTRE AS ABORDAGENS CIENTES DE ENERGIA.	118
TABELA 8.1 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	125
TABELA 8.2: RESULTADOS EXPERIMENTAIS.	127
TABELA 9.1 ANÁLISE COMPARATIVA DAS ABORDAGENS DESENVOLVIDAS	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG:	Algoritmo Genético
AAMG:	Algoritmo de Aprendizado de Máquina Genético
AAMG2:	Algoritmo de Aprendizado de Máquina Genético em 2 Fases
AOV:	Algoritmo de Offset Variável
CEARSSF:	Controle de Envio Autônomo de Mensagens em RSSF
CPTA:	Controle de Potência de Transmissão Autônoma
Ef:	Eficiência da Comunicação
FPRSSF:	Fusão de Dados Probabilista para RSSF
MA:	Macro ciclo
MI:	Micro ciclo
Ne:	Numero de Escravos
Pe:	Probabilidade de Envio
QoF:	Qualidade da Fusão
QoS:	Qualidade de Serviço
RSSF:	Redes de Sensores sem Fio
RSSFCE:	RSSF ciente de Energia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1. Motivação	28
1.2. Objetivos desta tese	29
1.3. Contribuições	30
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	31
2. REDES DE SENSORES SEM FIO	32
2.1 Conceitos Básicos de RSSF	35
2.2. Sub-Camada MAC para RSSF.....	37
2.2.1. Padrão IEEE 802.15.4 e Tecnologia ZigBee	38
2.3. Fusão de Dados em Redes de Sensores Sem Fio.....	41
2.4. Aplicações para RSSF	43
2.5. Computação Autônoma.....	44
2.6. Considerações Finais	45
3. TRABALHOS RELACIONADOS.....	46
3.1. Introdução.....	46
3.2. Abordagens de Computação Autônoma	46
3.2.1. Redes de sensores sem fio auto-gerenciável [Ruiz <i>et al</i> , 2005]	46
3.2.2. ASCENT.....	48
3.2.3. Outras abordagens de computação autônoma	50
3.3. Abordagens de Fusão de Dados.....	50
3.3.1 Patil <i>et al</i> , 2004	50
3.3.2 Wu <i>et al</i> , 2004.....	51
3.3.3 Niu <i>et al</i> , 2006	52
3.3.4 Yuan <i>et al</i> , 2003.....	53

3.3.5 Morita <i>et al</i> , 2007.....	53
3.3.6 Costa e Sayeed, 2003	53
3.3.7 Outras Abordagens de Fusão de Dados para RSSF	53
3.4. Abordagens que garantem requisitos de <i>QoS</i> em RSSF	54
3.5. Abordagens cientes de Energia.....	55
3.6 Conclusão	56
4. MODELO DE REDES DE SENSORES SEM FIO ADOTADO.....	57
4.1. Introdução	57
4.2 Um modelo para fusão paralela de dados em redes densas.....	59
4.2.1 Visão geral do modelo	59
4.3 Algoritmos básicos que executam no mestre e nos escravos.....	62
4.4 Métricas de desempenho em RSSF densas	64
4.5. Considerações sobre o modelo e métricas propostas	65
5. ABORDAGENS AUTONÔMICAS SIMPLES.....	67
5.1. Introdução	67
5.2 Comportamento do IEEE 802.15.4 em topologia estrela em RSSF densas.....	67
5.3. Abordagem de Fusão de Dados Probabilista (FPRSSF).....	69
5.4. Abordagem de Ajuste Autônomo da Probabilidade de Envio (CEARSSF)	72
6.1 Introdução	78
6.2. Sistemas Classificadores e Algoritmos Genéticos.....	78
6.3. Ajuste dinâmico da probabilidade de envio baseada em sistema classificador	80

6.4. Resultados Simulados.....	83
6.5. Experimentos utilizando RSSF Micaz da Crossbow.....	89
6.5.1. Experimentos utilizando RSSF micaz da Crossbow (AAMG2)	94
6.6. Considerações Finais	103
7. ABORDAGENS AUTONÔMICAS CIENTES DE ENERGIA	106
7.1 Introdução	106
7.2. Controle de Potência de Transmissão Autônomo (CPTA).....	106
7.2.1. Resultados Experimentais.....	108
7.2.2. Resultados Experimentais.....	109
7.3. Abordagem RSSFCE (Abordagem Descentralizada Ciente de Energia para RSSF).....	112
7.3.1 Validação através de medições em protótipo.....	114
8. ABORDAGEM AUTONÔMICA PARA QUALIDADE DE SERVIÇO	120
8.1 Introdução.....	120
8. 2. Modelo de Comunicação	120
8.3. Abordagem AOV (Algoritmo de Offset Variável)	122
8.4. Algoritmos nos nodos mestre e escravos	122
8.5. Resultados obtidos via simulação	124
8.6 Resultados experimentais.....	127
9. CONCLUSÕES	130
9.1.Revisão das Motivações e Objetivos.....	130
9.2.Visão Geral do Trabalho.....	131
9.3. Contribuições e Escopo do Trabalho	133

9.4 Trabalhos Futuros	135
REFERÊNCIAS	137

1 INTRODUÇÃO

Redes de Sensores sem Fio (RSSF) são compostas por diversos nodos de tamanho reduzido, sendo que cada nodo possui processador, memória, sensores analógicos, bateria e módulo de comunicação sem fio [Stankovic *et al*, 2003]. Tais redes podem ser implantadas em ambientes inóspitos, o que dificulta a manutenção da rede (troca de baterias, reposição de nodos, atualização de software, por exemplo). Desta forma, a economia de energia é um dos requisitos mais importantes em soluções baseadas em RSSF. Uma vez que o objetivo destas redes é monitorar e, algumas vezes, atuar no ambiente na qual estão inseridas, requisitos temporais implícitos e explícitos são necessários quase que em todas as aplicações. Entretanto, a imprevisibilidade do meio de comunicação sem fio, que é bastante sensível a ruídos, colisões e desistências de transmissão, falhas intermitentes e permanentes nos nodos, aliadas aos problemas inerentes do ambiente no qual as redes estão inseridas, aumenta a dificuldade de garantir propriedades temporais.

As RSSF podem ser bastante densas (a estratégia de implantar uma grande quantidade de nodos no ambiente auxilia na obtenção de resultados com mais acurácia, já que os nodos individualmente não são confiáveis) [Akyildiz *et al*, 2002], podendo ser compostas por centenas ou milhares de nodos. Portanto, técnicas de computação autônoma (o sistema computacional não necessita de manutenção direta dos técnicos, sendo capaz de se auto-organizar, auto-otimizar, etc) fazem-se necessárias. Além disso, uma vez que vários nodos realizam leituras e enviam os dados para o coordenador da rede, abordagens de fusão de dados são essenciais, para que informações úteis e concisas sejam entregues ao usuário.

Desta forma, as RSSF podem apresentar uma alta densidade de nodos e serem implantadas em locais de difícil acesso e necessitem de abordagens de fusão de dados para extração de armazenamento de informações úteis para a aplicação. As informações coletadas possuem um prazo de validade, sendo necessário desta forma, garantir requisitos temporais. Uma vez que é bastante difícil garantir requisitos temporais em uma tecnologia cujos nodos não são confiáveis individualmente, propriedades de computação autônoma como a auto-organização são bastante úteis. Esta tese propõe abordagens de auto-organização da comunicação em RSSF densas com fusão de dados temporal. Assim sendo, as duas principais perguntas que buscam ser respondidas neste trabalho são:

- Como desenvolver métodos algorítmicos que ofereçam às aplicações uma qualidade de serviço mínima em RSSF densas?
- Como elaborar abordagens autônomas que busquem garantir requisitos temporais para aplicações de fusão de dados e que, simultaneamente, mantenham um consumo energético baixo, mantendo, desta forma, a RSSF operacional pelo maior tempo possível?

1.1. Motivação

A miniaturização de componentes eletro-eletrônicos de processamento e da comunicação sem fio pessoal tem impulsionado a popularidade das RSSF. A interação direta com o ambiente, que ocorre neste tipo de rede, implica em preocupações não existentes em aplicações distribuídas tradicionais. Economia de energia, tempo real, tolerância à alta ocorrência de faltas e a aspectos não controláveis do meio ambiente são alguns exemplos de requisitos para aplicações nesta área [Molla e Ahamed, 2006].

Devido à possibilidade de falhas na comunicação e nos próprios nodos, a topologia destas redes pode ser dinâmica e imprevisível. Nesse sentido, a implantação de uma RSSF com grande densidade de nodos sensores de baixo custo – comparado ao uso de poucos nodos confiáveis e de alto custo – pode oferecer vantagens significativas como: alta robustez contra falhas, cobertura uniforme e facilidade de implantação [Stankovic *et al*, 2003].

Objetivando aumentar a confiabilidade das leituras dos sensores, ou ainda, economizar energia dos nodos e aumentar a vida útil da rede, diversas abordagens utilizam técnicas de fusão de dados [Pai e Han, 2006], [Wener-Allen *et al*, 2005], [Niu *et al*, 2006], [Nicholson, 2004]. Nessas técnicas, valores lidos dos sensores presentes nos nodos da rede são enviados para uma estação base, a qual funde esses dados em busca de alguma informação específica da rede. Desta forma, não é mais necessário confiar na leitura de um único nodo, e sim, na combinação de diversas amostras. Mesmo que haja alguns nodos faltosos, pode-se tomar decisões baseadas na rede como um todo. Esse é um dos paradigmas mais importantes desse tipo de redes: a confiabilidade da rede e dos dados monitorados não é baseada em nodos individuais, mas sim, no coletivo [Stankovic *et al*, 2003].

Logo, as RSSF tendem a ser redes altamente densas, com requisitos temporais e podem ser utilizadas para monitorar áreas de difícil acesso. Desta forma, características de auto-gerenciamento tornam-se necessárias, uma vez que é extremamente difícil gerenciar um grande número de nodos comunicando-se através de rede sem fio que possuam tantos objetivos distintos (eficiência energética, auto-organização, requisitos temporais e tolerância a faltas). O auto-gerenciamento é uma importante característica da computação autônoma – a qual vem sendo proposta e desenvolvida desde 2001 – e visa liberar o administrador da rede da tarefa de gerenciar sistemas computacionais, uma vez que componentes do sistema computacional são capazes de se auto-organizar e auto-otimizar de acordo com objetivos globais impostos pelo administrador da rede ou usuário do sistema [Kephart e Chess, 2003].

Desta forma, é possível desenvolver aplicações por exemplo de monitoramento ambiental, monitoramento estrutural e detecção de alvos baseada em RSSF onde centenas de milhares de nodos podem monitorar ambientes de forma não intrusiva e ubíqua. Porém, a alta densidade de nodos e dificuldades impostas pelas restrições de *hardware* e *software* dificultam o cumprimento de requisitos temporais e de *QoS* nessas aplicações.

O protocolo IEEE 802.15.4 que é um padrão de facto para RSSF [IEEE802.15.4, 2008] disponibiliza diversas técnicas para sincronização de nodos e organizações topológicas [ZigBee, 2010]. Porém, quando objetivos conflitantes são impostos pela aplicação, os protocolos disponibilizados no IEEE 802.15.4 não são suficientes para garantir requisitos de tempo e economia energética, por exemplo. Diante disto, nesta tese serão apresentadas abordagens de auto-organização e auto-otimização de RSSF utilizando o padrão IEEE 802.15.4. Uma das abordagens é baseada em algoritmos de aprendizado de máquina genético para aplicações de RSSF. Algoritmo genético (AG) é uma abordagem de otimização baseada na seleção natural proposta por Charles Darwin no século XIX [Goldberg, 1989]. Embora os AG's sejam eficientes na otimização de problemas combinatórios complexos, o seu *overhead* computacional para solucionar o problema é alto. Desta forma, utilizamos algoritmo de aprendizado de máquina genético (AAMG) que é um sistema classificador baseado em AG [Goldberg, 1989]. Ao contrário do AG clássico o AAMG reduz o *overhead* do processo de otimização, uma vez que a evolução dos genótipos é realizada após algumas tomadas de decisão. A abordagem AAMG foi validada através de medições em protótipos e simulações. Além disso, apresentamos mais cinco abordagens autonômicas para aplicações de fusão de dados em RSSF densas.

O principal objetivo desta tese é desenvolver abordagens autonômicas para maximizar a eficiência da comunicação e manter requisitos de Qualidade de Serviço (*QoS*), mais especificamente eficiência da comunicação e economia de energia em aplicações de fusão de dados de tempo real. Desta forma, foram desenvolvidas diversas abordagens que visam controlar autonomicamente parâmetros da RSSF.

Nesta proposta, consideramos uma RSSF organizada em topologia estrela que utiliza o protocolo IEEE 802.15.4 sem *beacon*. Além disso, as abordagens propostas nesta tese são próprias para RSSF que possuem grande quantidade de nodos de grande quantidade em uma pequena área).

O objetivo secundário desta tese é a proposição das métricas de *QoS* Eficiência da Comunicação e Qualidade da Fusão que possibilitam a avaliação das abordagens propostas. A eficiência da comunicação indica a quantidade de mensagens que são recebidas

1.2. Objetivos desta tese

O principal objetivo desta tese é desenvolver abordagens autonômicas para maximizar a eficiência da comunicação e manter requisitos de Qualidade de Serviço (*QoS*), mais especificamente eficiência da comunicação e economia de energia em aplicações de fusão de dados de tempo real. Desta forma, foram desenvolvidas diversas abordagens que visam controlar autonomicamente parâmetros da RSSF.

Nesta proposta, consideramos uma RSSF organizada em topologia estrela que utiliza o protocolo IEEE 802.15.4 sem *beacon*. Além disso, as abordagens

propostas nesta tese são próprias para RSSF que possuem grande quantidade de nodos de nodos (grande quantidade em uma pequena área).

O objetivo secundário desta tese é a proposição das métricas de *QoS* Eficiência da Comunicação e Qualidade da Fusão que possibilitam a avaliação das abordagens propostas. A eficiência da comunicação indica a quantidade de mensagens que são recebidas

1.3. Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é a proposição de abordagens que possibilitam a utilização de um cenário de fusão de dados tempo real autônomo para RSSF. Essas abordagens são avaliadas através de resultados simulados e medidos em protótipo.

Todas as abordagens propostas nesta tese foram desenvolvidas na camada de aplicação. Desta forma, não há necessidade de mudanças no protocolo de rede do padrão IEEE 802.15.4. Por conseguinte, as abordagens propostas são facilmente implementadas em dispositivos de prateleira.

- A seguir as abordagens que foram desenvolvidas nesta tese serão rapidamente descritas. Além disso, outras contribuições desta tese também serão listadas.
- Estudo do comportamento do protocolo IEEE 802.15.4 em topologia estrela utilizando CSMA/CA sem beacon. Para isto foram realizadas simulações utilizando o simulador TrueTime e testes em protótipo utilizando nodos de RSSF MicaZ [MicaZ, 2010];
- Desenvolvimento de abordagens autônomas para aplicações de fusão de dados tempo real que sejam factíveis de serem implementadas em dispositivos de prateleira de RSSF;
- Proposição de abordagens para provimento de garantias de QoS para aplicações de fusão de dados tempo real em RSSF;
- A proposição de dois índices de QoS para RSSF: Eficiência da Comunicação e Qualidade da Fusão;

Além das contribuições previamente descritas, seis abordagens autônomas para RSSF com grande quantidade de nodos são apresentadas. A seguir as abordagens são rapidamente introduzidas.

- **Fusão de Dados Probabilista para RSSF (FPRSSF):** A primeira abordagem autônoma proposta. Nesta abordagem são utilizadas pela primeira vez as métricas Eficiência da Comunicação (*Ef*) e Qualidade da Fusão (*QoF*). FPRSSF permite que a *Ef* seja gradativamente maximizada. FPRSSF utiliza um parâmetro chamado Probabilidade de Envio (*Pe*) para ajustar o envio das mensagens pelos nodos escravos.
- **AAMG (Algoritmo de Aprendizado de Máquina Genético):** algoritmo de aprendizado de máquina baseado em algoritmos genéticos para auto-organizar RSSF. A abordagem AAMG foi

validada via simulação e através de protótipo. Resultados demonstraram a efetividade da abordagem proposta.

- **Controle de Envio Autônomo de Mensagens em RSSF (CEARSSF):** Abordagem de controle autônomo de envio de mensagens e sua validação via simulação. Os resultados demonstraram que CEARSSF foi capaz de autonomicamente balancear E_f e QoS .
- **AOV (Algoritmo de Offset Variável):** O algoritmo AOV visa aumentar o número de mensagens recebidas por uma estação base. AOV provê garantias de QoS em aplicações de fusão de dados em RSSF densas. Resultados obtidos via protótipo e simulação comprovaram que AOV consegue otimizar a performance do protocolo IEEE 802.15.4.
- **CPTA (Controle de Potência de Transmissão Autônoma):** O objetivo do CPTA é manter um certo nível de E_f mesmo em ambientes com alta incidência de interferência eletromagnética. Os testes demonstraram que CPTA é capaz de balancear consumo energético com E_f . A abordagem CPTA foi validada através de protótipo de RSSF em testes de compatibilidade eletromagnética efetuados em câmara anecóica.
- **RSSFCE (RSSF Ciente de Energia):** Abordagem distribuída para garantir requisitos globais de QoS em RSSF através de tomadas de decisão efetuadas localmente nos nodos. A abordagem leva em conta a carga restante das baterias para ajustar a taxa de transmissão. *RSSFCE* foi testado em protótipo de RSSF e apresentou ótimos resultados.

A proposta de um modelo de comunicação é outra contribuição desta tese.

1.4. Organização do Texto

O restante desta tese está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos sobre RSSF, computação autônoma e fusão de dados em RSSF. Os trabalhos relacionados são apresentados no Capítulo 3. O modelo de comunicação para aplicações de fusão de dados tempo real em RSSF densas é apresentado no Capítulo 4. No Capítulo 5 são apresentadas as abordagens autônomas simples para RSSF densas. As abordagens autônomas evolutivas para RSSF são apresentadas no Capítulo 6. Abordagens cientes de energia são apresentadas no Capítulo 7. A abordagem Algoritmo de Offsets variáveis (AOV) é apresentada no capítulo 8. Por fim, as conclusões sobre esta tese são delineadas no Capítulo 9.

2. Redes de Sensores Sem Fio

Este capítulo se destina a apresentar os conceitos básicos de Redes de Sensores sem Fio (RSSF). Além disso, apresentamos o protocolo IEEE 802.15.4 [IEEE 802.15.4, 2010] que nos últimos anos tornou-se um dos padrões de *facto* para RSSF. Conceitos de fusão de dados em RSSF assim como computação autônômica são também apresentados, pois são a base as abordagens apresentadas nesta tese.

RSSF é um termo geralmente usado na literatura cobrindo muitas variações em composição e implantação [Stankovic et al, 2003]. Essas redes são compostas por um grande número de pequenos nodos, compostos por unidade de sensoriamento, antena, módulo de comunicação sem fio, processador, memória e bateria. Os nodos coletam grandezas escalares, processam e se comunicam entre si geralmente através de rádio frequência. Os nodos podem apresentar as mesmas características de *software* e *hardware* ou alguns podem ter características especiais. Uma estação base é necessária para coletar e processar os dados coletados.

Além disso, os recursos de um nodo RSSF são geralmente restritos. Na maioria das tecnologias existentes atualmente, o poder de processamento é bastante limitado, existe pouco espaço em memória e a bateria é limitada. Além disso, a grande quantidade de nodos, a comunicação sem fio e os componentes de hardware pouco confiáveis fazem com que a topologia possa ser extremamente dinâmica [Akyildiz, 2002], [Ilyas et al, 2004].

Logo, uma RSSF pode ser composta por um grande número de nodos sensores que podem ser implantados tanto “dentro” quanto perto do fenômeno a ser monitorado. A posição dos nodos não necessariamente precisa ser pré-determinada. Esta característica permite uma implantação aleatória em áreas inacessíveis ou áreas de desastres. Por outro lado, esta característica exige protocolos e algoritmos de auto-organização. Outra característica desejável é o esforço cooperativo dos nodos sensores [Akyildiz, 2002].

Segundo [Ilyas et al, 2004], algumas características desejáveis de uma RSSF são:

- Auto-organização;
- Comunicação *broadcast* de curta distância e roteamento multi-saltos;
- Grande quantidade de nodos e esforço cooperativo;
- Freqüente mudança de topologia devido a falhas e desligamento dos nodos;
- Restrição de recursos como bateria, potência de transmissão e processamento.

Tais características distinguem as RSSF de outras redes sem fio, além de sua capacidade de interagir com fenômenos naturais do mundo real.

O escasso recurso de software e hardware faz com que essas redes sejam orientadas a aplicação, o que significa que as soluções para RSSF são desenvolvidas para executar tarefas específicas e torna-se necessário o trabalho

colaborativo para aumentar a eficiência da utilização dos recursos e tempo de vida da rede [Stankovic et al, 2003], [Hadim et al, 2006].

Comparada com à estratégia de implantar poucos sensores confiáveis (mas de custo elevado), a estratégia de implantar um grande número de sensores de baixo custo pode ter vantagens significativas, como [Ilyas et al, 2004]:

- Maior resolução espacial;
- Alta tolerância a faltas através de operações distribuídas;
- Cobertura uniforme;
- Facilidade de implantação;
- Reduzido consumo energético;
- Aumento do tempo de vida do sistema.

O alto grau de interação que as RSSF possuem com o ambiente, onde os sensores estão implantados, impõe restrições temporais implícitas e explícitas. O conceito de validade temporal significa que um dado coletado agora somente será útil por algum tempo pré-definido. Por exemplo, em uma aplicação de segurança, quando um usuário entra em uma sala, este deve ser reconhecido em um intervalo de tempo máximo pré-estabelecido.

Devido à grande quantidade de nodos, não determinismo, ruído e recursos escassos das RSSF, torna-se extremamente difícil garantir propriedades de tempo real em RSSF [Stankovic *et al*, 2003]. Usualmente, devido a estas características, aplicações com *deadlines hard* não são usualmente consideradas em RSSF [Koubaa *et al*, 2009].

Apesar de ser uma tecnologia inovadora e que permitirá o surgimento de diversas aplicações inovadoras, diversos desafios são introduzidos pelas RSSF. Alguns desses desafios são descritos a seguir:

- **Mudança de paradigma:** Fundamentalmente, uma RSSF é implantada para dar suporte a um conjunto integrado de funções e aplicações. O sistema deve coletar grandezas (temperatura, luminosidade, aceleração, etc) e atuar no ambiente para que gere o comportamento desejável. Logo, é considerado crítico produzir o comportamento agregado do sistema quando um único nodo não é importante [Nakamura *et al*, 2007]. Na verdade, os nodos não devem possuir um ID permanente. Mensagens não devem ser enviadas a nodos individuais, mas sim, a locais ou áreas, baseados no conteúdo dos dados. Da mesma forma, um usuário pode estar interessado na informação de uma determinada área de monitoramento, não importando a leitura de um nodo específico. Estes exemplos ilustram que as RSSF são centradas a dados. O fato que a RSSF interage com o ambiente físico também implica em diferenças substanciais, que impedem a utilização de soluções clássicas advindas de computação distribuída. Este fator também é devido a requisitos temporais, alta taxa de ocorrência de faltas, ruído e não-determinismo causados por aspectos incontroláveis do ambiente [Molla e Ahamed, 2006].

- Restrição de recursos: As severas restrições de recursos das RSSF implicam na utilização de novas soluções. Os principais recursos com restrições são: bateria, capacidade de processamento, memória e largura de banda de transmissão. Uma vez que uma RSSF contém um grande número de nodos, custo também é um fator significativo. A utilização de abordagens que visem soluções de compromisso entre diversas métricas também se faz necessária. Por exemplo, em uma aplicação de tempo real em RSSF deve haver um balanceamento entre o consumo de energia e o atendimento de *deadlines* [Yick *et al*, 2008].
- Imprevisibilidade: Uma RSSF está sujeita a diversas incertezas. Primeiro, uma RSSF é implantada em um ambiente com diversos aspectos incontroláveis (por exemplo, determinação de quando ocorrerá um incêndio ou um terremoto em determinada localidade). Segundo, a comunicação sem fio é sujeita a diversos erros físicos e a perda de mensagens devido a rádio interferências de diversos tipos. Terceiro, nodos são pouco confiáveis individualmente. Quarto, sensores podem não estar calibrados apropriadamente. Quinto, as estruturas de roteamento e conectividade podem mudar frequentemente. Sexto, novos nodos podem ser adicionados ou nodos antigos podem ser removidos da rede. Isto implica que a soma da capacidade dos recursos totais não é fixa. Sétimo, o nível energético disponível em um nodo pode variar significativamente mesmo na implantação inicial. Oitavo, nodos podem ser fisicamente movidos ou controlados para efetuar tal ação, sendo necessária uma reestruturação da rede [Stankovic *et al*, 2003].
- Auto-X: Um desafio é como criar uma visão da RSSF na camada de aplicação. O conceito auto-X indica as propriedades de computação autônoma, neste caso a letra “X” indica organização, otimização, cura, etc. Já que as RSSF são implantadas para operar com pouca manutenção direta, estas devem possuir capacidades de auto-organização, auto-otimização, e auto-cura [Huebscher e McCann, 2008].
- Alta escala: Diversas abordagens de RSSF dependem de uma quantidade mínima de nodos no sistema. Desafios incluem: computar esta quantidade de mensagens para diversas situações, assegurar que a RSSF atinge esta quantidade mínima necessária, e desenvolver soluções que requeiram um número mínimo de sensores ativos e energia mínima a fim de minimizar o custo e maximizar o tempo de vida do sistema. Se a quantidade de sensores é alta e a RSSF é implantada em uma grande área, então também temos um sistema de larga escala. Devido a alta escala dessas redes, tais sistemas são sujeito a falhas, ruído e outras incertezas e são altamente descentralizados. Além disso, quando uma RSSF é implantada, ela precisa ser auto-operacional e possuir auto-manutenção, pois o custo da manutenção humana em uma rede com centenas de nodos é

proibitivo devido ao tempo que esta tarefa demandaria. Por conseguinte, todas estas características impõem um sistema com propósitos conflitantes. A tendência de diminuição na escala dos dispositivos de rede a escalas nanométricas exacerba estes desafios [Akyildiz *et al*, 2008].

- **Tempo Real:** RSSF operam no mundo real, logo restrições temporais são muito importantes. Estes sistemas possuem requisitos temporais implícitos (ex. quando um usuário entra em uma sala este deve ser reconhecido em um determinado tempo). Quanto mais rápida tal tarefa for completada, melhor é considerado o sistema. Entretanto, muitas RSSF possuem também requisitos temporais explícitos. Por exemplo, uma aplicação de monitoramento estrutural impõe prazos para os dados coletados pelos sensores [Kim *et al*, 2007]. Devido a grande quantidade de nodos e não determinismo da comunicação é extremamente difícil garantir propriedades de tempo real.
- **Segurança:** Uma vez que as RSSF podem ser implantadas em aplicações críticas, o quesito segurança torna-se essencial. Técnicas de negação de serviço em RSSF são relativamente fáceis de serem executadas. Além disso, a maioria das soluções de coordenação e comunicação de tempo real não prevêem técnicas de segurança. Logo, facilmente um adversário pode explorar estas falhas de segurança em um RSSF. O maior dilema é implementar técnicas que necessitam de grande poder computacional em uma tecnologia com tantas restrições [Stankovic *et al*, 2003].

As características apresentadas pelas RSSF dificultam a intervenção humana na manutenção do hardware e software. Por conseguinte, características de computação autônoma (auto-configuração, auto-otimização, auto-organização, auto-cura) são uma forma interessante de lidar com a complexidade de uma rede pervasiva com grande quantidade de nodos que muitas vezes encontra-se em locais inóspitos [Kephart e Chess, 2003], [Huebscher e McCann, 2008].

2.1 Conceitos Básicos de RSSF

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos básicos das RSSF como esquema de um nodo de RSSF e ciclo de vida de uma RSSF. Estes conceitos servem de base para um melhor entendimento do paradigma.

Um nodo de RSSF é composto por quatro unidades básicas: unidade de sensoriamento, unidade de processamento, unidade de comunicação e energia [Akyildiz, 2002]. A unidade de sensoriamento é geralmente composta por sensores analógicos (ex. sensor de luminosidade, temperatura, umidade, turbidez, pH, etc.) e um módulo de conversão analógico/digital. O nodo de RSSF é composto também por uma unidade de processamento que contém um processador e memória. Outro componente importante de um nodo de RSSF é a unidade de energia, esta pode ser composta por baterias e ainda células

fotovoltaicas para recarga. A unidade de comunicação geralmente utiliza radio frequência, para comunicação entre os nodos [MicaZ, 2010], sendo o padrão IEEE 802.15.4 um dos mais utilizados [IEEE802.15.4, 2008]. A Figura 2.1 ilustra o esquema de um nodo de RSSF.

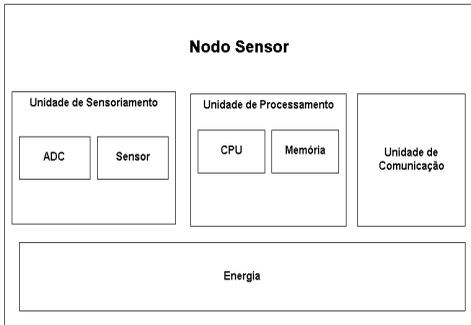


Figura 2.1: Esquema de um nodo de RSSF [Akyildiz, 2002]

Segundo Loureiro [Loureiro et al, 2003] o ciclo de vida de uma RSSF é composto por 5 etapas: configuração, manutenção, sensoriamento, processamento e comunicação. Durante a etapa de configuração os nodos recebem o código de execução e são implantados em uma certa área de interesse. O código pode ser repassado para os nodos através de cabos ou ainda via comunicação sem fio. A implantação dos nodos pode ser feita de maneira manual (através de técnicos ou ainda com o auxílio de robôs), existem também aplicações em que os nodos são “jogados” de maneira aleatória na área de interesse a ser sensoriada. A Segunda fase do ciclo de vida de uma RSSF é a manutenção podendo ser reativa, preventiva, corretiva ou adaptativa. Esta fase visa manter a RSSF ativa e lidar com falhas que são inerentes a este tipo de rede. Logo, esta etapa é primordial para o correto funcionamento da rede. Durante a fase de sensoriamento os nodos coletam dados escalares do ambiente e podem armazená-los para posterior envio. A fase de processamento visa transformar os dados coletados, tal transformação pode ser realizada através de técnicas de fusão ou agregação de dados. Abordagens autônomicas também podem ser utilizadas nesta etapa para identificar eventos ou disparar alarmes. Por fim, a comunicação entre os nodos é estabelecida para que a informação possa ser repassada para o usuário final [Loureiro et al, 2003].

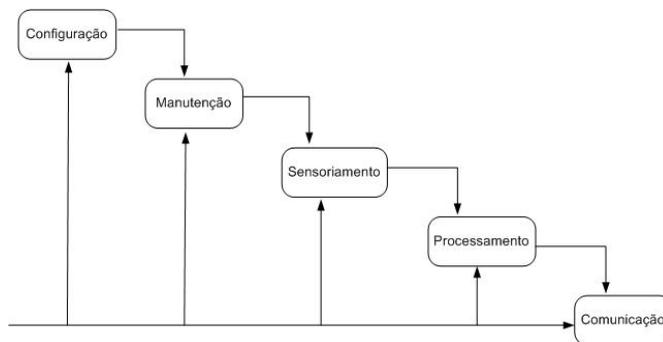


Figura 2.2: Ciclo de Vida de uma RSSF [Loureiro *et al*, 2003]

2.2. Sub-Camada MAC para RSSF

A maximização do tempo de vida da rede é um dos objetivos mais comuns nos esforços de pesquisa em RSSF, uma vez que os nodos são considerados “mortos” quando a bateria acaba. Desta forma, o protocolo de acesso ao meio deve ser eficiente energeticamente através da redução dos seguintes gastos potenciais de bateria [Demirkol, 2006]:

- Colisão de pacotes: quando um nodo recebe mais de um pacote ao mesmo tempo, é considerado que ocorreu uma colisão. Todos os pacotes que causam a colisão devem ser descartados e retransmitidos.
- *Overhearing*: a segunda razão de gasto energético na comunicação é o *overhearing*, quando determinado nodo recebe pacotes que são destinados a outros nodos.
- *Overhead* dos pacotes de controle: a utilização de pacotes de controle para coordenar a transmissão de dados deve ser minimizada.
- Escuta vazia (*Idle Listening*): quando determinado nodo encontra-se em modo de escuta em um canal vazio, para receber um possível tráfego.
- *Overmitting*: causada quando a transmissão de uma mensagem falha, devido à inatividade do nodo de destino.

Existem quatro tipos de padrões de comunicação nas RSSF [Demirkol, 2006]:

- *Broadcast*: o padrão *broadcast* geralmente é utilizado por um determinado dispositivo para transmitir alguma informação para todos os outros nodos ao alcance de sua antena. A informação de *broadcast* pode conter consultas, atualizações de software ou pacotes de controle. Neste padrão todos os nodos que estão no alcance do transmissor são receptores em potencial.
- *Local Gossip*: Em alguns cenários, os nodos sensores detectam um evento e comunicam a outros nodos localmente (mesmo cluster). Este

tipo de comunicação ocorre quando um nodo envia uma mensagem para seus vizinhos (determinada área de cobertura).

- *Convergecast*: Padrão de comunicação em que um grupo de sensores se comunicam com um determinado nodo. O nodo destino pode ser um *clusterhead*, um fusor de dados central ou uma *base station*.
- *Multicast*: em alguns cenários o nodo sensor pode enviar para um grupo específico de sensores, realizando uma comunicação *multicast*.

2.2.1. Padrão IEEE 802.15.4 e Tecnologia ZigBee

O objetivo principal da tecnologia ZigBee é habilitar redes muito densas com baixo consumo energético. Tecnologias como Mica Motes utilizam este padrão a fim de atingir altos tempos de vida em aplicações de RSSF.

A arquitetura de rede Zigbee é baseada no padrão *Open Systems Interconnection* (OSI) mas define somente camadas relevantes. Zigbee adota o padrão IEEE 802.15.4, o qual define somente as duas camadas mais inferiores: física e camada de acesso ao meio [ZigBee, 2010]. Vale lembrar que produtos ZigBee, implementados pela Aliança ZigBee são baseados no padrão IEEE 802.15.4.

Atualmente a aliança ZigBee está trabalhando nas camadas superiores (rede e aplicação). Sincronização de relógios também é considerada como uma estrutura opcional de *superframe*. Uma rede ZigBee pode habilitar até 65.000 nodos, baseado em seu esquema de endereçamento. Três tipos de topologias são suportados: estrela, *mesh* e *cluster tree* ou redes híbridas. A topologia estrela é considerada a mais simples, na qual todos os nodos se alcançam em um único salto. Porém a utilização das topologias *mesh* e *tree* necessitam de técnicas de roteamento para organizar os nodos. Além disso, uma topologia *tree* é composta por diversas topologias estrela, interconectadas através dos seus respectivos cluster-heads. Muitas vezes o custo do roteamento e da organização dos *clusters* em uma topologia *cluster tree* ou *mesh* é maior que se fosse utilizada uma topologia estrela [ZigBee, 2010].

A camada física do padrão IEEE 802.15.4 pode operar em duas frequências 868/915 MHz ou 2.4 GHz (16 canais e 250 Kbps de taxa de transmissão máxima). A subcamada de acesso ao meio IEEE 802.15.4 utiliza o mecanismo CSMA-CA. A tecnologia se distingue de outros padrões por vários motivos como baixa taxa de transmissão, baixo consumo energético, baixo custo, auto-organização e topologias flexíveis [IEEE802.15.4, 2008].

Existem três tipos de atores distintos em uma rede IEEE 802.15.4: coordenador, dispositivo com funcionalidade completa e dispositivo com funcionalidade reduzida. O coordenador mantém o conhecimento da rede, permite a entrada de novos membros e ainda decide qual tipo de comunicação será utilizada (com ou sem *beacon*). O dispositivo com funcionalidade completa possui hardware mais complexo e pode atuar como roteador. Por fim, o dispositivo com funcionalidade reduzida possui hardware mais simples e é utilizado na borda da rede [IEEE802.15.4, 2008].

O protocolo IEEE 802.15.4 foi proposto em 2003 e está tornando-se um padrão *de facto* para redes sem fio de baixo consumo energético e baixa taxa de transmissão. O protocolo MAC IEEE 802.15.4 suporta dois tipos de modos operacionais que podem ser selecionados por um nodo central chamado coordenador PAN: (1) o modo sem *beacon* no qual o MAC funciona através de CSMA/CA sem slot; (2) o modo com *beacon* habilitado, os *beacons* são enviados periodicamente pelo coordenador PAN para identificar sua PAN, para sincronizar os nodos que são associados com ele e para delimitar um *superframe* durante o qual todas as transmissões devem ocorrer. Durante o período de contenção do *superframe*, o MAC é regido pelo mecanismo CSMA/CA com *slot* [IEEE802.15.4, 2008].

O modo IEEE 802.15.4 com *beacon* provê serviços de sincronização e opcionalmente um Período Livre de Contenção (*Contention Free Period*) que utiliza um *slot* de tempo garantido (*guaranteed time slot*).

O algoritmo CSMA/CA utilizado no IEEE 802.15.4 é apresentado na Figura 2.3. Este algoritmo (modo sem *beacon*) é utilizado quando o coordenador não envia um *beacon* periódico. Logo, o período de *backoff* de um dispositivo não está relacionado diretamente no tempo com o período de *backoff* de outros dispositivos na rede [IEEE 802.15.4, 2008].

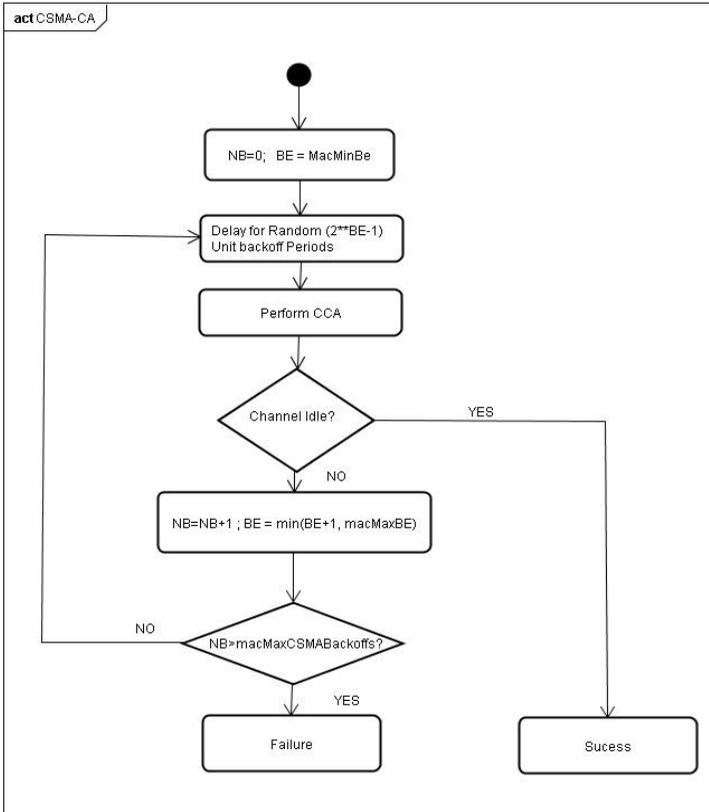


Figura 2.3: Algoritmo CSMA/CA IEEE 802.15.4 modo sem *beacon*.

Duas variáveis são mantidas por cada dispositivo no modo sem beacon: NB, ou seja o número de vezes que o CSMA/CA é requisitado para realizar o backoff, e BE, expoente do backoff, que é relacionado com quantos períodos de backoff um dispositivo deve esperar até que possa acessar o canal de comunicação.

O primeiro passo do algoritmo é a inicialização de NB e BE. Após, este passo, a subcamada MAC deve esperar um período aleatório na faixa de 0 a $2^{BE} - 1$ e requisitar para a camada física realizar o CCA (*Clear Channel Assessment*). Caso o canal acessado esteja ocupado, a subcamada MAC irá incrementar o NB e BE em uma unidade (o algoritmo deve assegurar que BE não seja maior que *macMaxBE*). Caso o valor de NB seja maior que *macMaxCSMABackoffs*, o CSMA/CA deverá encerrar e retornar um status de falha ao acesso do canal.

Desta forma, pode-se considerar três parâmetros que influenciam o desempenho do CSMA/CA sem *beacon*: *macMaxBe* (valor padrão 5),

macMaxCSMABackoffs (valor padrão 4) e *macMinBE* (valor padrão 3). Estes valores podem decrementar o consumo de bateria (devido ao fato de que um dispositivos tenta enviar somente 5 vezes antes de abortar a transmissão), entretanto, quando o número de nodos aumenta na rede, a eficiência da comunicação decai. Logo, o protocolo IEEE 802.15.4 não parece ser adequado para aplicações que necessitem de uma grande quantidade de nodos.

2.3. Fusão de Dados em Redes de Sensores Sem Fio

RSSF produzem uma grande quantidade de dados que necessita ser processada, entregue e acessada de acordo com objetivos globais. Logo, o modo pelo qual os dados são manipulados pelos nodos sensores é de grande importância para as aplicações. As abordagens de fusão de dados são uma solução para o processamento de dados coletados pelos sensores e se beneficiam de suas capacidades de processamento para gerar informações úteis através da combinação de dados coletados por diversos sensores. Logo, através da exploração da sinergia entre os dados disponíveis, as técnicas de fusão de dados podem reduzir o tráfego de dados, filtrar ruído e realizar previsões ou inferências a respeito da entidade monitorada [Nakamura *et al*, 2007] através da geração de informações a partir do sensoriamento de múltiplos sensores.

RSSF são implantadas em uma área para detecção de um ou mais fenômenos físicos. A questão principal em algumas aplicações é como determinar a presença de um sinal alvo na presença de ruído. Isto é tipicamente feito de maneira colaborativa através da combinação proveniente de várias fontes (possivelmente, um grande número). A pesquisa em detecção distribuída desenvolveu várias soluções de processamento de sinal colaborativo a fim de lidar com duas restrições de erro específicas – probabilidade de perda de detecção e probabilidade de alarme falso. A probabilidade de detecção indica a frequência em que um determinado detector indica um evento com sucesso. A probabilidade de alarme falso indica a probabilidade de um evento ser detectado sem este ter acontecido [Patil, 2004].

Segundo [Costa, 2003], existem duas formas básicas de troca de informações. Quando dois nodos coletam dados correlacionados entre si, o envio de um pacote que colete cada leitura é necessário para um desempenho ótimo. Esta troca de informações é chamada de fusão de dados. Por outro lado, se as leituras são independentes, a fusão de decisão é suficiente. Neste último caso, somente valores de decisão (probabilísticos) são trocados. Embora esta nomenclatura possa ser usada, nesta tese utilizaremos sempre o termo “fusão de dados” para ambos os casos.

A fusão de dados paralela, apresentada na Figura 2.4.a, é executada a partir de um número específico de nodos, enviando suas leituras de sinal para uma estação base. A fusão serial (Figura 2.4.b), por sua vez, é combinada com técnicas de roteamento, sendo que as leituras são coletadas ao longo da rede [Patil, 2004]. As abordagens apresentadas nesta tese são baseadas no paradigma de fusão de dados paralela.

Um terceiro modo de comunicação entre os nodos envolvidos na fusão de dados seria a híbrida (Figura 2.4.c). Nesse tipo de fusão, a rede se estrutura na forma de uma árvore computacional com partes da rede sendo organizadas em agregados (*clusters* de nodos). Esta abordagem pode ser considerada uma combinação entre a fusão de dados paralela e serial.

A fusão de dados de vários sensores visa aumentar a precisão da detecção de determinado evento. Desta forma, não é preciso confiar na decisão de um único nodo sensor, mas sim na leitura de diversos nodos da rede [Costa, 2003], [Liu, 2004], [Nicholson, 2004], [Patil, 2004], [Pai, 2006].

Além disso, a fusão de dados pode aumentar o tempo de vida da rede, pois algumas abordagens visam diminuir o gasto energético. Segundo [Liu, 2004], em uma rede com grande quantidade de nodos seria necessário coletar dados somente de alguns sensores para tomar determinada decisão. Dessa forma, um menor número de nodos executaria o sensoriamento e utilizariam a unidade de comunicação.

Os custos de comunicação devem ser diminuídos em uma RSSF, já que a comunicação é um dos maiores consumidores de energia da rede [Akyildiz *et al*, 2002] [Hadim *et al*, 2006], [Stankovic *et al*, 2003]. Desta forma, soluções de fusão de dados paralela são mais custosas que soluções seriais, já que os dados coletados são enviados ao nodo fusor sem que sejam combinados. Por outro lado, a fusão de dados serial é dependente do estabelecimento de uma rota, o que também implica em algoritmos mais complicados [Patil, 2004]. A fusão de dados híbrida por sua vez necessita de suporte de auto-organização dos nodos, já que se baseia na formação de agregados (*clusters*) de nodos ao longo da rede.

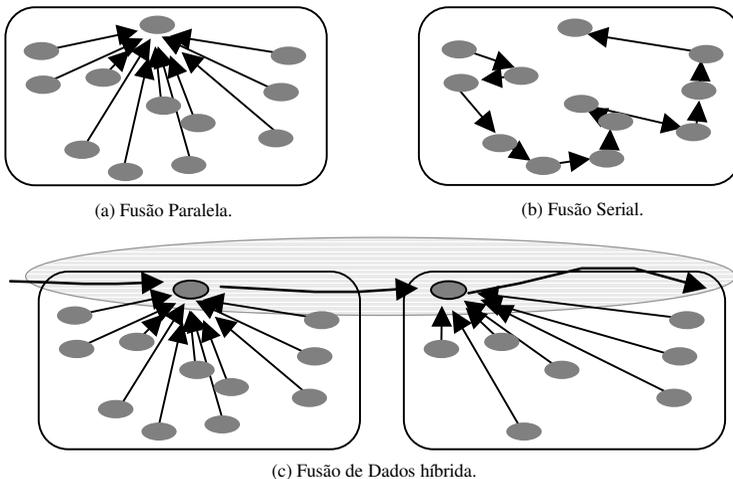


Figura 2.4 : Abordagens de Fusão de Dados

2.4. Aplicações para RSSF

As RSSF's são consideradas orientadas a aplicação, desta forma as soluções são desenvolvidas de acordo com os requisitos das aplicações e nem sempre podem ser reutilizadas. De acordo com os requisitos temporais das aplicações, estas podem apresentar diferenças significativas nas soluções algorítmicas utilizadas. Alguns tipos de aplicações necessitam de um sensoriamento e envio de mensagens periódicas, outras enviam mensagens por eventos ou ainda por requisição do usuário. Aplicações militares, de automação residencial e monitoramento são alguns dos exemplos de aplicativos que podem utilizar-se das RSSF's.

Em uma aplicação de monitoramento de *habitats* [Mainwaring *et al*, 2002], uma RSSF foi implantada na ilha *Great Duck Island*. O objetivo principal daquela aplicação era correlacionar dados de microclima (temperatura, umidade e luminosidade) com a atividade dos ninhos de pássaros na ilha. A aplicação possuía requisitos temporais bastante relaxados, sendo focada no aumento do tempo de vida da rede. Neste caso, houve a necessidade da RSSF ficar ativa por vários meses, sem intervenções como trocas de baterias. Deste modo, o envio de mensagens e até mesmo o sensoriamento necessitaram ser reduzidos.

O monitoramento de estruturas, como o da ponte *Golden Gate Bridge*, utiliza uma topologia linear. Sendo que um roteamento deve ser realizado para que as mensagens cheguem à estação base. Neste tipo de aplicação são utilizados acelerômetros para identificar modificações na estrutura física da ponte [Kim *et al*, 2007].

A seguir serão listadas algumas aplicações que podem fazer uso das RSSF [Stankovic *et al*, 2003]:

- Transporte inteligente: automóveis, com rede de sensores e atuadores implantados, são inseridos em uma RSSF a fim de aumentar a eficiência do tráfego em estradas;
- Monitoramento e manutenção de plantas industriais: Robôs industriais complexos são equipados com diversos sensores usualmente conectados por cabos a um computador central. Devido ao alto custo do cabeamento e restrições de movimentação dos robôs, algumas empresas estão substituindo os sensores por RSSF;
- Espaços inteligentes: áreas equipadas com sensores de movimento, luz, temperatura, microfones para ativação por voz, e sensores de pressão em assentos. Desta forma, a temperatura e fluxo de ar podem ser regulados de acordo com necessidades específicas do usuário;
- Rastreamento de contêineres e caixas: companhias de navegação necessitam ter controle das mercadorias a serem transportadas;
- Agricultura de precisão: gerenciamento de irrigação e controle de fertilizantes e pesticidas;

- Monitoramento de áreas inóspitas: exploração e monitoramento de ambientes inóspitos e regiões remotas;
- Aplicações militares: monitoramento de tropas e armas, detecção de alvos, monitoramento de áreas de combate e prédios e minas terrestres auto-configuráveis.

2.5. Computação Autônoma

Os sistemas computacionais alcançaram tamanho nível de complexidade que os esforços humanos para mantê-los operacionais tornou-se insuficiente. Um problema similar ocorreu em 1920 na telefonia. Naquela época, operadores humanos eram necessários para trabalhar manualmente em *switchboards*. A rápida popularização do telefone causou sérias preocupações a respeito da quantidade de operadores treinados para suprir a demanda. A grande demanda de técnicos qualificados seria um sério entrave para a disseminação do telefone. Desta forma, a introdução de máquinas que realizavam o trabalho de operadores eliminou a necessidade de intervenção humana [Huebscher e McCann, 2008].

O termo computação autônoma foi introduzido em 2001 pela IBM para designar sistemas computacionais capazes de se auto-gerenciarem [Kephart and Chess, 2003]. Neste contexto, as principais propriedades denominadas de “auto-x” propostas pela IBM são: auto-configuração, auto-otimização, auto-cura e auto-proteção. A seguir iremos detalhar cada uma delas [Huebscher e McCann, 2008]

- Auto-configuração: capacidade do sistema de se auto-configurar de acordo com objetivos de alto nível.
- Auto-otimização: O sistema pode decidir iniciar uma mudança no sistema de modo pró-ativo a fim de otimizar o desempenho ou qualidade de serviço.
- Auto-cura: o sistema detecta e diagnostica problemas de forma autônoma. Os problemas neste caso podem ser tanto bits defeituosos em um chip de memória quanto um erro de software, por exemplo.
- Auto-proteção: o sistema é capaz de se auto-defender contra ataques maliciosos ou mudanças indevidas.

A idéia de computação autônoma é fortemente inspirada em sistemas biológicos. Os sistemas biológicos são resultantes de anos de evolução e possuem características desejáveis a sistemas autônomos tais como [Dressler *et al.*, 2010]:

- Adaptação a mudanças ambientais;
- Robustez a falhas causadas por fatores internos ou externos;
- Habilidade de atingir comportamentos complexos baseados usualmente em um conjunto limitado de regras básicas;
- Habilidade de aprender e evoluir quando novas condições são aplicadas;
- Habilidade de se auto-organizar de maneira distribuída, atingindo um equilíbrio eficiente de maneira colaborativa;

- Gerenciamento inteligente de recursos restritos, através de uma inteligência global; e
- Capacidade de sobrevivência em ambientes inóspitos.

Por sua vez, as características de sistemas biológicos mencionadas acima foram fonte de inspiração para a concepção de técnicas de computação evolutivas [Miorandi *et al*, 2010]. Além disso, as RSSF introduzem uma necessidade explícita de auto-organização [Dressler *et al*, 2010], principalmente com a tendência de os dispositivos atingirem escalas nanométricas [Akyildiz *et al*, 2008].

2.6. Considerações Finais

Neste capítulo apresentamos alguns conceitos básicos sobre RSSF, sobre o protocolo IEEE 802.15.4 e ainda sobre fusão de dados em RSSF. Este trabalho de doutoramento é fortemente baseado no padrão IEEE 802.15.4, já que utiliza este protocolo como camadas física e enlace. Além disso, as abordagens apresentadas nesta tese considera uma aplicação que utiliza tarefa de fusão de dados paralela. As abordagens propostas possuem características de computação autonômica, mais especificamente características de auto-otimização para RSSF densas com topologias dinâmicas.

3. Trabalhos Relacionados

3.1. Introdução

Recentemente, inúmeros trabalhos científicos têm surgido em áreas relacionadas ao tema RSSF. Nesta tese, o principal interesse se dá em RSSF densas com necessidade de características de computação autonômica (principalmente, auto-gerenciamento e auto-organização). No entanto, enfocamos também em trabalhos relacionados a RSSF com fusão de dados, onde há metas temporais implícitas ou explícitas nas mensagens enviadas pelos nodos sensores até uma estação base.

Este capítulo está dividido em quatro grandes partes. A primeira trata de trabalhos que possuem abordagens relacionadas à computação autonômica para suporte à RSSF. A segunda parte apresenta alguns trabalhos relacionados à fusão de dados em RSSF. Abordagens que garantem requisitos de QoS em RSSF são apresentadas na terceira parte. Por fim, abordagens cientes de energia ou focadas diretamente no aumento do tempo de vida das RSSF são apresentadas.

3.2. Abordagens de Computação Autonômica

3.2.1. Redes de sensores sem fio auto-gerenciável [Ruiz *et al*, 2005]

O trabalho de Ruiz [Ruiz *et al*, 2005] apresenta a modelagem e análise de uma solução auto-gerenciável para RSSF. A topologia é hierárquica e heterogênea e o objetivo é detectar monitoramento de risco de incêndios. São utilizados alguns serviços autonômicos e uma abordagem de gerenciamento descentralizada. A principal contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de uma RSSF auto-gerenciável onde podem ser definidas políticas de auto-organização e auto-manutenção.

A solução auto-gerenciável adotada utiliza Diagramas de Voronoi para identificar nodos redundantes; calcula o risco de incêndio através do Índice de Angstrom (índice que indica a propabilidade de incêndio em um ambiente) atribui prioridade para suas mensagens de acordo com este índice; realiza serviços de negociação através do uso de uma máquina de estados e reconfigura o hardware dos seus componentes através do gerenciamento dinâmico de energia [Ruiz *et al*, 2005]. Diagrama de Voronoi é uma decomposição do espaço métrico em regiões de acordo com a distância a determinados pontos. Resultados de simulação apresentados indicam que a solução auto-gerenciável proposta pode economizar energia enquanto atinge os objetivos de QoS da aplicação, como por exemplo entrega rápida de mensagens em caso de incêndio.

O índice de Angstrom (I) utilizado envolve somente a porcentagem de umidade relativa do ar (H) e a temperatura do ar em graus Celsius (T). Os nodos

coletam os dados de temperatura e umidade e calculam o risco de fogo, utilizando a umidade da região do Cerrado como um valor de referência para umidade relativa (60%). O índice é calculado usando a seguinte fórmula: $I = 0,05H - 0,1(T-27)$.

O Índice de Angstrom é usado para determinar quais áreas e momentos apresentam maior risco de ocorrência de incêndio. O risco de incêndio é indicado através da seguinte escala: quando $I > 2,5$ as condições são desfavoráveis para a ocorrência de incêndio. Caso $2,0 < I \leq 2,5$ as condições de incêndio são favoráveis, e caso $I \leq 2$, a ocorrência de incêndio é muito provável.

Ruiz [Ruiz *et al*, 2005] divide a tarefa de colocar em funcionamento a RSSF em etapas, sendo que cada etapa possui funcionalidades distintas. Na etapa de planejamento são determinadas a topologia e funcionalidades dos componentes. A rede foi dividida em *clusters* (i.e. RSSF hierárquica) com nodos heterogêneos e com uma grande quantidade de nodos. Cada *cluster* possui um *cluster-head* (com maior capacidade de *hardware*). Cada nodo foi programado para desempenhar tarefas de aplicação e gerenciamento. Pequenos agentes de gerenciamento foram embutidos nos nodos comuns, e os *cluster-heads* possuem agentes de gerenciamento mais complexos (gerentes). Cada gerente é responsável por uma sub-rede (*cluster*) e é apto a negociar com outros gerentes.

Na etapa de instalação, os nodos executam uma série de rotinas de inicialização, tais como auto-teste, determinação do *status* do nodo e calibração dos sensores. Os nodos são cientes de suas localizações, são estáticos e possuem antenas omnidirecionais. Durante esta etapa, os principais serviços implementados são: auto-organização, gerenciamento de escalonamento de nodo e auto-configuração. O serviço de auto-configuração é responsável por organizar os nodos em grupos, para que seja possível tornar a rede escalável e robusta.

O problema de auto-organização em RSSF pode ser resolvido através do uso de visão global da rede. Em redes hierárquicas, um gerente com tal visão pode definir quais nodos irão participar de cada grupo, e então indicar qual o *cluster-head* de cada grupo. Embora possa ser considerada autônômica, tal abordagem necessita de um grande tráfego de pacotes, o que aumenta o consumo de energia. Desta forma, o trabalho de [Ruiz *et al*, 2005] utiliza uma abordagem descentralizada. Tal abordagem possui as vantagens de ser escalável e de minimizar o tráfego de pacotes gerado pelo gerente. O objetivo é desenvolver um serviço de auto-organização descentralizado baseado em políticas, sendo que os gerentes interagem entre si de modo cooperativo, executando tarefas de formação de grupos, controle da quantidade de nodos ativos da rede e manutenção da área de cobertura da RSSF.

Diagramas de Voronoi foram utilizados para identificar nodos redundantes em determinada área e desligá-los visando economia energética. Os nodos sensores executam o serviço de gerenciamento de auto-configuração para mudar os parâmetros, sendo possível a adaptação frente as mudanças de

topologia. Neste trabalho, os *cluster-heads* modificam a potência de transmissão de acordo com a distância entre eles e seus nodos e o AP. A potência de transmissão é configurada considerando que o *cluster-head* deve alcançar o AP e todos os nodos de seu *cluster*.

Cada mensagem disseminada pelos nodos comuns possui um valor de prioridade (alto ou baixo, dependendo do risco de incêndio). Quando um *cluster-head* recebe uma mensagem ele avalia sua prioridade. Quando mensagens de baixa prioridade chegam ao *cluster-head*, uma média das mensagens é calculada e o *cluster-head* espera 120s para enviar o resultado a estação base. Caso uma mensagem de alta prioridade seja recebida, a operação do cálculo da média é abortada. O *cluster-head* começa a tarefa de agregação das mensagens de alta prioridade e envia o resultado dentro de 5s para a estação base.

Os resultados para a validação da proposta foi realizado via simulação. O simulador utilizado foi o NS-2, com 144 nodos e 12 *cluster-heads* implantados aleatoriamente em uma área de 145m X 112m. O protocolo de transporte e de MAC utilizado foi UDP e IEEE 802.11, respectivamente. Essa é a principal fraqueza deste trabalho, pois esses protocolos não costumam ser usados em RSSF. Os resultados da simulação demonstraram que o serviço de negociação, além de economizar energia e aumentar o tempo de vida da rede, habilitou o AP a receber as notificações de incêndio e com maior precisão.

Além de ser uma abordagem autonômica assim como as abordagens apresentadas nesta tese, esta abordagem apresenta uma grande quantidade de sensores. Entretanto, a topologia organizada em *cluster-tree* é um ponto diferente das abordagens desta tese. A técnica apresentada nesta seção utiliza um protocolo de rede distinto (IEEE 802.11) ao invés de IEEE 802.15.4

3.2.2. ASCENT

O trabalho de [Cerpa e Estrin, 2004] apresenta uma abordagem de auto-configuração adaptativa para RSSF chamada ASCENT. ASCENT baseia-se na idéia de que se o número de sensores da rede aumenta, somente um subconjunto de nodos é necessário para estabelecer o roteamento na rede. Cada nodo avalia sua conectividade e adapta sua participação na topologia multi-salto baseado na medição da região de operação. Um nodo realiza as seguintes ações:

- Sinaliza quando detecta uma grande perda de pacotes, requisitando nodos adicionais na região para se juntar à rede a fim de retransmitir as mensagens;
- Reduz seu tempo de funcionamento, caso detecte uma grande perda de pacotes devido a colisões;
- Testa o ambiente de comunicação local e não se junta à infraestrutura de roteamento multi-salto até que seja necessário.

Desta forma, ASCENT apresenta-se como uma abordagem de auto-configuração distribuída já que as decisões são tomadas localmente pelos nodos. O trabalho considera uma aplicação de monitoramento de ambiente que

é implantada em uma floresta. A implantação pode ser feita através de um avião (que espalha os nodos) ou, então, sendo cuidadosamente colocados. ASCENT apresenta duas contribuições fundamentais:

- Uso de técnicas adaptativas que permitem a aplicação configurar a topologia da rede de acordo com suas necessidades, enquanto tenta economizar energia para aumentar o tempo de vida da rede. Porém, modelos específicos de justiça, grau de conectividade e capacidade requerida não são considerados;
- O uso de técnicas de auto-configuração que reagem a condições de operação medidas localmente pelos nodos. O trabalho não é restrito a modelos de propagação, distribuição geográfica dos nodos ou mecanismos de roteamento.

A Figura 3.1 representa o modelo de máquina de estado de um nodo. Nesse modelo, inicialmente um relógio temporizador é ativado com um tempo aleatório para evitar a sincronização de envios simultâneos. O nodo inicia no estado de *Teste*. Nodos neste estado trocam dados e mensagens de controle de roteamento. Além disso, quando um nodo entra em estado de *Teste*, um timer T_t é inicializado e uma mensagem de anúncio é enviada para os nodos vizinhos. Quanto o tempo T_t expira, o nodo entra no estado *Ativo*. Caso antes de T_t expirar o número de vizinhos ativos esteja abaixo do limiar de vizinhança (*neighborhood threshold* – NT) ou a taxa média de perda de dados (DL) seja maior que a taxa média de perda de dados antes da transição para estado de teste, então o nodo move-se para o estado Passivo. Se múltiplos nodos fazem transição para o estado de *Teste*, então o critério de desempate é o ID (maior ID vence). A idéia no estado de *Teste* é testar se a adição de mais nodos irá melhorar a conectividade.

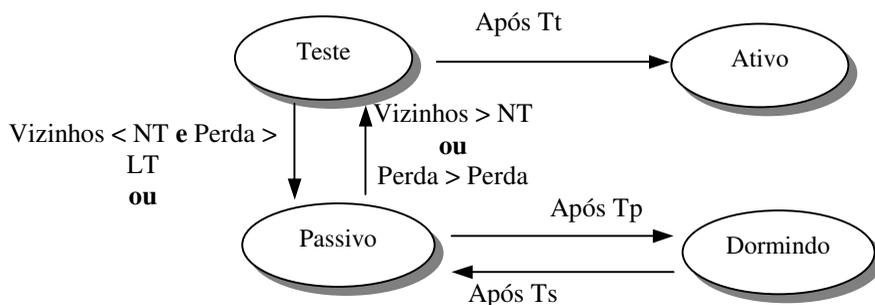


Figura 3.1: Transição de estados do ASCENT.

Quando um nodo entra no Estado *Passivo*, um timer T_p é inicializado e são enviadas novas mensagens de anúncio de nodos passivos. Esta informação é usada pelos nodos ativos para estimar o total de nodos na vizinhança. Nodos Ativos transmitem sua estimativa da quantidade de vizinhos ativos para qualquer nodo passivo na vizinhança.

A principal crítica a esta abordagem é a grande quantidade de mensagens que necessitam ser trocadas entre os nodos para que seu estado seja anunciado aos seus vizinhos. Quando o nodo entra em estado passivo ou ativo seu estado deve ser anunciado, o que demanda energia e ocupa o meio de transmissão. Esta abordagem utiliza uma idéia semelhante a utilizada pelas abordagens desta tese, regular a taxa de envio de mensagens dos nodos da RSSF. Entretanto, técnicas de roteamento são utilizadas ao invés de uma topologia estrela.

3.2.3. Outras abordagens de computação autônoma

Uma solução baseada em Algoritmos Genéticos (AG) para escalonamento de coleta de dados em redes *cluster-tree* é apresentado em [Bari *et al*, 2009]. A abordagem promete aumentar o tempo de vida tanto de redes pequenas como de RSSF com grande quantidade de nodos. Rotas são determinadas baseadas no nível energético dos nodos. Entretanto, a utilização de AG impõe um conhecimento global da rede. A visão global é extremamente complexa de ser obtida em redes com topologias complexas e também impõe grande troca de mensagens. Esta característica é a principal diferença de nossa abordagem baseada em algoritmo de aprendizado de máquina genético, já que a utilização de AG implica em uma visão holística da rede.

Um protocolo de construção de árvores de agregação de dados baseada em comportamento de colônia de formigas é apresentado em [Liao *et al*, 2008]. As possíveis rotas são exploradas pelas entidades e a árvore de agregação de dados é construída baseada nos níveis de feromônio acumulados nas rotas. Cada “formiga” explora todas as possíveis rotas da fonte até a *base station*. A abordagem foi validada através de simulações que demonstraram que o consumo energético é diminuído. Entretanto, a abordagem necessita de um período transitório durante o qual os níveis de feromônio são ajustados dentro da RSSF.

O trabalho de Machado [Machado *et al*, 2005] introduz um algoritmo de disseminação de dados em RSSF autônoma. Neste trabalho é apresentado um algoritmo de roteamento baseado em mapas de energia. Desta forma, as rotas são determinadas dinamicamente de acordo com os níveis de energia dos nodos. Logo, rotas com maior nível energético são preferidas, o que aumenta o tempo de vida da rede.

3.3. Abordagens de Fusão de Dados

3.3.1 Patil *et al*, 2004

O trabalho de Patil [Patil *et al*, 2004] considera fusão de dados serial baseada em um teste de taxa de probabilidade. Esse trabalho considera técnicas de roteamento combinadas com detecção colaborativa, com o objetivo de diminuir o gasto de energia e aumentar a confiabilidade da detecção de eventos no ambiente. Probabilidade de alarme falso (PFA) e probabilidade de detecção

(PDET) foram consideradas com o objetivo de atingir um número mínimo de amostras para a fusão. A idéia básica é utilizar o menor número possível de amostras, respeitando um certo nível de qualidade baseado em PFA e PDET. A probabilidade de perda de detecção $P_{\text{miss}} = 1 - \text{PDET}$.

Primeiramente foi analisado o caso onde as decisões locais dos K sensores independentes são disponibilizadas em um determinado nodo para a decisão final. Esta seria o cenário que consideraria todas as mensagens sendo transmitidas para certo nodo sem nenhuma regra de fusão intermediária sendo aplicada. Uma vez que falhas nos nodos podem acarretar em um menor número de mensagens, K foi considerado um número arbitrário, $N \geq 0$, sendo N o número total de nodos na rede.

Baseado na regra de fusão paralela, foi proposta também uma solução ao problema da fusão serial através de uma técnica que é baseada no *sequential probability ratio test* (SPRT) usado para detecção centralizada. As transmissões são consideradas seriais, sendo percorrido um determinado caminho. A decisão de aceitar a hipótese de detecção ou continuar as transmissões é feita ao longo da rota. O teste é terminado sempre que uma hipótese é aceita, logo, o número de sensores envolvidos na fusão não é conhecido. Assim como no SPRT, o processo de decisão ao longo da rede é tomado quando determinados níveis de PDET e PFA são alcançados. A abordagem SPRT é conceitualmente um processo centralizado, onde as amostras dos sensores primeiramente são coletadas, para, então, o nodo central tomar a decisão. Desta forma, o SPRT foi adaptado para a fusão serial. Uma vez que nosso trabalho não visa desenvolver abordagens de roteamento, tais técnicas não serão descritas. O autor demonstra através de uma série de simulações que a utilização de fusão serial apresentou-se bastante eficiente quando comparada com a fusão paralela. A principal semelhança com as abordagens descritas nesta tese é a utilização de um número de leituras de sensores limitadas para que um certo nível de QoS seja atingido pela aplicação. Entretanto, a principal contribuição do trabalho de Patil é a fusão de dados serial.

3.3.2 Wu et al, 2004

O trabalho de [Wu et al, 2004] trata sobre o problema de calcular a rota de um agente que funde dados de forma incremental em uma RSSF. A ordem dos nodos visitados ao longo da rota tem impacto significativo na qualidade e no custo do dado fundido. O objetivo do trabalho é a detecção de alvos ou rastreamento. Foram utilizados algoritmos genéticos adotando como função objetivo o sinal de energia detectado, o consumo de energia e a perda de energia (*path loss*). Segundo [Wu et al, 2004], computar uma rota utilizável, na prática, envolve um balanceamento entre custo (consumo de energia e *path loss*) e benefício (precisão da detecção). Desta forma, visitar mais sensores aumenta a qualidade do dado fundido, mas também aumenta a sobrecarga de comunicação e execução.

A função objetivo considera o sinal de energia detectado, o consumo de energia e o *path loss*. O consumo de energia em um nodo sensor é determinado pela velocidade de processamento e pelo tempo de computação. Em relação à transmissão de mensagens através do meio sem fio, o consumo depende da potência de transmissão e do tempo de transmissão da mensagem. Foi assumido que a mensagem inclui o código do agente móvel de tamanho M em bits e os dados de tamanho D em bits. Para uma determinada qualidade, um tamanho fixo de D é utilizado para armazenar os dados parcialmente integrados em cada sensor.

O *path loss* representa a atenuação do sinal como uma medida positiva medida em dB e é definida como a diferença entre a potência transmitida efetiva e a potência recebida. A energia do sinal é uma certa quantidade de energia emitida por um determinado alvo, que pode ser utilizada pelo agente móvel para fusão de dados. O agente móvel sempre tenta acumular o maior nível de sinal possível, para que seja possível realizar tomadas de decisão mais precisas na detecção de alvos. A combinação destas três métricas foi utilizada na elaboração da função objetivo $O(P)$: $O(P) = SE(P)(1/EC(P) + 1/PL(P))$, sendo SE a energia do sinal, EC o consumo de energia e PL o *path loss*. Intuitivamente, esta função objetivo prefere caminhos com maiores energia do sinal e penaliza aqueles com maiores *path losses* e consumo de energia. Em aplicações de detecção, os autores estão interessados em definir se existe ou não um alvo na área de monitoramento, que é detectado por um nível de *threshold* de energia detectada. Por exemplo, este *threshold* pode ser determinado para maximizar a PDET enquanto mantém o nível de PFA abaixo de um determinado nível.

O AG proposto demonstrou conseguir encontrar caminhos satisfatórios com menor número de saltos, menor consumo energético e menor *path loss* do que as heurísticas LCG e GCF. A principal crítica a este trabalho é a utilização de agentes móveis em RSSF, já que o *overhead* para a transmissão dos dados dos agentes é alto, e consequentemente o gasto energético diminuirá o tempo de vida da rede. Esta abordagem difere das abordagens evolutivas apresentadas nesta tese por utiliza AG simples ao invés de sistemas classificadores.

3.3.3 Niu *et al*, 2006

No trabalho de Niu [Niu *et al*, 2006], um esquema de detecção distribuída e fusão de decisão é proposto para uma RSSF formada por um grande número de sensores. No nodo mestre que faz a fusão, o número total de detecções reportadas pelos sensores locais é empregado para teste de hipótese. Baseado na hipótese de que o sinal recebido decai à medida que a distância do alvo aumenta, as métricas probabilidade de alarme falso e probabilidade de detecção, são derivadas analiticamente através de aproximação pelo uso do teorema do limite central (*central limit theorem*). Esta abordagem é baseada em fusão de dados paralela da mesma forma que as abordagens apresentadas nesta tese.

3.3.4 Yuan *et al*, 2003

Um esquema em árvore é considerado em [Yuan *et al*, 2003]. O objetivo principal é sincronizar os múltiplos níveis de fusão de dados. Neste trabalho, cada nodo da rede deve decidir quando começar o processo de fusão de dados. O modelo de comunicação apresentado nesta tese considera a sincronização dos nodos em uma topologia estrela, enquanto que o trabalho de Yuan considera a sincronização dos múltiplos níveis da RSSF.

3.3.5 Morita *et al*, 2007

Um protocolo de transmissão de dados redundante é apresentado em [Morita *et al*, 2007]. O protocolo é utilizado para reduzir a taxa de perda de dados lidos de nodos sensores que são enviados a um nodo atuador. O protocolo utiliza uma topologia em estrela, e os nodos sensores tomam a decisão de enviar ou não o dado coletado. Portanto, o consumo de energia e a perda de mensagens são reduzidos. Entretanto, a decisão de não enviar uma determinada mensagem pode diminuir a confiabilidade da tomada de decisão, já que um menor número de amostras serão consideradas. Da mesma forma que a estratégia utilizada nas abordagens propostas nesta tese, a estratégia principal do trabalho de Morita é a redundância na transmissão de mensagens para aumentar a qualidade na tomada de decisão.

3.3.6 Costa e Sayeed, 2003

Dois classificadores sub-ótimos para fusão de dados são apresentados em [Costa e Sayeed, 2003]: um classificador baseado na média dos dados é considerado quando todas as medidas são correlacionadas. O outro classificador trata todas as leituras como independentes (fusão de decisão). Um método para eliminar dados corrompidos em redes de sensores é apresentado em [Nicholson, 2004]. Por conseguinte, dados corrompidos são detectados e não são considerados na fusão de dados, aumentando sua qualidade. A estratégia de aumentar a qualidade da fusão de dados é similar a apresentada nas abordagens desta tese.

3.3.7 Outras Abordagens de Fusão de Dados para RSSF

Uma abordagem de votação para aumentar a segurança da fusão de dados de uma RSSF é apresentada em [Pai e Han, 2006]. Nessa abordagem híbrida, a *base station* escolhe um nodo “vítima” que deve enviar a leitura diretamente.

Um algoritmo para detecção de queimadas em florestas é apresentado em [Liyang *et al*, 2006]. Nesta abordagem parâmetros como umidade, temperatura, fumaça e velocidade do vento são coletados. Os nodos são organizados em clusters, sendo que os *cluster-heads* calculam baseados em redes neurais as taxas de perigo de fogo. Os dados são enviados a um nodo gerenciador que

provê dois tipos de informações: (1) avisos de emergência para eventos anormais (detecção de fumaça ou alta temperatura); (2) taxa de perigo de fogo para cada cluster. Além disso, o usuário pode requisitar dados de temperatura e umidade em cada área. Esta abordagem apresenta também características de computação autônoma assim como as abordagens desta tese.

Uma abordagem de fusão de dados baseada na integração com a camada de rede da RSSF é apresentada em [Liang e Liu, 2006]. Porém, pouca informação é disponibilizada para que seja possível uma análise mais detalhada do trabalho.

O protocolo de [Jungmin *et al*, 2005] é baseado em uma estrutura em árvore, de acordo com o nível de confiabilidade exigido pelo usuário, o algoritmo adapta o número de sensores que irão participar do processo de fusão de dados. Neste trabalho, alguns nodos não fazem parte da árvore original e são utilizados no caso de uma maior necessidade de confiabilidade, da mesma forma que a estratégia de aumentar a QoF que é apresentada nesta tese.

O trabalho de [Wu *et al*, 2009] apresenta uma abordagem de escalonamento de sono para RSSF *low-duty cycle*. O autor considera um único cluster de sensores com um cluster-head, sendo que o *cluster* foi formado através de um algoritmo de formação de clusters prévio. Divide o tempo em épocas (relacionado com o MA do modelo de comunicação desta tese) cada época é precedida de um intervalo de tempo dedicado à sincronização dos relógios. A abordagem foi testada para redes IEEE 802.11 com o simulador Matlab, não tendo sido realizada implementação em um protótipo real.

3.4. Abordagens que garantem requisitos de *QoS* em RSSF

Uma abordagem de agrupamento de sensores em *clusters* é apresentada em [Koubaa *et al*, 2009]. Os autores demonstraram que a técnica chamada de H-NAME melhorou o *throughput* da rede, a confiabilidade e a eficiência energética, enquanto que o atraso de comunicação foi diminuído. O impacto do problema da estação escondida em redes IEEE 802.15.4 em topologia estrela também foi demonstrado através de simulações. Além disso, dois conjuntos de testes foram executados para demonstrar o desempenho da abordagem. Entretanto, a técnica de agrupar a rede em *clusters* diminui a quantidade de nodos ativos na rede. Além disso, os testes consideraram uma rede com 18 nodos IEEE 802.15.4 utilizando modo com *beacon*. Desta forma, H-NAME não apresenta uma solução para RSSF densas em topologia estrela já que os testes não consideraram uma RSSF com grande quantidade de nodos. Entretanto, a estratégia de diminuição da densidade da rede vai é semelhante a técnica de utilizar a probabilidade de envio utilizada nas abordagens AAMG, AAMG2, CEARSSF e FPRSSF.

Q-DAP é uma abordagem de fusão de dados que é executada nos nodos intermediários de uma RSSFS cluster-tree [Zhu *et al*, 2006]. Logo, a eficiência energética e o tempo de vida da rede são aumentados através da fusão de dados (que diminui o tráfego na rede da mesma forma que as técnicas de fusão de

dados apresentadas nesta tese), enquanto o atraso fim-a-fim e a perda de pacotes é diminuída. O principal esforço de Q-DAP é determinar quando e onde executar a fusão de dados, baseado somente na informação local do nodo. Q-DAP foi avaliado através de simulação e modelagem matemática. A principal crítica à abordagem é que esta considera uma topologia cluster-tree estática com rotas pré-determinadas. Além disso, a rede considera somente 18 nodos. Logo, a abordagem não foi testada para RSSF densas, além de utilizar rotas estáticas.

MMSPEED é um protocolo de roteamento para garantias de QoS probabilísticas em RSSF [Felemban *et al*, 2006]. MMSPEED garante a entrega de múltiplos pacotes com diferentes opções de velocidade no domínio do tempo, esta característica é semelhante aos requisitos temporais que são impostos aos algoritmos de fusão de dados desta tese. MMSPEED também provê vários requisitos de confiabilidade através de múltiplas opções de caminhos. Requisitos fim a fim são garantidos de forma localizada, o que é desejável para escalabilidade e adaptabilidade em RSSF densas e dinâmicas. No entanto, o uso de roteamento geográfico impõe aos nodos que suas posições sejam conhecidas. Desta forma, os autores consideram que os nodos possuem GPS ou serviços de localização distribuída. Dispositivos de GPS não funcionam satisfatoriamente em ambientes fechados e serviços de localização distribuída induzem uma sobrecarga extra através da necessidade de troca de pacotes (os nodos necessitam enviar sua localização em *broadcast*).

3.5. Abordagens cientes de Energia

Abordagens cientes de energia são freqüentemente propostas na literatura de RSSF. Os esforços nesta área são usualmente baseado em algoritmos de roteamento, protocolos da sub-camada MAC ou alguma modificação de hardware [Quan *et al*, 2007], [Heo *et al*, 2009], [Allipi e Galperti, 2008], [Ergen e Varaiya, 2006]. Abaixo apresentamos alguns desses esforços.

Um protocolo de agrupamento chamado REACA foi apresentado em [Quan *et al*, 2007]. O funcionamento de REACA é dividido em ciclos, o primeiro ciclo é dedicado a configuração da rede, e o segundo para transmissão de mensagens. A escolha do *cluster-head* é baseada no nível de carga da bateria de todos os nodos que compõem o *cluster*. Desta forma, o nodo com maior nível energético é escolhido como *cluster-head*. Um algoritmo de roteamento também é proposto. Entretanto, a abordagem foi validada somente por análise matemática. A escolha do cluster-head baseada em seu nível energético é semelhante a estratégia utilizada na abordagem RSSFCE.

EARQ [Heo *et al*, 2009] é um protocolo de roteamento baseado no nível energético da rede que garante confiabilidade, restrições temporais e economia energética. O principal objetivo deste protocolo é utilizar os caminhos com maiores níveis energéticos em uma RSSF. Simulações demonstraram que EARQ pode ser implementado em RSSF de aplicações industriais. Entretanto, EARQ não foi validado através de protótipos de RSSF. Protocolos de roteamento também foram propostos em [Allipi *et al*, 2009], onde uma

topologia *cluster-tree* foi considerada. A estratégia de garantir requisitos temporais e economia energética é a mesma das abordagens cientes de energia propostas nesta tese.

Um sistema adaptativo para coleta de energia solar em nodos de RSSF é apresentado em [Allipi e Galperti, 2008]. O principal objetivo dessa tecnologia é aumentar o tempo de vida dos nodos através de uma célula solar que capta energia e recarrega as baterias. Nessa implementação específica, a coleta de energia solar é possível mesmo em ambientes com pouca luminosidade. A principal crítica a esta abordagem de incremento do tempo de vida da RSSF é que somente pode ser utilizada em ambientes com luminosidade. Além disso, hardware extra é necessário nos nodos, o que aumenta o tamanho dos dispositivos.

Uma abordagem que lida com mobilidade de nodos em Redes de atores e sensores sem fio é apresentada em [Melodia *et al.*, 2010]. O principal objetivo desta abordagem é assegurar que os nodos se locomovam com um mínimo gasto energético. A validação da abordagem foi feita através de simulação.

PEDAMACS é um protocolo de *time division multiple access* (TDMA) para RSSF *multihop* que é apresentado em [Ergen e Varaiya, 2006]. Simulações demonstraram que PEDAMACS consegue atingir vários anos de duração de tempo de vida quando comparado com outros protocolos MAC de acesso aleatório que atingem meses ou mesmo dias. Entretanto, o protocolo TDMA não é indicado para RSSF com topologias dinâmicas (o que é comum em ambientes inóspitos).

3.6 Conclusão

Este capítulo fez um levantamento dos principais trabalhos relacionados à computação autonômica, fusão de dados em RSSF, abordagens que garantem requisitos de QoS e ainda abordagens cientes de energia. Em comum a todos esses trabalhos é o fato de não existir um modelo de RSSF único e que satisfaça a todos os tipos de abordagens e aplicações. Além disso, nitidamente há lacunas ainda a serem preenchidas pela comunidade científica. Principalmente, quando há restrições temporais associadas às mensagens. Além disso, a necessidade de abordagens autonômicas que garantam restrições temporais e economizem energia em aplicações de fusão de dados para RSSF densas e altamente dinâmicas será cada vez maior. O principal motivo dessa necessidade será a miniaturização dos dispositivos de RSSF o que acarretará em um aumento da quantidade de nodos das redes [Akyildiz *et al.*, 2009].

4. Modelo de Redes de Sensores sem Fio Adotado

4.1. Introdução

As abordagens e tecnologias de redes sem fio e computação móvel têm sido alvo de pesquisa há mais de uma década [Ilyas e Mahgoub, 2005]. De forma semelhante, redes de sensores usando infraestrutura cabeada vêm sendo empregadas há algum tempo em ambientes de manufatura [Sachenko *et al*, 1998]. Por outro lado, o surgimento das RSSF – as quais combinam módulos sem fio e nodos sensores em um mesmo dispositivo dedicado – é recente e vem demandando novas técnicas para suportar as aplicações propostas sobre essas redes.

Conforme discutido no Capítulo 2, o paradigma de RSSF com utilização de um grande número de nodos de baixo custo e pouco confiáveis oferece diversas vantagens frente à abordagem tradicional de implantação de poucos e dispendiosos nodos sensores de alta precisão. As RSSF permitem uma maior cobertura espacial, alta tolerância a faltas (através da redundância e distribuição de tarefas) e facilidade de implantação. Além disso, devido ao tamanho diminuto de seus nodos, essas redes são menos intrusivas no ambiente monitorado [Ilyas e Mahgoub, 2005].

No entanto, a implantação de uma rede com grande quantidade de nodos sensores – visando monitorar e atuar em determinado ambiente – precisa lidar com diversos desafios [Demirkol *et al*, 2006], [Heinzelman *et al.*, 2004], [Wener-Allen *et al*, 2005], tais como:

- Os nodos individuais são muito suscetíveis a falhas e esgotamento de energia, portanto, devido a esta característica, a topologia da rede se torna extremamente dinâmica.
- As RSSF são centradas a dados, tendo suas informações direcionadas a uma estação base, sendo necessário, no caso de topologias que não sejam estrela, o roteamento e fusão de dados ao longo do processo.
- As restrições temporais são intrínsecas nas RSSF [Stankovic *et al*, 2003]. O conceito de frescor de dados (*data freshness*) – ou validade temporal dos dados coletados – está implícita em quase todas as aplicações.
- Além disso, nos nodos dessas redes – por utilizarem comunicação sem fio e algumas vezes serem implantados em áreas de difícil acesso – o gerenciamento da energia, visando aumento do tempo de vida da rede, torna-se a principal questão a ser resolvida [Niu, 2006]. Estudos demonstram que a transmissão de 1 bit a uma distância de 10 a 100 m pode consumir até 100 vezes mais energia do que uma aquisição de dados ou uma instrução de processamento [Ilyas e Mahgoub, 2005]. Por conseguinte, a comunicação necessita ser cuidadosamente

gerenciada a fim de evitar retransmissões e colisões de pacotes e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia.

Nas RSSF com grande número de nodos, o gerenciamento e organização dos nodos tornam-se um dos maiores desafios. Paradigmas de computação autônoma – principalmente, auto-gerenciamento e auto-configuração – são necessários para lidarem com o dinamismo da topologia da rede, falhas de comunicação e falhas nos nodos. Além dessas características, a orientação à aplicação das RSSF aumenta os desafios para lidar com esta tecnologia.

Conforme apresentado no Capítulo 2, o IEEE 802.15.4 está se tornando o padrão *de facto* em RSSF. Existem pesquisas no sentido de verificar a adequação dessa tecnologia a RSSF densas [Koubaa *et al*, 2006]. Embora suas especificações com *beacon* habilitem a adoção de reserva de *slots* de tempo e sincronização dos nodos através de pacotes de controle [IEEE802.15.4, 2008], em redes densas não é possível a obtenção de determinismo temporal e garantias de entrega de mensagens devido a desistências de transmissão e interferências [Stankovic *et al.*, 2006]. Há a limitação no número de *slots* disponíveis, e o protocolo CSMA/CA adotado na subcamada MAC não oferece garantias temporais e de entrega de mensagens suficientes, conforme o estudo apresentado em [Koubaa *et al*, 2006]. O trabalho em [Morita *et al*, 2007] também demonstra que em uma RSSF que utiliza o protocolo CSMA/CA, à medida que o raio de alcance dos nodos aumenta, também aumenta a taxa de perda de pacotes.

Por conseguinte, enquanto não há evolução nas especificações do protocolo IEEE 802.15.4 visando oferecer mecanismos mais adequados para redes densas, torna-se necessária a utilização de abordagens na camada de aplicação ou de *middleware* que permitam um melhor gerenciamento da comunicação dos nodos. Esse gerenciamento precisará levar em consideração, dentre outras questões, a necessidade de gestão eficiente da energia, as restrições temporais da aplicação, a topologia dinâmica da rede e, em aplicações com fusão de dados, a quantidade mínima de dados necessários para a fusão.

Por fim, para ilustrar os desafios de uma aplicação de RSSF densa, podemos tomar como exemplo uma aplicação de monitoramento de atividade vulcânica apresentada em [Wener-Allen *et al*, 2005]. Nesse caso, os nodos podem ser implantados aleatoriamente por técnicos, os quais jogam os sensores dentro do vulcão. Alguns nodos podem cair em locais que impossibilitem a comunicação, ou serem danificados no processo. Assim, uma grande quantidade de nodos precisa ser implantada para garantir uma quantidade mínima de nodos operacionais. Por conseguinte, a quantidade de nodos no início da implantação já é desconhecida (apesar de poder ser estimada). Além disso, o local de difícil acesso impede qualquer manutenção humana. Para permitir o uso prolongado da RSSF, uma das metas da aplicação deverá ser maximizar o tempo de vida da rede. A rede precisará possuir capacidades autônomicas para se auto-configurar, auto-otimizar e auto-organizar frente às mudanças de topologia. Além desses desafios, a abordagem precisa atender os requisitos temporais da aplicação. Desta forma, dados coletados em um

determinado instante de tempo terão uma validade temporal. Técnicas de fusão de dados fazem-se necessárias, uma vez que os nodos individualmente são pouco confiáveis e pode-se ter a necessidade de combinar a leitura de diversos sensores para identificar atividades vulcânicas.

Além disso, as abordagens presentes nesta tese podem ser usadas em aplicações de monitoramento estrutural [Xu *et al.*, 2004]. Nesse caso, os nodos escravos devem enviar periodicamente informações sobre vibrações nas estruturas. O trabalho [Kim *et al.*, 2007] apresenta uma aplicação de monitoramento de ponte. A principal desvantagem desta implementação é o uso de uma topologia em linha, ou seja, caso um dos sensores falhe a comunicação é interrompida. Uma vez que a topologia em linha implica em um roteamento nodo a nodo, se um nodo falhar toda a rede fica comprometida. Portanto, a utilização de RSSF densas permitiria aumentar a confiabilidade deste tipo de aplicações através da inserção de nodos extras. Neste caso, a RSSF teria um tráfego de mensagens com validade temporal. Segundo [Shu *et al.*, 2007], redes densas cujos nodos enviam mensagens simultaneamente, as quais possuam validade temporal, é exatamente o tipo de cenário no qual diversas aplicações de RSSF precisarão lidar em um futuro próximo.

4.2 Um modelo para fusão paralela de dados em redes densas

Este capítulo apresenta o modelo de comunicação para abordagens de auto-otimização da rede em aplicações de fusão de dados com restrições temporais em RSSF densas. O modelo adotado neste trabalho foi inspirado em trabalhos encontrados na literatura [Kang *et al.*, 2004], [Yan *et al.*, 2003], [Niu, 2006], [Wu *et al.*, 2004]. Um estudo inicial, o modelo e algumas abordagens propostas serviram de base para alguns artigos apresentados em simpósios [Pinto *et al.*, 2007a], [Pinto *et al.* 2007b], [Pinto *et al.*, 2007c], e cujos resultados compuseram a primeira parte deste trabalho de doutoramento. Nesses primeiros trabalhos [Pinto *et al.*, 2007a], [Pinto *et al.*, 2007b], [Pinto *et al.*, 2007c], o foco se concentrou em uma rede com topologia estrela, prevista em redes IEEE 802.15.4, na qual todos os nodos alcançam a estação base com apenas um salto.

4.2.1 Visão geral do modelo

No modelo proposto há um nodo **mestre** (estação base) e nodos sensores **escravos**. Foi considerado um cenário de aplicação de RSSF onde existe um grande número de nodos escravos N_e , os quais coletam periodicamente dados escalares. O sinal coletado pelos nodos escravos é homogêneo ao longo de toda a área de monitoramento. Os dados coletados são enviados para um nodo **mestre**, o qual periodicamente recebe os dados coletados pelos nodos escravos e realiza a tarefa de fusão de dados. Todos os nodos escravos alcançam o nodo mestre com apenas um salto. Desta forma, no nodo mestre é realizada uma fusão de dados paralela. A Figura 4.1 ilustra o cenário adotado.

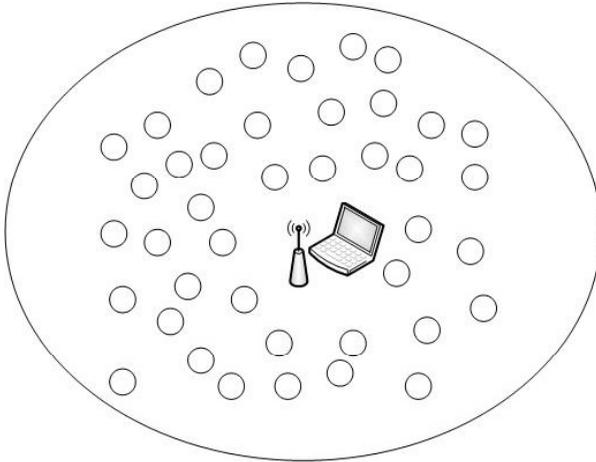


Figura 4.1. Cenário de rede de sensores sem fio densa.

O modelo adota o conceito de sessão de monitoramento. Uma sessão de monitoramento é um intervalo de tempo em que os nodos escravos enviam periodicamente seus dados ao nodo mestre. No final de cada sessão de monitoramento, considera-se que há algum tipo de tomada de decisão, baseada nos dados processados no nodo mestre. No entanto, essa tomada de decisão ocorre após o término da sessão e está fora do escopo deste trabalho.

Uma sessão de monitoramento é composta por uma sucessão finita de Macro ciclos (*MA*). Cada *MA*, por sua vez, é composto por Micro ciclos (*MI*). Um *MI* é um conceito utilizado para discretizar o tempo e representar o período de tempo em que cada nodo escravo envia uma **mensagem** M contendo seu dado coletado para o nodo mestre.

Cada nodo escravo é sincronizado através do *MI* e possui um **deadline** absoluto D para coletar a grandeza em questão (temperatura, umidade, etc) e enviar uma mensagem M para o nodo mestre. Isso é feito periodicamente em cada nodo escravo, a cada *MI*. A Figura 4.2 ilustra um exemplo de sessão de monitoramento com *MA* formados com duração de 6 *MI*.

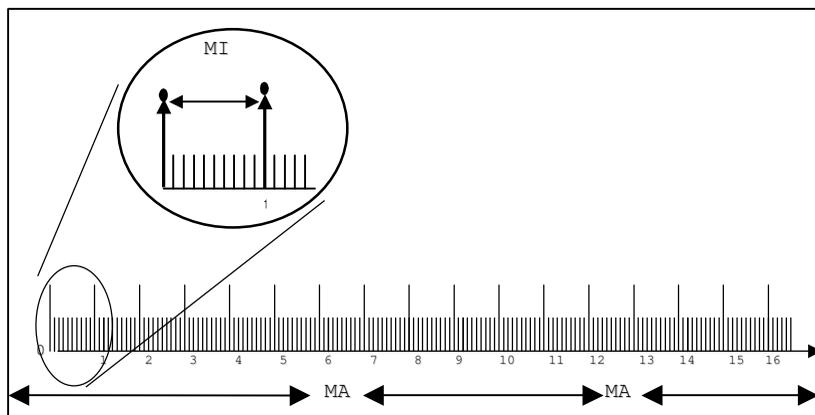


Figura 4.2. Representação gráfica de Macrociclo e Microciclo

O conceito de *MI* é utilizado para sincronizar os nodos, e também representa a periodicidade da tarefa de fusão de dados (tamanho do macrociclo). A cada *MI*, um nodo escravo pode enviar zero ou uma mensagem M que contém o dado sensoriado para o nodo mestre.

Cada mensagem M enviada por um nodo escravo possui um *deadline* absoluto D , que é o intervalo de tempo máximo no qual uma mensagem deve ser entregue ao nodo mestre, caso contrário, esta mensagem não será mais útil para a tarefa de fusão de dados e será descartada. Este *deadline* absoluto é computado baseado em um *deadline* relativo d . Uma arquitetura homogênea foi considerada onde todos os nodos escravos possuem o mesmo *deadline* relativo, o qual é enviado pelo mestre para os nodos escravos no início da sessão de monitoramento.

O nodo mestre realiza fusões de dados periódicas usando todas as mensagens M recebidas em cada *MI*. Para modelar a validade temporal dos dados coletados pelos escravos, considera-se que o nodo mestre só aceita para fusão de dados em um MI R mensagens enviadas pelos nodos escravos no mesmo MI R . Ou seja, o *deadline* absoluto de um nodo escravo no n -ésimo MI é $D = nR + d$, e o *deadline* relativo de uma mensagem é sempre $0 < d < R$, conseqüentemente, seu *deadline* absoluto respeita a inequação $nR < D < (n+1)R$.

No modelo proposto nem todo nodo escravo precisa enviar sua mensagem M a cada *MI*. Considera-se que a RSSF possui um parâmetro de **probabilidade de envio** P_e , a qual é compartilhada por todos nodos escravos. Esse valor de P_e controla o envio de mensagens pelos nodos escravos a cada *MI*. Como exemplo,

uma Pe configurada com valor 1 implica que cada nodo escravo não faltoso da rede, a cada MI , sempre irá enviar uma mensagem. Uma rede configurada com valor de Pe igual a 0,1 implica que os mesmos nodos, a cada MI , terão 10% de probabilidade de enviar mensagem. Uma vez que o sinal coletado é homogêneo e redundante, uma configuração adequada do valor de Pe torna possível reduzir o consumo energético, possivelmente reduzir colisões no envio de mensagens e, conseqüentemente, aumentar o tempo de vida da rede.

No início de cada MA os parâmetros de otimização são recalculados. Devido à dificuldade de intervenção humana em uma RSSF, esses ajustes nos parâmetros precisam ser feitos de forma automática, pelo menos no início de cada MA , segundo alguma técnica que permita auto-configuração e auto-gestão dessas redes. Esses parâmetros podem valer para toda a sessão de monitoramento, ou podem ser substituídos durante o MA no MI de *checkpoint*. Um *checkpoint* é um MI que ocorre apenas uma vez em cada MA de monitoramento, no qual o nodo mestre envia para os nodos escravos novos parâmetros de configuração, ajustados para se adequar melhor às condições atuais da rede. O primeiro MI de cada MA é sempre um *checkpoint*. Durante o *checkpoint*, os nodos escravos não enviam mensagem, pois este MI é usado para resincronização e para recebimento da mensagem do mestre. Caso a mensagem de *checkpoint* não seja recebida pelo nodo escravo, tal nodo deverá esperar em modo de escuta até o recebimento da nova mensagem de *checkpoint*, o que ocorrerá no próximo MA .

4.3 Algoritmos básicos que executam no mestre e nos escravos

No modelo adotado é considerado que o nodo mestre é implementado com os seguintes módulos: *Treceive*, que recebe dados dos nodos escravo; *Tfuse*, que executa a tarefa de fusão de dados e *SampleQueue*, onde as amostras são armazenadas. Um temporizador é executado quando um novo MI é iniciado. Este temporizador expira no início da fusão de dados e seu valor coincide exatamente com o deadline D das mensagens M . O tempo restante no MI é utilizado para a tarefa de fusão de dados, que é efetuada apenas com as mensagens recebidas antes do temporizador expirar.

Em cada nodo escravo existem duas tarefas importantes: *Tsense*, que coleta sinais físicos do ambiente e *Tsend*, que envia os dados coletados ao nodo mestre. A cada MI em um nodo escravo, *Tsend* leva em consideração a Pe para decidir se irá enviar ou não a mensagem. Após a execução de *Tsend*, para economizar energia, um nodo escravo pode dormir até o início do próximo MI .

Os nodos mestre e escravos têm seus relógios sincronizados antes do início da MA , e considera-se que o desvio (*drift*) dos relógios dos nodos seja pequeno o suficiente para não haver necessidade de sincronização até o próximo MA .

Após os nodos sensores terem sido implantados em alguma área, uma *MA* de monitoração é iniciada. A Figura 4.3 ilustra de forma simplificada os algoritmos básicos de fusão de dados implementados nos nodos escravo e mestre.

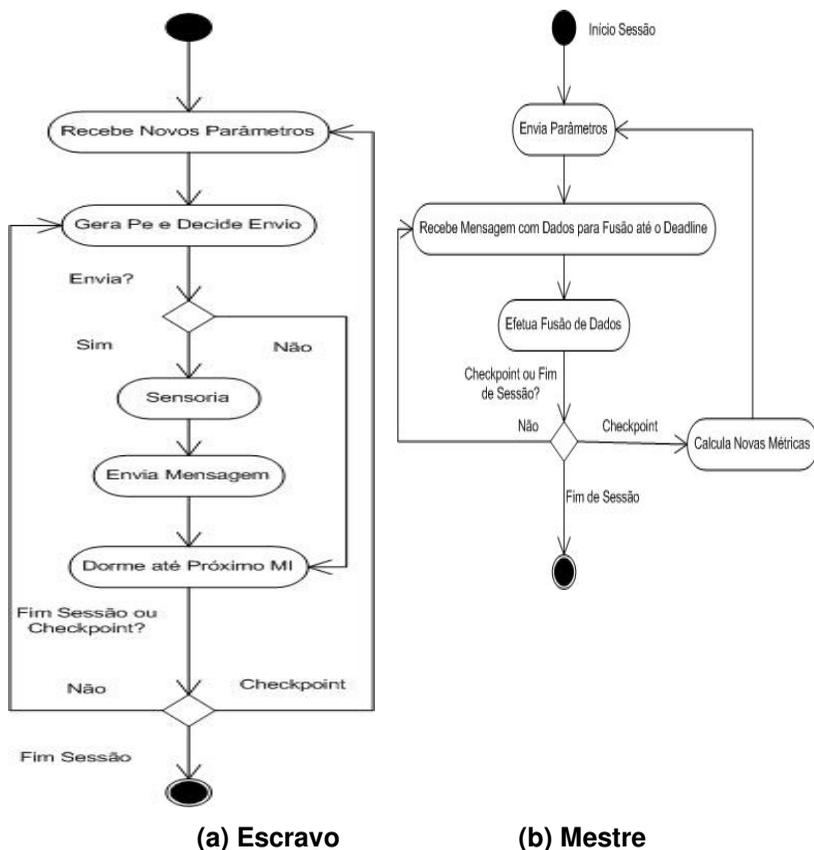


Figura 4.3. Algoritmos de fusão de dados nos nodos escravo e nodo mestre.

Os algoritmos da Figura 4.3 podem ser descritos conjuntamente pela seguinte seqüência de passos: 1) O nodo mestre envia informações necessárias aos nodos escravos, tais como: tempo de *MA*, tempo de *MI*, intervalo entre *checkpoints* e probabilidade de envio. Neste momento, os nodos são sincronizados com o intuito de iniciar o processo de fusão de dados. 2) Os nodos escravos começam a ler dados através dos sensores e enviá-los em mensagens ao nodo mestre. 3) O nodo mestre executa fusão de dados considerando somente dados que chegaram no *MI* atual. 4) Nodos escravos

entram em modo *sleep* até o próximo *MI*. 5) Caso seja um *MI* de *checkpoint* novos valores de parâmetros são enviados pelo nodo mestre para os escravos. Passos 2-5 são repetidos durante cada *MA*.

4.4 Métricas de desempenho em RSSF densas

Uma vez que os nodos são considerados inativos quando a bateria acaba, o objetivo primário das pesquisas em RSSF costuma ser, na maioria das vezes, o aumento do tempo de vida da rede [Demirkol *et al*, 2006]. No entanto, o exemplo descrito em [Wener-Allen *et al*, 2005] na Seção 4.1 serviu para mostrar que em qualquer abordagem voltada para RSSF densas, diversas métricas de desempenho precisam ser levadas em consideração. Um desafio que surge, portanto, é como conseguir balancear tais métricas, já que estas se encontram relacionadas de forma conflitante.

Como exemplo, tentar maximizar o número de amostras enviadas para a estação base, implica em um maior consumo energético. Principalmente considerando que em nosso modelo há redundância de sensores. Por outro lado, reduzir o número de mensagens enviadas pelos nodos, evitando retransmissões devido a colisões, e aumentando dessa forma a eficiência energética, pode reduzir o número de mensagens recebidas pela estação base e, conseqüentemente, reduzir a confiabilidade da tomada de decisão. O aumento no número de mensagens enviadas pelos nodos escravos também pode aumentar as colisões e retransmissões, aumentando conseqüentemente a taxa de perda de *deadlines* das mensagens. Além de todas estas restrições, a rede precisa ser capaz de se auto-organizar e auto-configurar em caso de queda de bateria ou falhas. É importante ressaltar, que outras aplicações, como a apresentada em [Mainwaring *et al*, 2002], necessitam de otimizações distintas devido à sua natureza.

Em nossos trabalhos iniciais utilizamos duas métricas de desempenho: Eficiência (*Ef*) e Qualidade da Fusão (*QoF*). A métrica *Ef* mensura a eficiência com que as mensagens enviadas alcançam o nodo mestre a tempo de serem fundidas, e é calculada através da Fórmula 4.1:

$$Ef = \frac{\sum_{i=1}^N Mr_i}{Pe \times Ne \times N} \quad (4.1)$$

Onde *N* é o número de *MI*s de cada *MA* (intervalo entre *checkpoints*); *Mr* são as mensagens recebidas pelo nodo mestre a tempo de cumprir seus *deadlines*. Em um *checkpoint*, o nodo mestre tem ciência do número de *MI* decorridos desde a última coleta de informações, da *Pe* utilizada pelos nodos escravos e uma estimativa do número de escravos ativos *Ne* (baseada no número de escravos distintos que enviaram mensagens). O valor de *Ne* é estimado pelo nodo mestre através do identificador de cada escravo cujas mensagens foram recebidas no *MI* corrente. Portanto, o denominador da

Equação 4.1 representa uma estimativa do total de mensagens enviadas desde o último *checkpoint*.

Em cada *checkpoint* será estimada a eficiência da comunicação da rede. Visto que a eficiência é uma relação entre o total de mensagens recebidas e o total de mensagens enviadas, esta métrica indica indiretamente o consumo de energia (ou eficiência energética) da rede como um todo. Além disso, a comunicação é um dos principais gargalos de consumo das baterias das RSSF. Desta forma, quanto maior a eficiência menor o desperdício de mensagens na rede (devido a problemas como estação exposta, estação escondida, ruídos, etc).

Um dos objetivos do nodo mestre é atingir um maior grau de eficiência durante uma sessão de monitoramento. Este ajuste é feito através da *Pe* que é enviada a cada *checkpoint* para os nodos escravos e que regula probabilisticamente a quantidade de mensagens que serão enviadas pelos nodos escravos no próximo *MA*. Desta forma, com um menor valor de *Pe*, os nodos escravos tendem a enviar um menor número de mensagens. Logo, a redução do tráfego de mensagens implicará em um aumento da *Ef*.

Importante ressaltar que a eficiência de comunicação não é a única métrica a se considerar em uma aplicação de fusão de dados em RSSF. A Qualidade da Fusão (QoF) indica a média de mensagens que chegam a tempo de serem fundidas pelo nodo mestre em cada *MI*, calculado a cada *checkpoint* durante um *MA* de monitoramento. O valor de QoF é calculado através da Fórmula 4.2. A idéia por trás dessa métrica é que quanto mais mensagens forem utilizadas na fusão de dados (ou fusão de decisão), melhor será a qualidade da tomada de decisão.

$$QoF = \frac{\sum_{i=1}^N Mr_i}{N} \quad (4.2)$$

4.5. Considerações sobre o modelo e métricas propostas

O modelo proposto para este trabalho foi baseado em diversas idéias e trabalhos existentes na literatura e nas especificações de padrões para RSSF. Por exemplo, a topologia estrela adotada está em conformidade com a topologia estrela proposta nos padrões do ZigBee.

O cenário de aplicação onde há uma rede densa em que diversos nodos tentam enviar mensagens simultaneamente é o mesmo proposto por [Shu *et al*,

2007]. Segundo os autores, esse será exatamente o tipo de cenário que será encontrado pelas aplicações de redes sem fio em um futuro próximo.

O conceito semelhante à de *MI* surge também no trabalho de [Yan *et al*, 2003] com o nome de *round*, cujo principal objetivo é maximizar a área de cobertura de uma RSSF. Naquele trabalho, a fase de monitoramento (equivalente ao nosso conceito de MA) é dividida em *rounds* de igual duração.

O conceito de Q_{OF} também é explorado em [Kang *et al*, 2004], embora o foco do trabalho seja em base de dados tempo real. Essa métrica é denominada Q_{OD} (*DataBase Freshness*). Naquele trabalho os níveis de perda de *deadline* e validade temporal são impostos pelo administrador do banco de dados. Os níveis de Q_{OD} são especificados pelo administrador, que conhece *a priori* os requisitos temporais da aplicação em questão.

O trabalho de [Niu, 2006] também considera um cenário de fusão de dados paralela onde o número de sensores escravo é desconhecido pelo nodo mestre. A regra da fusão (regra de contagem ou *counting rule*) impõe que, para tomar determinada decisão, o número de pacotes usados na fusão seja maior que determinado limiar. Este limiar pode ser concebido como uma variante da Q_{OF} , onde pode ser exigida uma quantidade mínima de mensagens na fusão de dados.

Esta tese propõe abordagens para auto-configuração da rede baseada em um algoritmo de aprendizado de máquina genético e em outras abordagens de computação autônoma. As abordagens propostas apresentam semelhança com os objetivos do trabalho de [Wu, 2004]. Este último propõe uma abordagem de otimização multi-objetivo. O consumo de energia, *path loss* (atenuação do sinal) e o nível de energia coletado por agentes durante a fusão de dados devem ser otimizados. Porém, diferentemente do trabalho descrito nesta tese, o trabalho em [Wu *et al*, 2004] enfoca uma fusão de dados serial.

5. Abordagens Autônomicas Simples

5.1. Introdução

Neste capítulo é analisado o comportamento do protocolo IEEE 802.15.4 em RSSF densas organizadas em topologia estrela. Além disso, são apresentadas duas abordagens autônomicas simples para aplicações de fusão de dados tempo real. A abordagem Fusão de Dados Probabilista para Redes de Sensores sem Fio (FPRSSF) consegue otimizar o envio de dados dos nodos escravos autonomicamente. Abordagem de Ajuste Autônomico da Probabilidade de Envio (CEARSSF), por sua vez, tenta ajustar a Pe de acordo com requisitos pré-estabelecidos de QoF ou Ef .

5.2 Comportamento do IEEE 802.15.4 em topologia estrela em RSSF densas

Embora a utilização de redes densas aumente a confiabilidade da tomada de decisão em uma aplicação RSSF, o aumento da quantidade de nodos ativos implica em um maior número de colisões. Além disso, problemas de erros de envio, da estação exposta e da estação escondida aumentam o consumo de energia devido à necessidade de retransmissões.

Um estudo de caso efetuado durante o desenvolvimento dessa proposta de tese, usando a ferramenta *TrueTime*¹, apresentado em [Pinto *et al*, 2007a], demonstra que à medida que a quantidade de nodos na rede aumenta, a eficiência de comunicação é reduzida. Por conseguinte, foi possível observar que uma aplicação com requisitos temporais que necessite de um alto Ne , tem um aumento do consumo de energia dos nodos (devido à competição entre os nodos escravos para enviar mensagens ao nodo mestre). Os valores de parâmetros do IEEE 802.15.4 utilizados são demonstrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Parâmetros de rede (MAC e físico)¹.

Parâmetro	Taxa de transmissão	Potência de Transmissão	Limiar de Sinal	Expoente de Pathloss	Tempo de Ack	Limite de Retransmissão
Valor	250 kbps	-3 dbm	-48 dbm	3,5	0,864	3

O gráfico da Figura 5.1 e a Tabela 5.2 demonstram a relação entre eficiência da comunicação Ef e qualidade da fusão QoF . Cada cenário foi simulado com uma MA de 2000 *MI*s com apenas 1 *checkpoint* no final do MA. Foi utilizado o simulador *TrueTime* configurado com protocolo IEEE 802.15.4. Nos experimentos, adotou-se o valor de 1 segundo para o *MI* e 0,98 segundo para *deadline* das mensagens dos nodos.

¹ <http://www.control.lth.se/truetime/>

Os resultados obtidos demonstram que à medida que o número de nodos aumenta, a eficiência decai, pois devido à colisões e desistências de transmissão, muitos pacotes são perdidos. Por outro lado, a qualidade da fusão também aumenta, ainda que lentamente devido, principalmente, ao aumento do número de mensagens sendo enviadas a cada *MI*.

Tabela 5.2 Resultados de simulação com 2000 *MI*.

<i>Total de nodos</i>	<i>Média Mensagens/MI</i>	<i>Eficiência (%)</i>
2	1,8	88,5
10	6,8	68,1
50	16,1	32,2
75	18,0	24,0
100	19,0	19,0
150	20,3	13,6
200	20,9	10,5

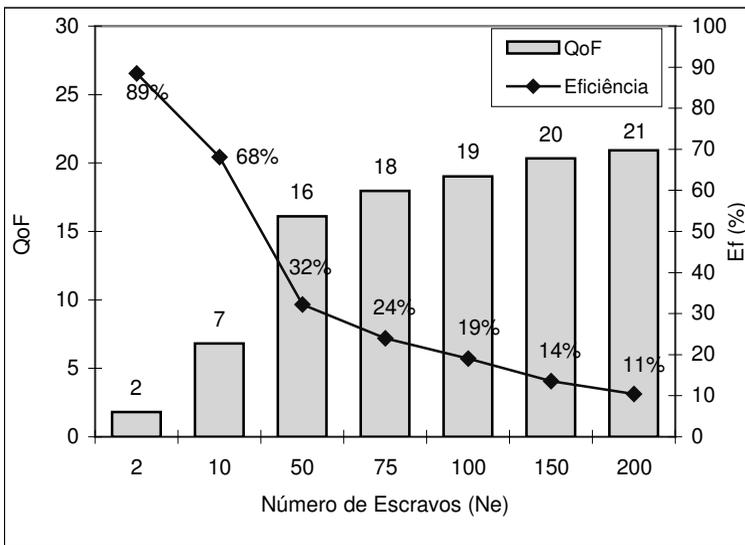


Figura 5.1. Relação em redes densas entre mensagens recebidas por *MI* e eficiência.

É possível notar que embora o protocolo IEEE 802.15.4 (em sua configuração em topologia estrela) seja indicado para aplicações de RSSF, abordagens para otimizar a comunicação são necessárias². Essas abordagens

² “Esta mesma conclusão foi apresentada em [Shu et al, 2007], o qual fez uma análise do CSMA-CA do IEEE 802.15.4 em redes com muitos nodos”

precisam realizar um balanceamento entre as diversas métricas a serem otimizadas em uma RSSF, através de heurísticas e técnicas de inteligência computacional. Além disso, devido à dificuldade de intervenção humana, são necessárias abordagens que visem a organização autônoma da comunicação.

Nas próximas seções são apresentadas duas abordagens autônomas simples para RSSF: (i) Seção 5.3 – abordagem de fusão de dados probabilista (FPRSSF), (ii) Seção 5.4 – abordagem de ajuste autônomo da Pe (CEARSSF).

5.3. Abordagem de Fusão de Dados Probabilista (FPRSSF)

A abordagem de fusão de dados probabilista (FPRSSF) tem como objetivo regular a taxa de envio de mensagens dos nodos escravos para o nodo mestre. Desta forma, a Pe é diminuída a cada checkpoint até que o patamar de Ef seja atingido. A Figura 5.2 demonstra o funcionamento do algoritmo.

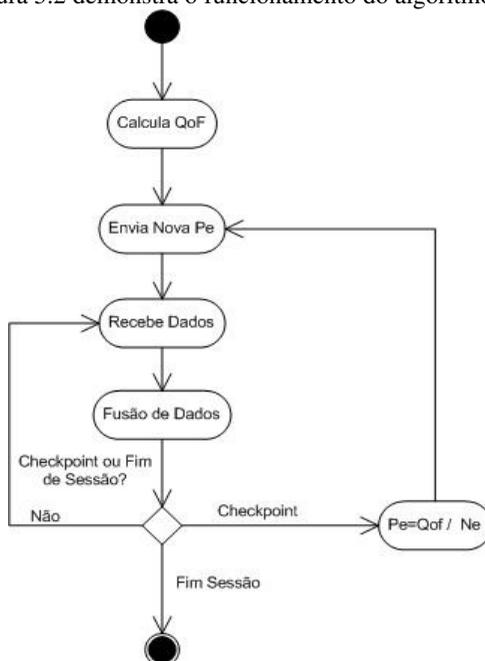


Figura 5.2. Algoritmo Mestre Fusão de Dados Probabilista.

Os resultados apresentados na Figura 5.1 mostram que há uma grande perda de eficiência quando o Ne da rede é aumentado. Por outro lado, a média de mensagens recebidas pelo mestre por MI aumenta muito lentamente a partir de determinado Ne . Como exemplo, se for comparada o Ne 100 com o Ne 200, há um decremento de 45% na eficiência. No entanto, a média de mensagens por MI aumenta muito pouco, passando do valor 19 para o valor 21. Há

necessidade, portanto, de se encontrar um Ne que ofereça uma solução de compromisso entre as métricas EF e QoF .

No conjunto de testes apresentados na Figura 5.1, cada nodo sempre envia uma mensagem a cada MI . Este comportamento representa uma probabilidade de envio com valor 1 (100%). Com base nesses experimentos, decidiu-se efetuar novos testes variando-se a probabilidade de envio de mensagem nos nodos escravos. A eficiência obtida em cada Ne usando $Pe=1$ foi utilizada como o novo valor de probabilidade de envio. Por exemplo, em uma rede com Ne de 10 nodos, utilizou-se a probabilidade de envio de 68% (veja Figura 5.2). Os valores de parâmetros do IEEE 802.15.4 utilizados são demonstrados na tabela 5.1.

Os resultados apresentados na Figura 5.3 demonstram que houve um grande ganho de eficiência quando a probabilidade de envio foi alterada. Por exemplo, na Ne 200 a eficiência aumentou aproximadamente 420%.

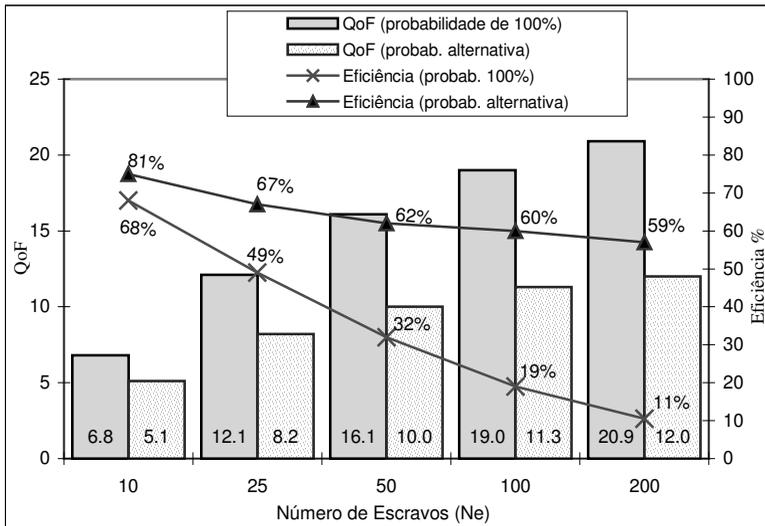


Figura 5.3. Envio Probabilista em diversos Ne .

A idéia básica da abordagem proposta é que o nodo mestre “aprende” após cada MA de monitoramento. A cada MA de monitoramento, a probabilidade de envio dos nodos é recalculada e será utilizada na próxima MA de monitoramento. Portanto, com uma menor probabilidade de envio foi possível reduzir a colisão e aumentar a eficiência da fusão de dados. A relação entre a eficiência obtida na MA anterior e número de nodos escravos indica a próxima probabilidade de envio nos nodos escravo. A Ne é estimada através do número de amostras de fontes diferentes recebidas pelo nodo mestre.

Como a probabilidade de envio é continuamente reduzida a cada *MA*, precisa existir um limiar mínimo de Q_{oF} a ser respeitado. Desta forma, assegura-se uma qualidade mínima da fusão de dados. Este tipo de abordagem pode ser utilizado em aplicações onde o sinal coletado pelos sensores é homogêneo em toda a área monitorada (ex. contaminação de recurso hídrico) [Patil *et al.*, 2004]. Levando em consideração que em uma rede com alto *Ne* e baixa probabilidade de envio, será possível alcançar um grande tempo de vida na rede. Desta forma, é possível compensar as restrições com uma grande quantidade de nodos de baixa qualidade e custo [Ilyas *et al.*, 2004].

A Figura 5.4 demonstra um teste com um *Ne* fixado em 50 nodos no qual a *Pe* começa com o valor 1 e é recalculada ao término de cada *MA*. O limiar inferior utilizado para a Q_{oF} foi de 3 amostras. O resultado mostra a evolução da abordagem após 7 sessões de monitoramento de 2000 *MI*s. Pode ser visto que com $P_{e=1}$ foi atingida uma eficiência de 32% e 16,1 de média de mensagens por *MI*. Por outro lado, após sete *MAs*, com uma probabilidade de envio de 7,3%, atingiu-se 86% de eficiência e 3,1 mensagens por *MI*. Por conseguinte, um balanceamento entre eficiência e número de mensagens por *MI* foi atingido após algumas sessões de monitoramento.

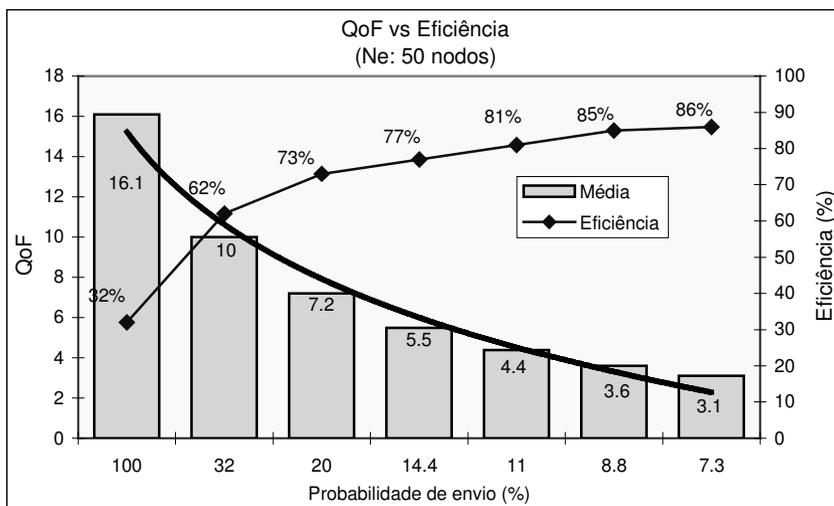


Figura 5.4. Resultados obtidos com abordagem probabilista (*Ne* 50 nodos).

Levando em conta que uma maior qualidade de dados requer um maior consumo de energia, podemos considerar que esta abordagem realiza um escalonamento dos nodos escravos através do uso da probabilidade de envio (nodos que não enviam, dormem imediatamente, o que costuma ser denominado na literatura por *sleep-awake scheduling*). Portanto, já que há

redundância de sensores, e se uma menor qualidade de dados é suficiente para o processo de fusão, a abordagem leva a um número menor de mensagens enviadas por *MI*.

A abordagem mostrou que consegue otimizar os níveis de eficiência, porém às custas da redução contínua nos níveis de Q_{oF} a cada *checkpoint*. O limiar de Q_{oF} que o algoritmo tem que respeitar impede que a redução ocorra até chegar ao valor zero. No entanto, outras abordagens que busquem encontrar uma solução de compromisso entre *Pe* e Q_{oF} são necessárias [Pinto *et al*, 2007c].

5.4. Abordagem de Ajuste Autônomo da Probabilidade de Envio (CEARSSF)

Baseado nas equações de *Ef* e Q_{oF} , foi desenvolvido um algoritmo de controle de *Pe*. A Equação 4 foi obtida através da manipulação das equações de Q_{oF} e *Ef*. Logo, através da derivação da equação de Q_{oF} (Equação 2, capítulo 4) foi obtida a Equação 5.1.

$$Mr = Q_{oF} \times N \quad (5.1)$$

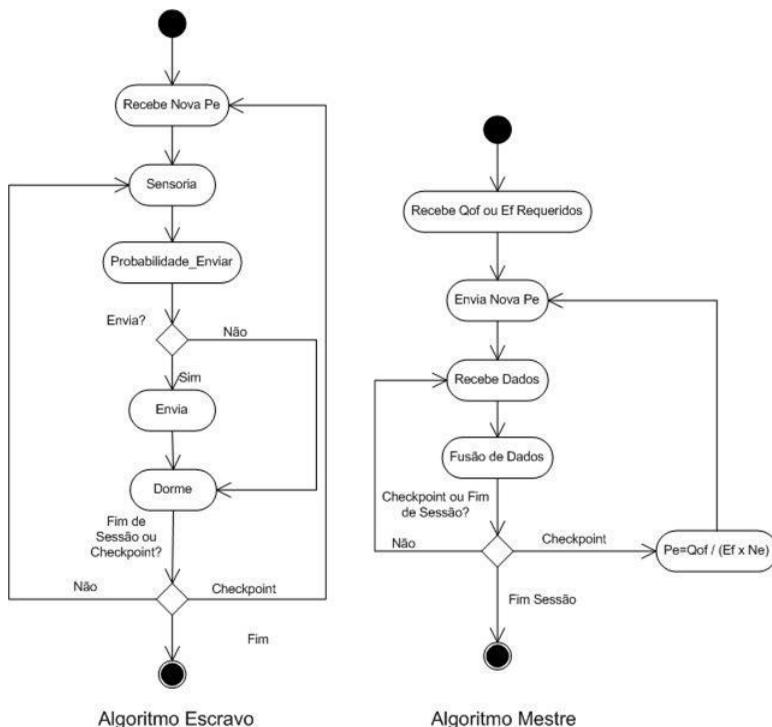
Da mesma forma, obtivemos a equação 5.2 através das equações de Q_{oF} e de *Ef*.

$$Ef = \frac{Q_{of}}{Pe \times Ne} \quad (5.2)$$

Logo, a Equação 5.3 é obtida e a *Pe* pode ser ajustada de acordo com uma Q_{oF} ou *Ef* alvo.

$$Pe = \frac{Q_{oF}}{Ef \times Ne} \quad (5.3)$$

Portanto, a *Pe* pode ser ajustada baseada em um requisito de Q_{oF} ou *Ef* imposto pelo administrador do Sistema. A Figura 5.5 apresenta detalhes dos algoritmos dos nodos Mestre e Escravo, os quais são derivados dos apresentados na Figura 4.3.



Algoritmo Escravo Algoritmo Mestre

Figura 5.5. Algoritmos da abordagem CEARSSF.

5.4.1. Resultados de Simulação

Para realizar as simulações, a posição do nodo mestre foi fixada no centro de um quadrado de 70x70m e 50 nodos escravos foram aleatoriamente implantados neste quadrado.

As hipóteses assumidas para estas simulações foram as seguintes:

- Todos os nodos escravos foram aleatoriamente implantados de forma que suas antenas sejam capazes de alcançar o nodo mestre em um único salto;
- A cada transmissão existe uma probabilidade de falha de 1%, programada no simulador;
- IEEE 802.15.4 em topologia estrela, utilizando CSMA/CA sem *beacon*;

Cada simulação teve duração de 1000 *MIs*.

A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros o IEEE 802.15.4 que foram utilizados nas simulações. O tempo de *MA* foi de 10 *MIs*.

O principal objetivo das simulações foi demonstrar a efetividade da utilização da Equação 5, para que a RSSF consiga atingir uma determinada *QoF* ou *Ef*.

As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam os gráficos das simulações, com diferentes níveis de Ef e QoF . É possível notar que a curva estabiliza em níveis baixos de Ef (30%) ou muito altos de QoF (16). Tal comportamento advém das limitações do protocolo IEEE 802.15.4. Trabalhos anteriores indicaram que uma rede IEEE 802.15.4 em topologia estrela atinge aproximadamente 34% de Ef e 16 de QoF . Entretanto, a principal limitação da presente abordagem é o conhecimento do comportamento da rede pelo usuário, já que diferentes quantidades de nodos escravos impõem diferentes limitações de Ef e QoF .

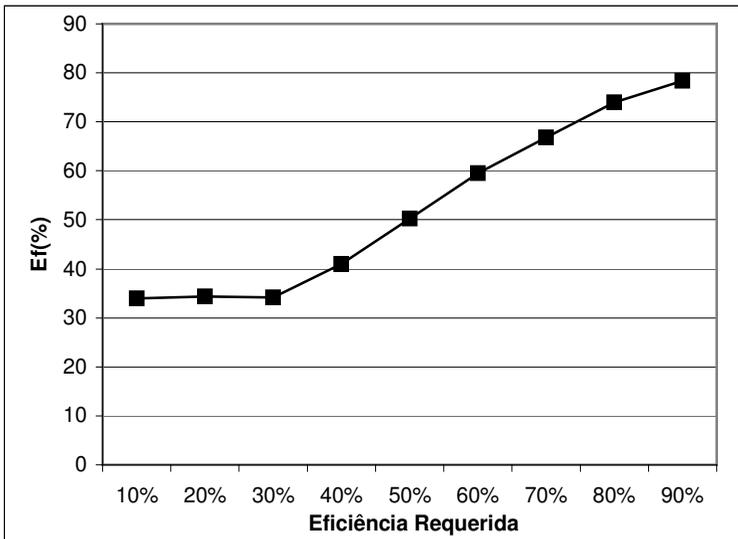


Figura 5.6. Ef alcançadas pelo CEARSSF através das Ef requeridas.

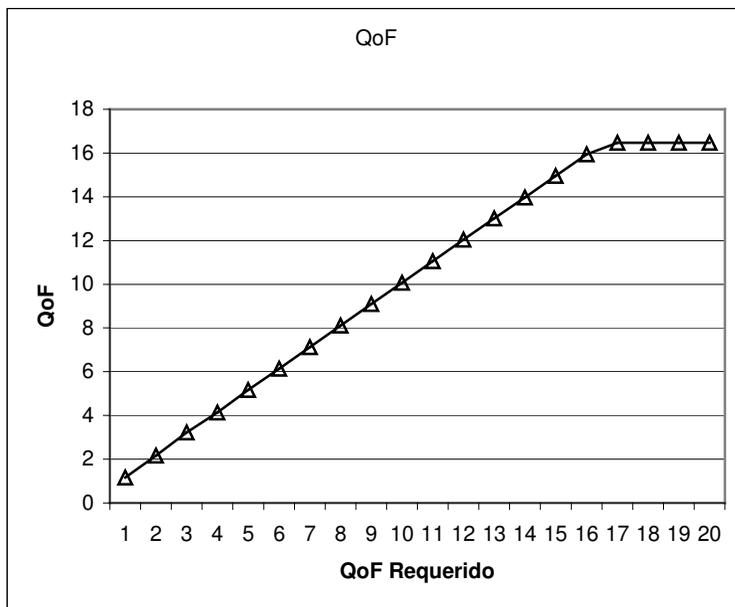


Figura 5.7. QoF atingida pelo CEARSSF através das QoF requeridas (1-20).

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo apresentamos o comportamento do protocolo IEEE 802.15.4 em RSSF densas. O protocolo mostrou-se incapaz de lidar com o aumento de nodos na rede em aplicações de fusão de dados tempo real. Por conseguinte, utilizamos o parâmetro Pe , que pode ser utilizado para regular probabilisticamente o número de mensagens que serão enviadas pelos nodos escravos. Desta forma, é possível obter um aumento na Ef .

Neste capítulo também foram introduzidas duas abordagens autônomicas simples que otimizam a Ef e tentam manter uma determinada QoF . A abordagem FPRSSF demonstrou ser de fácil implementação, entretanto não permite uma boa escalabilidade, além de necessitar que o administrador ou usuário do sistema possuam conhecimento prévio do sistema. A abordagem CEARSSF permite um melhor ajuste da Pe com o objetivo de atingir determinada QoF ou Ef . A principal vantagem dessas duas abordagens é sua facilidade de implementação. Além disso, através dessas abordagens é possível regular a taxa de transmissão dos nodos escravos de acordo com objetivos impostos pelo administrador da rede.

A título de comparação na Tabela 5.3 é apresentada uma análise comparativa entre as abordagens FPRSSF e CEARSSF com relação a algumas abordagens de fusão de dados disponíveis na literatura. CEARSSF apresentou resultados satisfatórios, e demonstramos que é possível obter *Ef* e *QoF* altos impostos pelos administradores de sistema. Entretanto devido às limitações do IEEE 802.15.4, não foi possível obter níveis de *QoF* acima de 16 e de *Ef* abaixo de 33% no cenário específico proposto (50 nodos escravos). Portanto, a presente abordagem autônoma impõe ao administrador do sistema um conhecimento prévio do comportamento do protocolo IEEE 802.15.4 para o cenário utilizado.

Tabela 5.3 Comparação qualitativa entre as abordagens de fusão de dados.

Autor/Projeto	Características principais	Tempo real	Modo de comunicação	Aplicação
[Patil <i>et al</i> , 2004]	Fusão de dados serial, utilizando técnicas de <i>space-filling curves</i> . Adapta o <i>sequential probability test</i> , utilizado em fusão de dados paralela. Considera sinal homogêneo em toda a rede.	Não	Serial	Deteccção de contaminação em reservatórios de água.
[Niu <i>et al</i> , 2006]	Utiliza redes densas para deteção de alvos. Utiliza fusão de decisão	Não	-	Deteccção de Alvos
[Costa e Sayeed, 2003]	Considera dois classificadores sub-ótimos: um baseado em média e outro baseado em fusão de decisão aonde todos os dados são considerados independentes.	Não	-	Classificação de Veículos Militares
[Yuan <i>et al</i> , 2003]	Apresenta protocolo de sincronização de cluster-heads. Onde o tempo de espera antes do início do processo de fusão é determinado.	Considera restrições temporais (latência). Mas não possui deadlines explícitos.	Híbrida	-
[Morita <i>et al</i> , 2007]	Protocolo de transmissão de dados redundantes,	Não	Paralela	-

	visa diminuir as perdas de pacotes.			
[Liang <i>et al</i> , 2005]	Algoritmo para detecção de queimadas baseado em redes neurais.	Sim	Híbrida	Detecção de Queimadas em Florestas
[Liang <i>et al</i> , 2006]	Abordagem de fusão de dados incorporada na camada de rede de uma RSSF.	-	-	-
[Pai e Han, 2006]	Abordagem de votação para aumentar a confiabilidade da fusão de dados.	-	Híbrida	-
[Jungmin <i>et al</i> , 2005]	Protocolo de fusão de dados autônoma	-	Híbrida	-
FPRSSF	Abordagem autônoma para ajuste do envio de mensagens em aplicações de fusão de dados paralela com restrições temporais.	Sim	Paralela	Aplicações que apresentem necessidade de grande número de sensores como monitoramento ambiental ou monitoramento de estruturas
CEARSSF	Abordagem autônoma que consegue balancear <i>Ef</i> e <i>QoF</i> através de requisitos impostos pelo administrador do sistema.	Sim	Paralela	Idem FPRSSF

6. ABORDAGEM DE FUSÃO DE DADOS AUTÔNOMICA COM APRENDIZADO DE MÁQUINA GENÉTICO (AAMG)

6.1 Introdução

Segundo o modelo adotado para este trabalho, o nodo mestre não tem ciência da quantidade exata de nodos escravos que estão ativos em um determinado momento. Desta forma, neste capítulo é proposta uma abordagem que utiliza técnicas de computação autônoma baseadas em algoritmo de aprendizado de máquina genético (sistemas classificadores). A técnica de aprendizado de máquina genético mostrou-se bastante apropriada para utilização em computação autônoma, pois evolui adaptando os indivíduos dinamicamente de acordo com as variações de ambiente.

O objetivo principal da abordagem proposta é a manutenção da qualidade da fusão e a obtenção da maior eficiência de comunicação possível. Para facilitar a compreensão da abordagem, a seguir são apresentados conceitos sobre sistemas classificadores e algoritmo genético. A abordagem denominada de AAMG (Algoritmo de Aprendizado de Máquina Genético) foi extensamente validada através de simulação e também através de implementação em protótipo de RSSF. A segunda versão AAMG2, que apresenta duas fases (fase de aprendizado baseada no AAMG e fase *expert* – que utiliza os valores “aprendidos” durante a fase de aprendizado) foi validada através de medições em um protótipo desenvolvido.

6.2. Sistemas Classificadores e Algoritmos Genéticos

Sistemas classificadores são sistemas de aprendizado de máquina, capazes de aprender regras sintaticamente simples com o propósito de guiar seu desempenho em um ambiente arbitrário [Mitchell, 1996]. Um sistema classificador consiste de três componentes principais: Sistema de Regras e Mensagens; Sistema de Divisão de Créditos (Banco) e Algoritmo Genético [Goldberg, 1989].

O sistema de regras de mensagens de um sistema classificador é um esquema computacional que usa regras como seu único dispositivo algorítmico. As regras são geralmente da seguinte forma: se <condição> então <ação>. O significado da regra de produção é que a ação deve ser tomada quando a condição é satisfeita. Os classificadores geralmente possuem um alfabeto ternário {0, 1, #}, onde # é considerado o símbolo “tanto faz”: pode significar tanto 0 quanto 1.

Uma mensagem recebida do sistema pode ativar um ou mais classificadores. Podemos tomar como exemplo o conjunto de classificadores apresentados na Tabela 6.1:

Tabela 6.1. Exemplo de conjunto de classificadores.

Condição	10#01#	11#1#0	0#1111	100001
Ação	100	111	001	110

Se o sistema receber do ambiente a mensagem “101011”, o primeiro classificador será ativado e a ação “100” será executada. Um sistema classificador é capaz de adaptar seus classificadores, de forma a privilegiar aqueles que enviam ações que agregam valor ao ambiente em que este está inserido. Desta forma, o sistema classificador é capaz de adaptar-se a ambientes adversos.

Na criação do sistema classificador, todos inicialmente possuem a mesma aptidão. Quando um classificador é escolhido, este deve “pagar” uma parte de sua aptidão ao **banco**. A quantia a ser paga ao banco é determinada através de uma taxa pré-definida. Quando mais de um classificador satisfizer uma determinada condição, será escolhido aquele que tiver a maior quantia a pagar ao banco. Esta quantia será paga ao classificador que gerou tal mensagem, se a ação que este executou no sistema tiver sido positiva. Caso contrário, o montante é armazenado e pago ao próximo classificador que enviar uma ação positiva para o sistema. De tempos em tempos um algoritmo para encontrar as “melhores” soluções – denominado **algoritmo genético** – é ativado, e os classificadores são evoluídos. Geralmente a evolução é definida através de um número de consultas ao sistema classificador.

Algoritmos genéticos são algoritmos de busca, criados por John Holland no início dos anos 1970, baseados nos mecanismos de seleção natural [Goldberg, 1989], [Mitchell, 1996], [Holland, 1984]. De acordo com os mecanismos de seleção natural os indivíduos mais adaptados possuem mais chances de sobreviver e deste modo repassar seu código genético para seus descendentes.

Em um algoritmo genético os indivíduos de uma população são representados pelos seus cromossomos (genótipo), que usualmente são representados por um conjunto de caracteres ou bits. A cada nova geração, um novo conjunto de criaturas artificiais (conjuntos de caracteres) é gerado com base nos fragmentos de material genético dos indivíduos mais aptos das gerações passadas. O foco central da pesquisa dos algoritmos genéticos é a robustez. Caso os sistemas artificiais sejam mais robustos, o custo de redefinição de tais sistemas pode ser reduzido, ou eliminado. Sistemas que atingem níveis mais altos de adaptação são capazes de executar melhor e por mais tempo.

6.3. Ajuste dinâmico da probabilidade de envio baseada em sistema classificador

O objetivo da abordagem proposta é adaptar a Pe dos nodos escravos ao final de um MA S de forma que seja maximizada a eficiência Ef e mantido um nível aceitável de QoF . Desta forma, o sistema classificador ajusta a Pe recebendo como parâmetro de entrada ou condição a variação da eficiência. A variação da eficiência ΔE em uma MA i é calculada através da Fórmula 7:

$$\Delta Ef_i = \left[\left(\frac{Ef_{i-1}}{Ef_i} \right) - 1 \right] \times 100 \quad (7)$$

De acordo com ΔE , a condição de entrada é traduzida para o alfabeto do cromossomo dos classificadores. Após a tradução, o sistema classificador é consultado e uma determinada ação é imposta ao ambiente. Para que o classificador possa impor uma ação ao ambiente, deve pagar um certo **montante** ao **banco**. Antes da consulta é verificado se o último classificador aumentou ou não a eficiência. Em caso positivo o montante disponível no banco é transferido para o classificador que impôs a ação bem sucedida.

Portanto, o montante de cada classificador é utilizado como indicativo de sua aptidão frente ao ambiente atual. A tendência é que classificadores bem sucedidos acumulem maiores montantes ao longo do tempo de funcionamento do sistema. Os classificadores usados têm o seguinte formato: $\langle C1 \rangle + \langle C2 \rangle : \langle A1 \rangle + \langle A2 \rangle$.

Tabela 6.2. Descrição dos classificadores utilizados no sistema classificador.

<i>Campo</i>	<i>Número de Bits</i>	<i>Descrição</i>	<i>Codificação</i>
C1	1	Indica se eficiência da última seção de monitoramento aumentou ou diminuiu	0 = diminuiu 1 = aumentou
C2	3	Indica nível de mudança da eficiência da última seção	000 = [0%;12%] 100 = (48%;64%) 001 = (12%;24%) 101 = (64%;72%) 010 = (24%;36%) 110 = (72%;84%) 011 = (36%;48%) 111 = (84%;100%)
A1	1	Indica se a Pe será aumentada ou diminuída para a próxima seção	0 = diminuir 1 = aumentar
A2	3	Indica o nível de mudança da Pe da próxima seção	000 = 12% 100 = 64% 001 = 24% 101 = 72% 010 = 36% 110 = 84% 011 = 48% 111 = 100%

Tabela 6.3. Possível população de classificadores.

<i>Condição</i>	<i>Ação Montante</i>
0000	0001 1000 1000 500 1001 200 1010 300
0001	1000 120
...	...

De acordo com a Tabela 6.2, caso ΔE seja -10% a condição de entrada será montada da seguinte forma: o campo C1 será “0” (já que houve uma queda na eficiência), o campo C2 será configurado para “000”, desta forma, a condição de entrada será “0000” se considerarmos uma população de classificadores como na Tabela 6.3. A ação que será imposta ao ambiente será “0001”, pois tem o maior montante e supostamente é a mais adaptada para a condição de entrada “0000”. Desta forma, utilizando ações de quatro bits, sendo que o primeiro bit pode assumir “0” ou “1”, temos 16 tipos de condições. Para reduzir o *overhead* no nodo mestre, na inicialização do sistema classificador, são geradas as 16 condições possíveis, sendo que cada uma possui quatro tipos de condições diferentes (geradas de forma aleatória).

Foi utilizado cruzamento de um ponto somente na parte da ação, logo as condições nunca terão que ser refeitas. Na seleção de reprodutores, uma determinada condição é escolhida aleatoriamente e a ação mais adaptada é escolhida como um dos reprodutores, enquanto o outro reprodutor é escolhido aleatoriamente dentre as ações. Os descendentes substituem as ações de menor adaptabilidade. Todos os classificadores recebem a mesma quantidade de adaptação em sua criação. A cada consulta, o classificador que impuser uma ação ao sistema deve pagar 10% de sua adaptabilidade. Somente classificadores que aumentam a eficiência recebem a quantia disponível no banco. O algoritmo detalhado em diagrama de estados é apresentado na Figura 6.1.

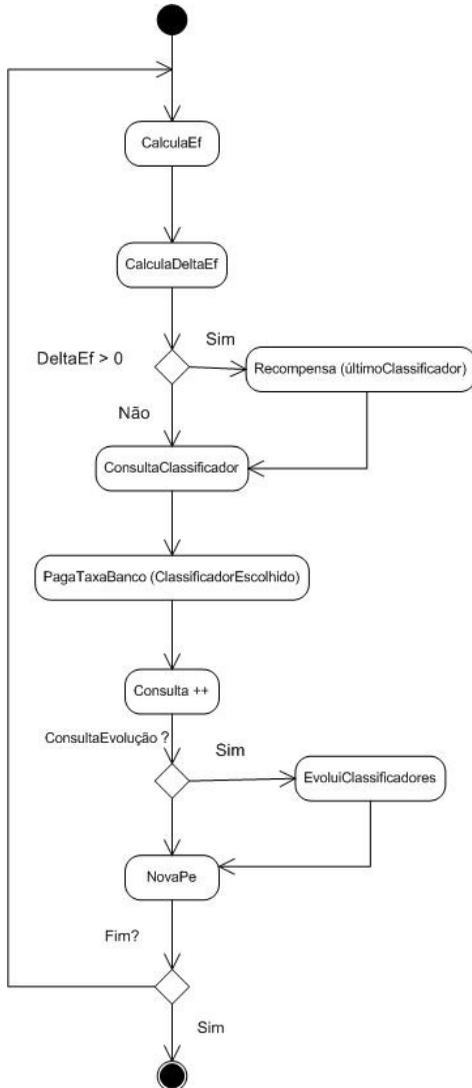


Figura 6.1. Diagrama de Estados AAMG

6.4. Resultados Simulados

Para avaliar a abordagem proposta, foram realizadas simulações no TrueTime. Para isto foram utilizados os valores de parâmetros para redes 802.15.4, os quais foram especificados na Tabela 5.1 (esses são os valores adotados no TrueTime).

Os parâmetros utilizados referentes ao algoritmo de aprendizagem de máquina genético foram configurados de acordo com a Tabela 6.4.

Tabela 6.4. Parâmetros da simulação do algoritmo de aprendizagem.

Parâmetro	Ne	Tempo de checkpoint	Taxa de reposição	Probabilidade de mutação	Montante	Tamanho população	Tamanho da ação	Consulta da evolução
Valor	Variável	5 Ms	2	0,01	100	16	4	15 MAs

Foram consideradas três métricas na simulação: (i) eficiência nominal, a qual foi mensurada através da estimativa do nodo mestre a respeito da eficiência (*vide* Equação 1); (ii) eficiência efetiva, eficiência de comunicação calculada com os valores reais; (iii) qualidade da fusão, calculada segundo a Equação 3.

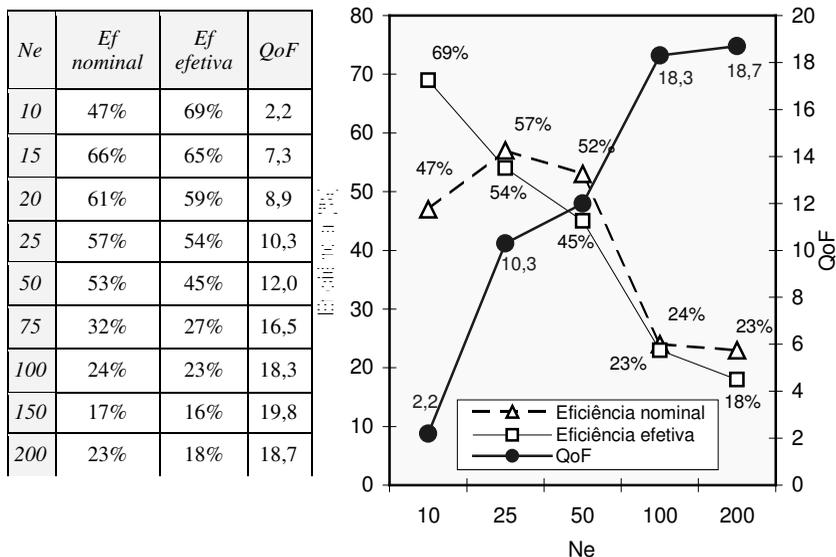


Figura 6.2. Resultados referentes à variação de Ne.

A relação entre eficiência nominal e efetiva indica o grau de acerto da estimativa de eficiência efetuada pelo nodo mestre. Considerando que a decisão de ajuste da P_e é feita de acordo com a eficiência estimada, quanto mais próximo as duas medidas estiverem, maior será o grau de acerto do sistema classificador.

O gráfico e a tabela da Figura 6.2 demonstram que existe uma discrepância de valores significativa entre eficiência efetiva e nominal com um N_e pequeno (10 nodos). Essa discrepância é reduzida à medida que a N_e aumenta. Nota-se ainda que, embora o objetivo principal do sistema classificador seja aumentar a eficiência, é mantido um compromisso de manter um certo grau de Q_oF . A P_e influencia diretamente na eficiência (quanto menor seu valor, menor a quantidade de mensagens trafegando na rede e, por conseguinte, maior a eficiência). Porém, se a P_e for ajustada para valores extremamente baixos, o número de mensagens chega a zero em alguns MIs , o que faz com que a eficiência decaia repentinamente. Quando isso ocorre, o algoritmo adaptativo volta a aumentar novamente a P_e no próximo MA .

Na Figura 6.3 são apresentados os resultados da evolução da medida de eficiência nominal da simulação em diferentes N_e . Com o N_e de 200 nodos, Figura 6.3(a), nota-se que existem pontos em que a eficiência atinge picos e logo após volta a estabilizar. O sistema classificador possui um comportamento de “tentativa e erro” onde este testa novas possibilidades de valores para conseguir otimizar a métrica em questão.

O N_e de 150 nodos sensores, Figura 6.3(b), ainda não demonstrou resultados de eficiência acima de 20% ao longo das sessões de monitoramento. Porém, o sistema classificador conseguiu estabilizar a eficiência em torno de 10% e 20% na maioria dos MIs . As médias foram de 16% de eficiência e 19,8 de Q_oF . Desta forma, obteve-se um número razoável de leituras a cada fusão de dados. Essa quantidade de sensores é ainda muito alta para ser implantada em somente um cluster, com um único nodo mestre coordenando. Observa-se que, dependendo do N_e , a faixa em que a eficiência estabiliza difere. Os gráficos (c) a (f) da Figura 6.3 demonstram que em menores níveis N_e o sistema classificador atinge maiores eficiências. As fases de “aprendizado” onde o sistema classificador testa novos valores de P_e estão presentes em todos os experimentos.

O sistema classificador conseguiu adaptar-se à variação de N_e , o seu objetivo principal. Desta forma, a utilização da presente abordagem demonstrou que a abordagem presente é promissora.

Embora tenhamos utilizado somente uma métrica como condição de entrada do sistema classificador, o mesmo manteve a Q_oF em uma faixa aceitável. Portanto, a abordagem presente demonstrou ser capaz de adaptar-se a diferentes objetivos de QoS dentro de uma aplicação de RSSF.

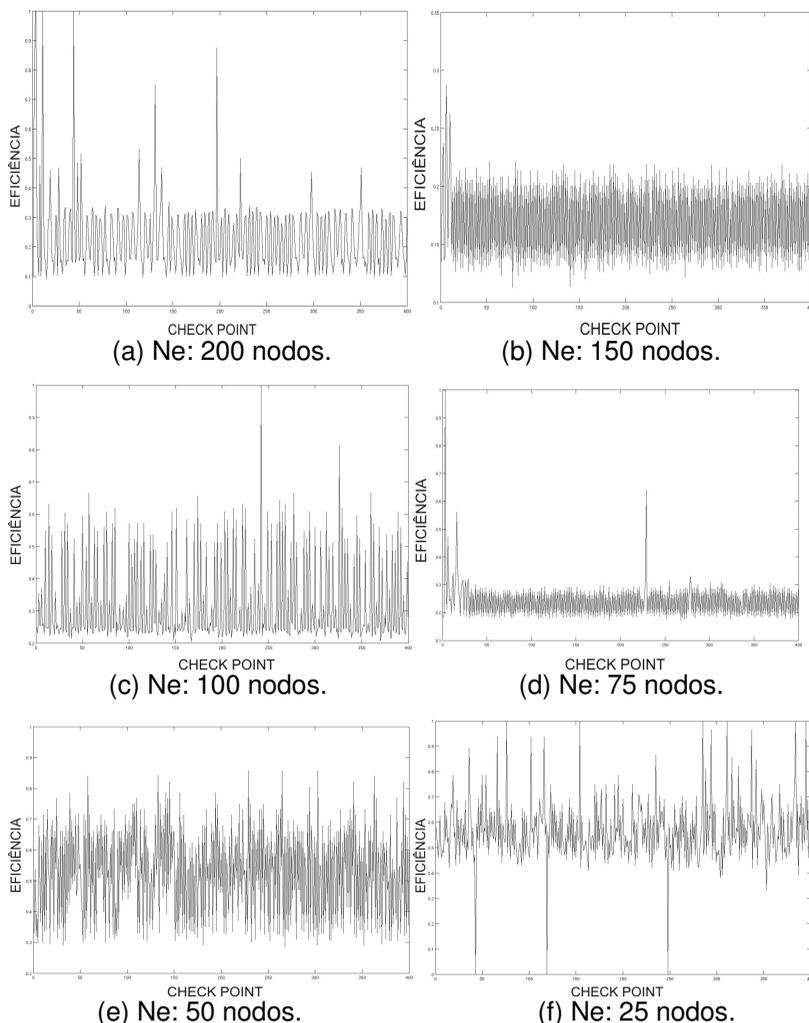


Figura 6.3. Relação entre QoF e Eficiência nominal com variadas N_e .

Na segunda bateria de testes do AAMG (IECON 2009 [Pinto *et al*, 2009]), o objetivo era verificar se o AAMG seria capaz de adaptar-se a diferentes topologias e a nodos faltosos. A abordagem foi avaliada via simulação (TrueTime). Da mesma forma que a bateria de testes anterior, considerou-se uma topologia estrela com IEEE 802.15.4, o nodo mestre foi colocado no centro de um quadrado de 70x70 metros e 50 nodos escravos foram implantados aleatoriamente ao redor do nodo mestre (os nodos escravos eram capazes de alcançar o nodo mestre em um único salto). Entretanto, a cada experimento, uma nova topologia de rede (posição dos nodos escravos) era aleatoriamente

gerada. Além disso, o esquema de faltas dos nodos aumentou a incerteza da topologia.

O objetivo do esquema de faltas era adicionar um comportamento imprevisível à RSSF. Desta forma, a cada MI alguns nodos escravos poderiam ter falhas na comunicação (probabilidade de 0,01 de ocorrer falha a cada transmissão). Esta característica reforça a necessidade de uma abordagem adaptativa com o AAMG.

A simulação buscou testar o desempenho do AAMG em uma RSSF IEEE 802.15.4 aleatoriamente implantada. A capacidade de aprendizado do AAMG também foi testada. Desta forma, o tempo de simulação foi variado (foram realizados testes com 500s, 1000s, 1500s e 2000s de simulação), sendo que para cada tempo de simulação foram realizadas 33 simulações. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 5.2 (parâmetros do IEEE 802.15.4) e 6.4 (parâmetros do AAMG).

O principal objetivo do AAMG é aumentar a eficiência da comunicação em um ambiente cuja topologia de rede seja desconhecida para o nodo mestre (o nodo mestre otimiza o valor de P_e de acordo com as condições da comunicação). Nota-se na Figura 6.4 que a eficiência da comunicação mantém sempre o mesmo nível quando o padrão IEEE 802.15.4 é utilizado. Entretanto, quando o AAMG é utilizado, é possível notar um ganho de quase 10% na eficiência da comunicação.

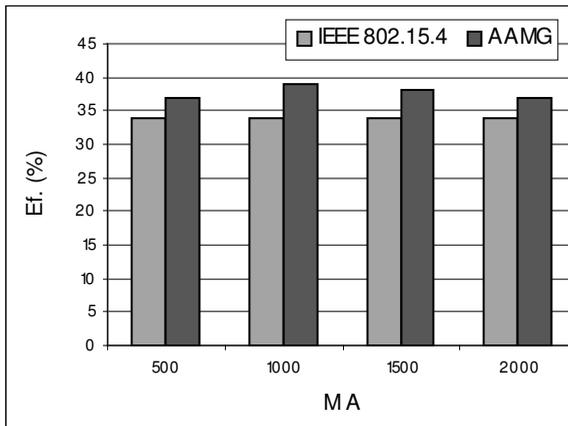


Figura 6.4. Comparação dos resultados de Ef do AAMG e IEEE 802.15.4.

A máxima eficiência da comunicação foi coletada em 33 simulações. O AAMG sempre atingiu melhores níveis de comunicação neste quesito também. O comportamento estático do IEEE 802.15.4 é evidenciado, o que impossibilita que este protocolo seja capaz de aprender melhores padrões de comunicação quando a topologia da rede é modificada.

A Tabela 6.5 apresenta a média e desvio padrão de 33 simulações. O AAMG apresenta maiores valores de desvio padrão do que o IEEE 802.15.4. Isto é devido à característica de aprendizado apresentada pelo AAMG. O funcionamento do AAMG o leva a testar diferentes valores de Pe , a fim de obter maiores níveis de eficiência da comunicação. Logo, uma vez que o IEEE 802.15.4 não é capaz de otimizar a Ef , o desvio padrão e a Ef são mantidos baixo.

O nível mais alto de Ef foi atingido em 1000 MI s de simulação, quando o AAMG apresentou uma média de 39% de Ef . A Figura 6.5 apresenta a Ef máxima atingida em 33 simulações. É possível notar que o AAMG sempre atinge níveis mais altos de Ef .

Tabela 6.5. Média das Eficiências.

MIs	AAMG	IEEE 802.15.4
500	37+/-2	34+/-0,7
1000	39+/-3	34+/-0,5
1500	38+/-2	34+/-0,2
2000	37+/-2	34+/-0,1

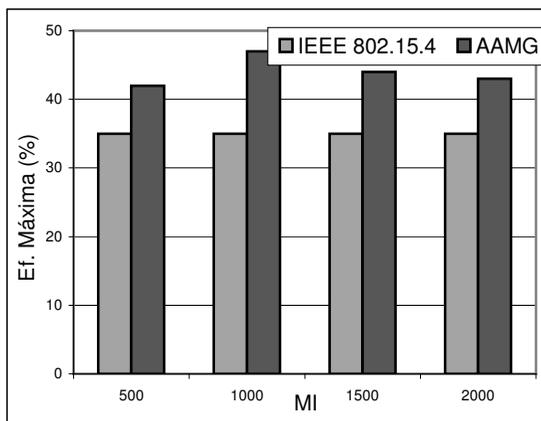


Figura 6.5. Comparação da Máxima Ef. Atingida.

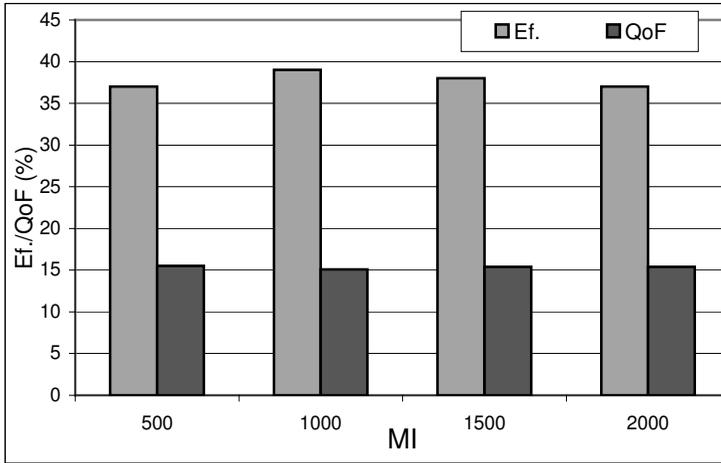


Figura 6.6 Comparação da Máxima Ef Atingida

Uma análise da Figura 6.6 indica que o *QoF* é mantido quase sempre no mesmo nível, em todas as simulações. Entretanto o nível mais alto de *QoF* foi atingido em 1000 MIs de simulação. Isto pode ser explicado através do comportamento do AAMG, que testa diferentes níveis de *Pe*, porém não estabiliza em um ótimo global.

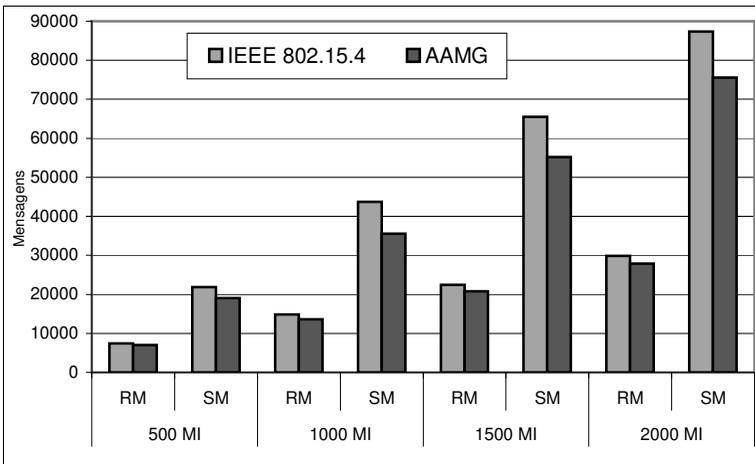


Figura 6.7. Comparação entre Mensagens Enviadas(SM) e Mensagens Recebidas(RM).

A relação entre mensagens recebidas (RM) e mensagens enviadas (SM) é apresentada na Figura 6.7. Nota-se que o AAMG sempre apresenta maiores níveis de E_f que o protocolo IEEE 802.15.4. Entretanto, uma RSSF executando o AAMG proposto envia um número menor de mensagens que uma RSSF baseada em IEEE 802.15.4. Desta forma, é possível concluir que o AAMG proposto é apto a realizar um balanço entre QoF e E_f . Além disso, o AAMG tende a gastar menores níveis de energia do que o IEEE 802.15.4, já que envia um menor número de mensagens. Vale ressaltar que esta abordagem somente é aplicada para aplicações cujo sinal sensoriado seja homogêneo ao longo da área monitorada.

Através das simulações apresentadas, conclui-se que o AAMG consegue atingir níveis mais altos de E_f que o IEEE 802.15.4, mesmo quando a posição dos nodos é aleatória e a comunicação sem fio apresenta faltas. Desta forma, o AAMG parece ser adaptado para RSSF que apresentam comportamento imprevisível. Além disso, o AAMG atingiu quase 13% em média de ganho de E_f em relação ao padrão IEEE 802.15.4 (1000 MI s de simulação).

6.5. Experimentos utilizando RSSF Micaz da Crossbow

Além das simulações realizadas com o simulador TrueTime, foram realizados testes com um protótipo baseado em 30 nodos MicaZ (compostos por microcontrolador Atmel ATmega128L 8-bit com 128 kB de memória programável e módulo de comunicação IEEE 802.15.4) [MicaZ, 2010]. A RSSF foi disposta em topologia estrela composta por 29 nodos escravos e 1 nodo mestre (o nodo mestre foi implantado no centro da rede), vide Figura 4.1. Os parâmetros do IEEE 802.15.4 foram os mesmos utilizados na simulação (vide tabela 5.1). Entretanto, a área de implantação da rede foi de 1,3x1,3m (Figura 6.8).

A mensagem de *checkpoint* enviada pelo nodo mestre possui 19 bytes, e as mensagens enviadas pelo nodo escravo 18 bytes. A memória ocupada pelo código do AAMG é a seguinte:

- Algoritmo Mestre: 572 bytes (memória RAM) e 15902 bytes (memória ROM);
- Algoritmo Escravo: 333 bytes (memória RAM) e 12088 bytes (memória ROM).

O canal utilizado foi o 16 (2,48 Ghz), 1s de tempo de MA e 0,1 s de tempo de MI .

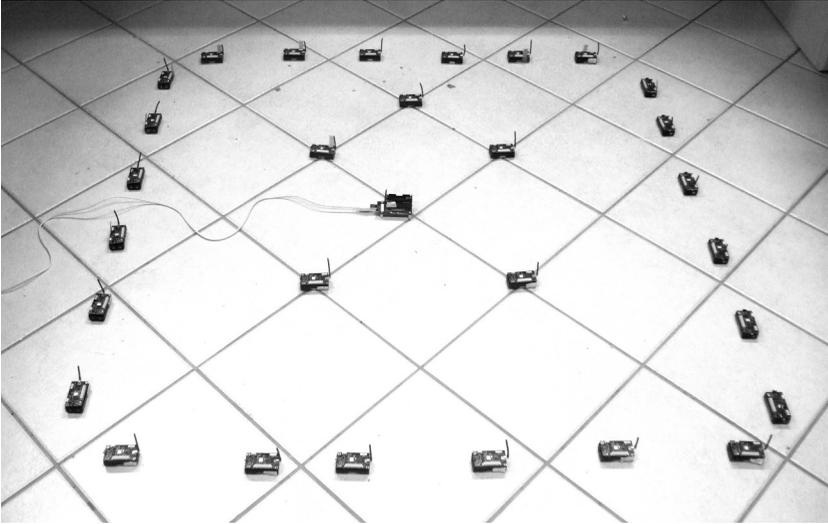


Figura 6.8. Detalhe da RSSF composta por 30 MicaZ utilizada nos testes

Diversos experimentos foram feitos com diferente quantidade de N_e usando nodos MicaZ compatíveis com padrão IEEE 802.15.4 no modo sem beacon, sendo que os testes foram realizados em ambiente com interferência eletromagnética não-controlada. O algoritmo AAMG consegue manter a E_f média superior à alcançada pelo padrão IEEE 802.15.4. A Figura 6.10, por exemplo, mostra o comportamento do AAMG com 29 nodos ao longo do tempo. Importante notar que cada minuto apresentado na figura é uma média calculada dos valores obtidos, e a cada minuto ocorrem 600 microciclos e 60 macrociclos (microciclo de 0,1s e macrociclo de 1s). O último microciclo de cada macrociclo é usado para o nodo mestre informar qual o novo valor de E_f deve ser usado pelos escravos.

Foram testados três tipos de algoritmos de aprendizado de máquina:

1. **Algoritmo de aprendizado de máquina Genético (AAMG):** Esta abordagem utiliza um sistema classificador simples (AAMG), o mesmo testado via simulação. Neste caso, o nodo mestre envia a nova probabilidade de envio baseado somente na última E_f obtida. Logo, não existe um objetivo de QoF explícito. Entretanto, o AAMG mantém um balanceamento entre E_f e QoF na maioria das vezes.
2. **AAMG com fase de aprendizado e fase Experiente (AAMG2):** Nesta abordagem o funcionamento da RSSF foi dividido em duas fases, A) Fase de aprendizado, na qual são testados diversos classificadores com o intuito de encontrar a melhor configuração de P_e que maximize a E_f e atinja um determinado QoF ditado pelo usuário. Durante a fase de aprendizado as N melhores configurações de P_e são armazenadas para uso posterior. B) Fase Experiente, durante

a qual são utilizadas as configurações de Pe que foram obtidas na fase A. A cada MA que a configuração atingir o QoF alvo, a configuração ganha 1 ponto, caso contrário perde 1 ponto. Quando a pontuação da configuração atingir o valor zero ela é descartada e outra configuração obtida na fase A é utilizada. Quando todas as configurações forem descartadas, o algoritmo volta para a fase de aprendizado.

3. **AAMG com fase de aprendizado, fase experiente e *Offset*:** Esta abordagem combina a tática de gerar um offset aleatório com a abordagem do AAMG com requisito de QoF . Desta forma, foi possível atingir maiores níveis de QoF e Ef . A idéia básica é a combinação da geração aleatória de *offsets* antes de cada transmissão com o AAMG.

A Figura 6.9 apresenta as médias de Ef e QoF obtidas em 15 minutos de experimento com as quantidades 14, 19, 24 e 29 de nodos escravos. Nota-se que a Ef do AAMG somente fica abaixo do IEEE 802.15.4 em uma RSSF com 19 nodos escravos (quando é exigido um nível de QoF). Nas demais configurações sempre o AAMG obtém uma melhor Ef . Entretanto, quando não é exigido um nível de QoF , o AAMG diminui a Pe de tal forma que a QoF fica em níveis muito baixos. É possível observar que o AAMG com objetivo de QoF (meta ~ 7) atinge o objetivo (a média mantêm-se um pouco abaixo do objetivo, devido ao tempo de aprendizado) e ainda aumenta a Ef . Desta forma, atinge-se níveis mais altos de mensagens recebidas no nodo mestre e economiza-se energia através da diminuição do desperdício de mensagens enviadas.

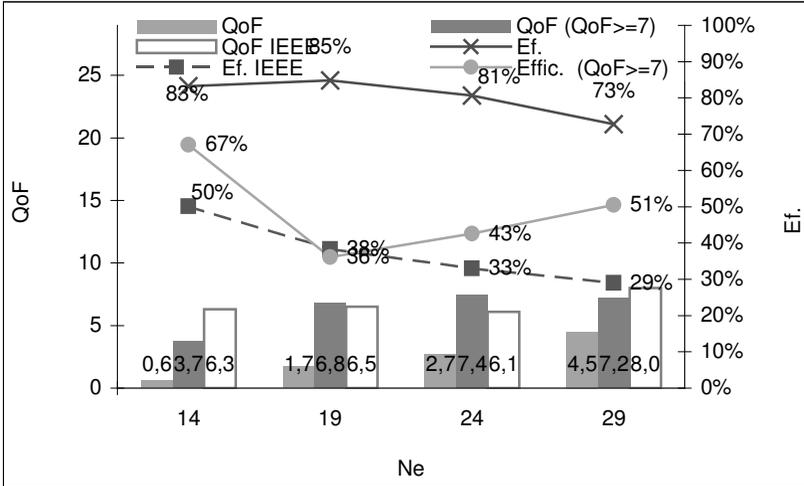


Figura 6.9. Ef. e QoS do AAMG, AAMG2 (QoS > 7) e IEEE 802.15.4 com 14, 19, 24 e 29 escravos.

O teste que considera 29 nodos escravos é apresentado na Figura 6.10. É possível notar que o AAMG sempre atinge níveis de *Ef* mais altos que o protocolo IEEE 802.15.4. Durante um minuto de teste, existem 60 *MA* (1s cada *MA*) e 600 *MI* (0,1s cada *MI*). A nova *Pe* é enviada aos escravos durante o último *MI* de um *MA*.

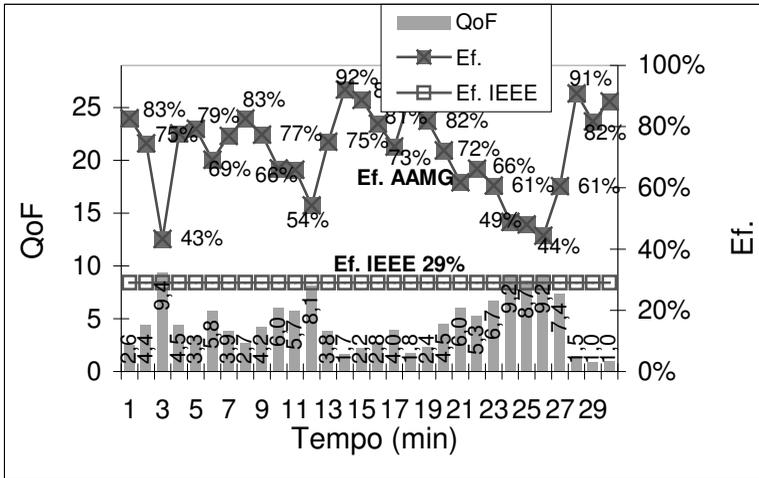
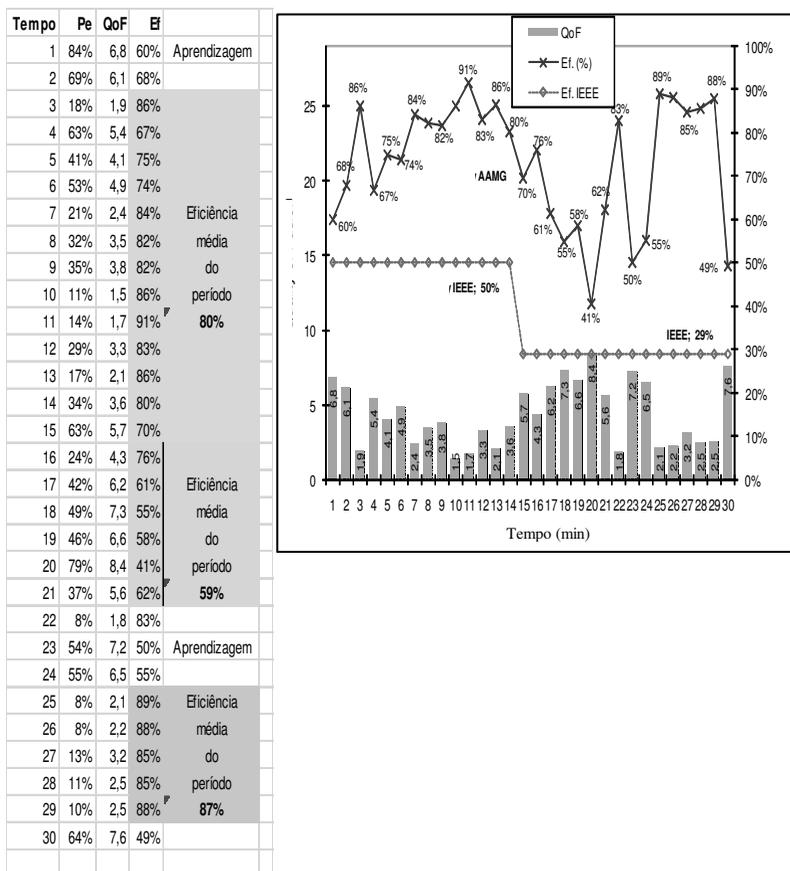


Figura 6.10. Eficiência do AAMG ao longo do tempo. Para fins de comparação, é traçada uma reta com o valor da eficiência obtida pelo padrão IEEE para a mesma *Ne* (29 nodos escravos).

É possível fazer duas observações sobre o comportamento do AAMG. Primeiro que essa abordagem aumenta a Ef, ajustando Pe (Probabilidade de Envio), no entanto isso é feito sacrificando a QoF obtida. Segundo, assume-se uma rede que varia suas condições dinamicamente e, por isso, o algoritmo atua sempre procurando novos valores de Ef. Isso explica, por exemplo, porque há flutuações na Ef ao longo do tempo (vide Figura 6.10).

Para verificar a capacidade do AAMG de se adaptar a mudanças na rede, um novo experimento foi feito no qual a rede começa com 15 nodos (14 escravos e 1 mestre) e, com 15 minutos de monitoramento, o Ne da rede dobra para 30 nodos (29 escravos e 1 mestre). Os resultados podem ser vistos na Figura 6.11.



Na Figura 6.11 é possível identificar três áreas de atuação do algoritmo, conforme marcados na tabela. Durante os tempos 3-15m, o algoritmo consegue

80% de *Ef*. Próximo ao tempo 15m, a quantidade de nodos da rede dobra e ocorre uma queda da *Ef*. Esse efeito pode ser observado no período 16-21m no qual a *Ef* cai para 59%. Entre os tempos 25-29m, após uma fase de aprendizagem, o algoritmo atua novamente, trazendo a *Ef* para próximo de 87%.

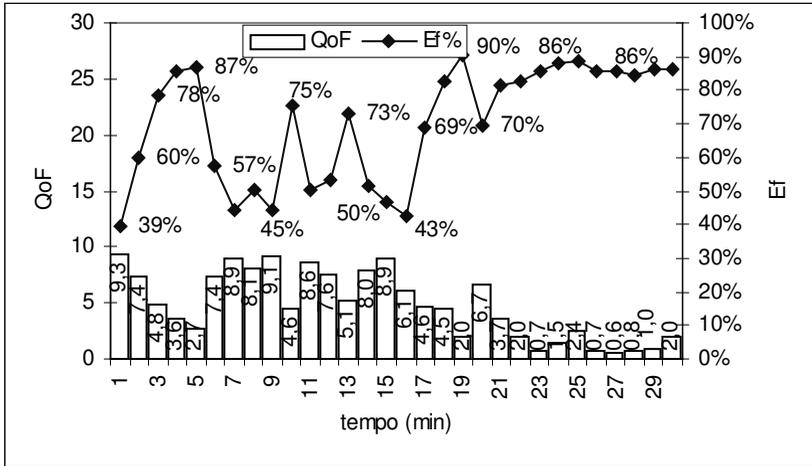


Figura 6.12. AAMG ao longo do tempo, na metade do tempo de teste o *Ne* da rede foi diminuído pela metade

A Figura 6.12 demonstra o comportamento ao longo do tempo de um teste de 30 minutos. Neste teste, a RSSF foi iniciada com 29 sensores e após 15 minutos 15 sensores foram desligados. Este teste demonstra claramente a necessidade de uma abordagem que estabilize a *Pe*. Embora, a *Ef* seja maximizada (atingindo um nível máximo de 90%), a *QoF* é extremamente penalizada (chegando ao mínimo de 0,6).

6.5.1. Experimentos utilizando RSSF micaz da Crossbow (AAMG2)

A abordagem AAMG, apesar de obter valores de *Ef* maiores que os obtidos pela IEEE 802.15.4, apresenta duas características desvantajosas. Primeiro buscando maximizar a *Ef*, em determinados macrociclos sacrifica-se a *QoF* obtida. Segundo ao assumir-se uma rede que muda dinamicamente, mesmo que em determinado momento se obtenha um valor de *Pe* que ofereça bons valores de *Ef* e *QoF*, o algoritmo, com o passar do tempo, testa outras configurações e pode ter uma queda brusca no seu desempenho.

A extensão natural dessa abordagem é a proposição do AAMG com limite inferior de *QoF* (AAMG2). Além dessa característica, o algoritmo passa a ser dividido em fase de aprendizagem e fase de evolução. Na fase de aprendizagem

as N melhores configurações de Ef são armazenadas e usadas durante a fase de evolução. Basicamente, há a definição do valor mínimo de QoF aceitável. O AAMG não “paga” créditos caso não seja alcançado esse valor mínimo.

O funcionamento do AAMG2 tem como objetivo principal atingir a maior eficiência da comunicação possível e manter uma QoF mínima. Uma vez que o AAMG é um algoritmo de aprendizado de máquina cuja otimização ocorre *online*, o funcionamento deste teve que ser dividido em duas etapas:

- **Primeira etapa:** etapa de aprendizado de máquina propriamente dita. Nesta etapa, o algoritmo irá armazenar as N melhores respostas obtidas (Pe) para a rede em questão. Tais Pe deverão atingir a QoF mínima e ainda obter as melhores eficiências possíveis. Esta etapa durará um tempo de aprendizado que será pré-determinado pelo usuário.
- **Segunda etapa:** etapa de funcionamento em campo. Durante este período serão utilizadas as respostas (Pe) que foram obtidas durante a etapa de aprendizado de máquina do AAMG. Cada Pe que estiver no conjunto de Pe escolhidas irá receber uma pontuação, sendo que tal pontuação poderá ser decrementada ou incrementada de acordo com o resultado obtido por ela. Logo, a cada macrociclo que o requisito for atingido pela Pe em questão, aquela resposta irá receber 1 ponto. Caso contrário a Pe em questão irá perder um ponto.

O objetivo será traçado através de 2 quesitos que serão ditados pelo usuário:

1. QoF mínima,
2. Crença da Ef que poderá ser alcançada, tal crença será baseada nas experiências anteriores do usuário e do conhecimento prévio que o usuário possui do desempenho do protocolo IEEE 802.15.4

A Figura 6.13 apresenta o algoritmo do AAMG2.

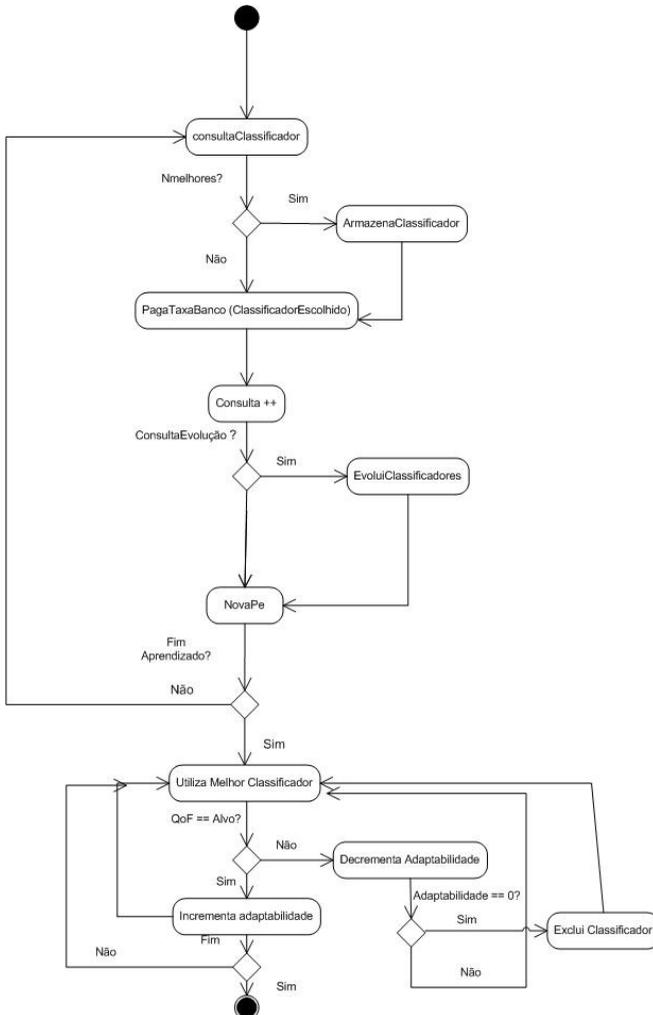


Figura 6.13 Algoritmo AAMG2

A Figura 6.14 mostra os resultados obtidos para uma rede com 24 nodos escravos. Percebe-se que após 5 minutos da fase de aprendizagem a rede entra em uma fase de evolução que preserva um QoF maior que o limite inferior especificado, obtendo-se eficiência superior ao do padrão IEEE 802.15.4. Neste teste, fica clara a capacidade de atingir múltiplos objetivos do AAMG. Além disso, é interessante notar que tanto a Ef quanto o QoF estabilizam em um nível após a fase de aprendizado.

A Figura 6.15 apresenta os resultados de uma RSSF composta por 29 nodos escravos. Desde o início do funcionamento da rede nota-se que a meta de QoF é atingida. Logo, é possível concluir que o AAMG obtém melhores resultados com um maior N_e . Além disso, o algoritmo estabilizou rapidamente, não necessitando de todo o tempo de aprendizado padrão.

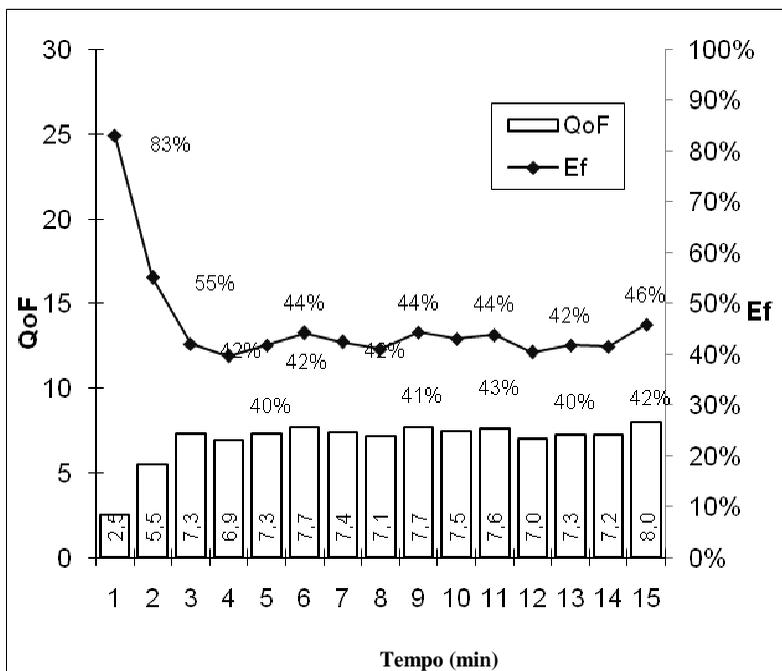


Figura 6.14. Rede com 24 nodos escravos. AAMG com QoF mínimo de valor 7. Os cinco minutos iniciais referem-se a fase de aprendizagem.

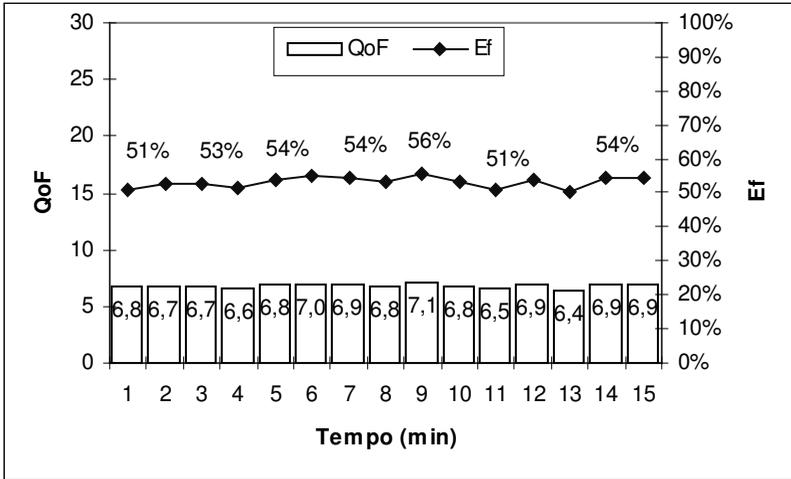


Figura 6.15. Rede com 29 nodos escravos. AAMG com QoF mínimo de valor 7. Os cinco minutos iniciais referem-se à fase de aprendizagem.

Na Figura 6.16 (RSSF composta por 19 escravos) nota-se claramente que após os cinco minutos de aprendizado, o AAMG estabiliza a curva de *Ef* e *QoF*. A curva mantém-se estável até o fim do teste. Nos primeiros cinco minutos, o comportamento da RSSF é bastante instável, devido à descoberta das melhores configurações de *Pe* pelo AAMG.

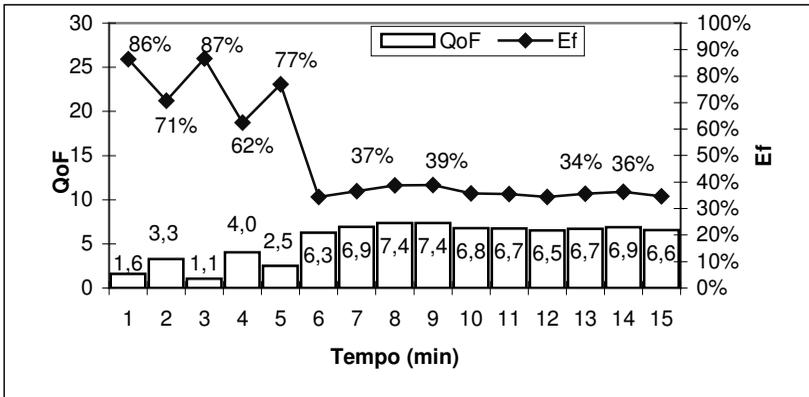


Figura 6.16. Rede com 19 nodos escravos. AAMG com QoF mínimo de valor 7. Os cinco minutos iniciais referem-se à fase de aprendizagem.

Quando a RSSF foi composta por 14 sensores, nota-se que não foi possível estabilizar a curva de *Ef* e *QoF* (vide Figura 6.17). Entretanto, na figura 6.9

observa-se que o protocolo IEEE 802.15.4 não consegue atingir um QoF de nível 7. Portanto, conclui-se que o objetivo de QoF foi acima do valor máximo que poderia ser atingido. Nota-se claramente que o algoritmo tem duas fases de aprendizado: a primeira nos primeiros cinco minutos e a segunda dos 9 aos 15 minutos finais do teste.

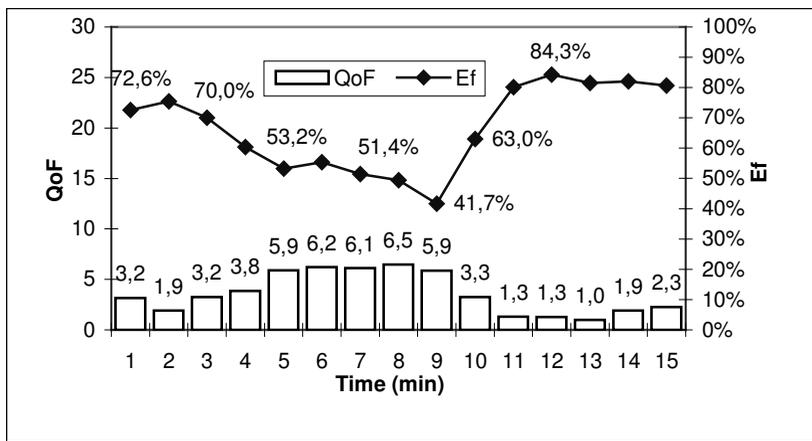


Figura 6.17. Rede com 14 nodos escravos. AAMG com QoF mínimo de valor 7. Os cinco minutos iniciais referem-se a fase de aprendizado.

O gráfico da Figura 6.18 apresenta o comportamento do AAMG no cenário onde a RSSF inicia o teste com 14 sensores e após 7,5 minutos mais 15 sensores são ligados. Após os 5 minutos de aprendizado, a rede já está estabilizada. Por conseguinte, após o aumento da quantidade de nodos, a RSSF já está estabilizada e se mantém no mesmo nível até o fim do teste. Portanto, é possível concluir que o AAMG com meta de QoF consegue balancear QoF e Ef mesmo com um Ne variável.

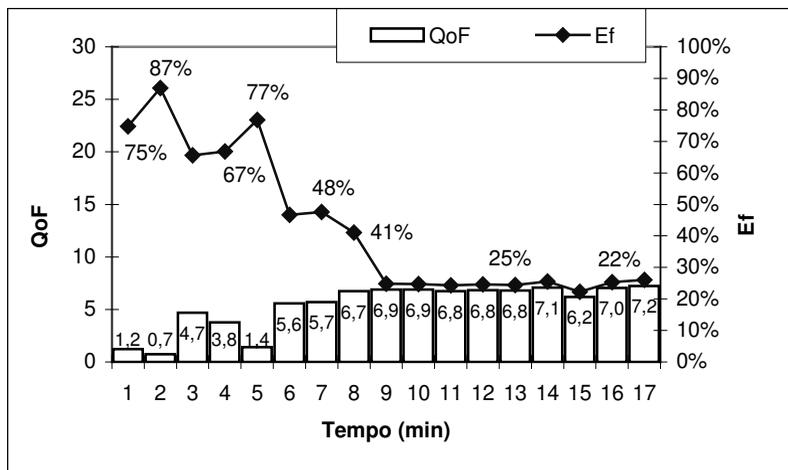


Figura 6.18. AAMG ao longo do tempo, na metade do tempo de monitoramento o N_e da rede dobra.

A Figura 6.18 demonstra o comportamento de uma RSSF que inicia o teste com 29 sensores e após 7,5 minutos tem 15 nodos desligados. A RSSF já está estabilizada no terceiro minuto de funcionamento e permanece estável até o oitavo minuto. Entretanto, quando a RSSF tem seu N_e diminuído pela metade, o AAMG já não consegue estabilizar devido ao fato de que não é possível alcançar um valor de QoF igual a 7 (vide figura 6.9). Importante ressaltar que este valor não é obtido com as condições que foram impostas nestes testes.

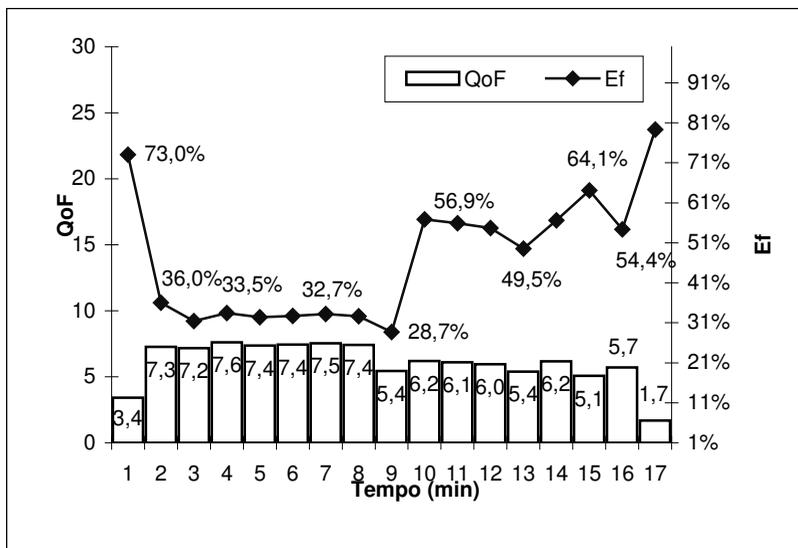


Figura 6.19 AAMG ao longo do tempo, na metade do tempo de monitoramento o NE da rede diminui pela metade

6.5.2. Experimentos com AAMG2 com meta de QoF e *Offset*

A Figura 6.20 apresenta os resultados do AAMG com meta de *QoF* combinado com a utilização de *Offsets* Aleatórios. A idéia básica é gerar um *offset* de tempo aleatório no início de cada *MA*, de modo a minimizar a ocorrência de colisões ou desistência de transmissão dos nodos escravos. Com o uso desta técnica, nota-se que são obtidos altos níveis de *QoF* e *Ef*. Além disso, os níveis de *QoF* são muito acima do requisitado. Conclui-se que a combinação das duas abordagens consegue maximizar o número de mensagens recebidas pelo mestre e ainda atingir altos níveis de *Ef*.

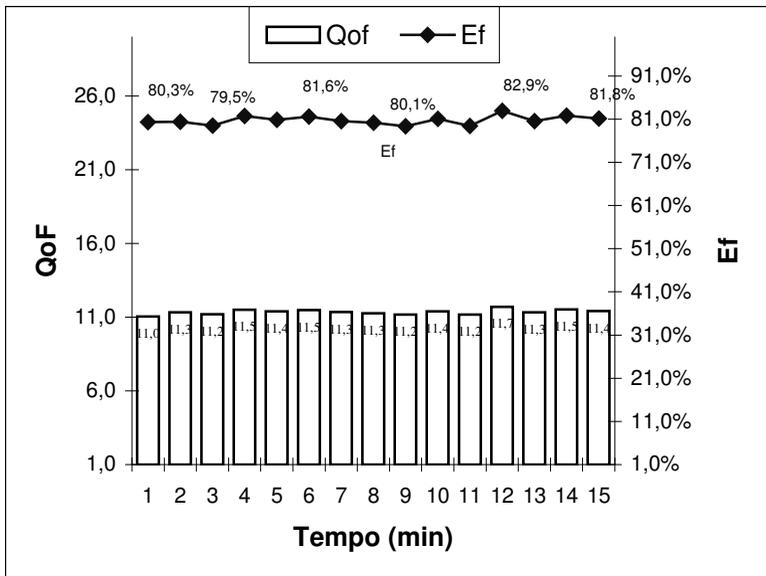


Figura 6.20. Rede com 29 nodos escravos. AAMG com QoF mínimo de valor 7. Os cinco minutos iniciais referem-se a fase de aprendizagem.

As figuras 6.21 e 6.22 demonstram a capacidade de adaptação do AAMG frente a variações de N_e durante o funcionamento da RSSF. Quando o N_e da rede diminui pela metade (vide Figura 6.21), a abordagem consegue rapidamente adaptar-se e tenta manter o nível de QoF no objetivo. Ainda assim, na média não é possível atingir a meta (~ 7).

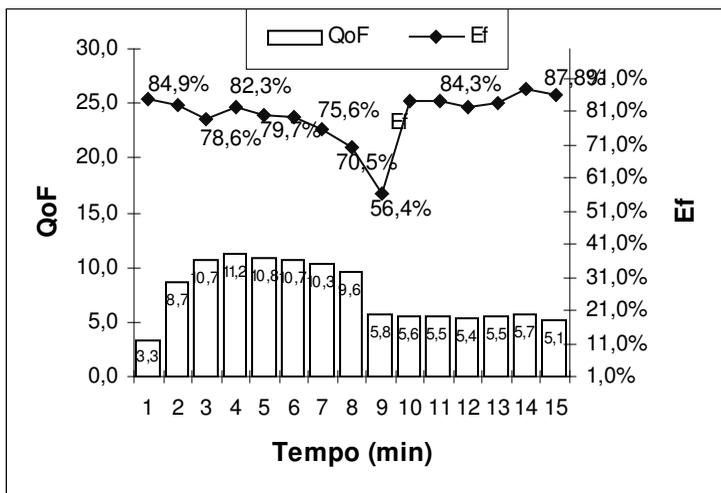


Figura 6.21. AAMG ao longo do tempo, com a diminuição pela metade do N_e da rede na metade do tempo de monitoramento.

Entretanto, quando o N_e da rede dobra durante seu funcionamento (vide Figura 6.22), o AAMG consegue facilmente obter o limite inferior de ($QoF \sim 7$). Somente durante os dois primeiros minutos de funcionamento (tempo de aprendizado) o AAMG não atinge o objetivo. A estabilização do QoF é obtida logo após o segundo minuto e mantida até o final do teste.

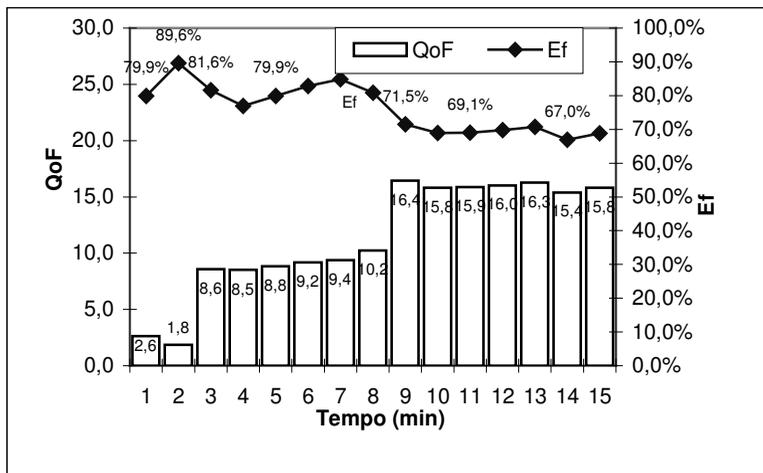


Figura 6.22. AAMG ao longo do tempo, na metade do tempo de monitoramento o N_e da rede dobra.

6.6. Considerações Finais

Neste capítulo apresentamos as abordagens AAMG e AAMG2. A abordagem AAMG foi validada através de simulação e também através de medições realizadas em protótipo de RSSF micaZ. O AAMG demonstrou ser capaz de adaptar-se a variações na quantidade de sensores, fato que foi comprovado através de extensivas simulações e também através da implementação em protótipo. Além disso, AAMG mostrou-se apto a lidar com diversas topologias aleatórias e também com faltas na comunicação dos sensores. A implementação no protótipo demonstrou que é possível utilizar sistemas classificadores como abordagem autônoma para RSSF altamente dinâmicas.

Entretanto, AAMG foi incapaz de estabilizar a curva de Ef e QoF . Esta deficiência foi sanada na segunda versão AAMG2, que conta com duas fases de funcionamento. A primeira fase é idêntica ao funcionamento do AAMG, porém as N melhores respostas são armazenadas. Na segunda fase (fase *expert*) as melhores respostas são utilizadas a fim de estabilizar a curva de Ef e QoF . Desta forma, foi possível atingir o balanceamento entre as duas métricas alvo da aplicação de fusão de dados tempo real. Na Tabela 6.6 é apresentada uma

comparação entre as abordagens relacionadas às abordagens evolucionárias propostas. Além de abordagens que utilizam abordagens evolucionárias e autonômicas, são listadas também abordagens que garantem requisitos de *QoS*.

Tabela 6.6 Comparação qualitativa entre as abordagens de relacionadas ao AAMG e AAMG2.

Autor/Projeto	Características principais	Tempo real	Modo de comunicação	Aplicação
AAMG	Otimiza a Ef em RSSF densas e altamente dinâmicas.	Sim	Paralela	Monitoramento estrutural
AAMG2	Consegue balancear QoF e Ef em aplicações de fusão de dados tempo real em RSSF densas e dinâmicas.	Sim	Paralela	Monitoramento Estrutural
[Bari <i>et al</i> , 2009]	Uma solução baseada em AGs para escalonamento de coleta de dados em redes <i>cluster-tree</i> .	Não	Híbrida	-
[Cerpa e Estrin, 2004]/ASCENT	Abordagem de auto-configuração adaptativa para RSSF.	Não	Serial	-
[Felemban <i>et al</i> , 2006]/MMSPEED	Protocolo de roteamento para garantias de <i>QoS</i> probabilísticas em RSSF	Sim	Serial	-
[Koubaa <i>et al</i> , 2009]/H-NAME	Abordagem de agrupamento de sensores em <i>clusters</i> para diminuir problema da estação escondida em RSSF.	Não	Híbrida	Robótica
[Liao <i>et al</i> , 2008]	Construção de agregados de árvores de agregação de dados baseado no comportamento de colônias de formigas.	Não	Híbrida	-
[Machado <i>et al</i> ,	Algoritmo de	Não	Serial	-

2005]	disseminação de dados em RSSF autonômica, baseado em mapas de energia.			
[Ruiz <i>et al</i> , 2005]	Solução auto-gerenciável para RSSF. A topologia é hierárquica e heterogênea e o objetivo é detectar monitoramento de risco de incêndios.	Não	Híbrida	Detecção de Incêndios em Florestas.
[Wu <i>et al</i> , 2004]	Utiliza agentes móveis, cuja rota é computada por um Algoritmo Genético Multi-Objetivo.	Não	Serial	Detecção de Alvos
[Wu <i>et al</i> , 2009]	Escalonamento dinâmico de sono para RSSF de <i>low duty cycle</i> .	Não	Paralela	-
[Zhu <i>et al</i> , 2006]/Q-DAP	Abordagem de fusão de dados que é executada nos nodos intermediários de uma RSSFS <i>cluster-tree</i>	Não	Híbrida	-

7. Abordagens Autônomicas Cientes de Energia

7.1 Introdução

A economia energética é um dos principais requisitos em abordagens de RSSF. Estas redes podem ser implantadas em áreas de difícil acesso e podem apresentar grande número de nodos. Desta forma, a troca das baterias torna-se muito custosa. Entretanto, embora a economia de energia seja uma das necessidades primárias de uma RSSF, requisitos de *QoS* são frequentemente necessários para o correto funcionamento de tais sistemas. Neste capítulo apresentaremos uma abordagem de auto-otimização de potência que consegue manter requisitos de *QoS* mesmo em ambientes de alta interferência eletromagnética (CPTA). A segunda abordagem (RSSFCE) é uma técnica de auto-regulagem da taxa de envio de mensagens. RSSFCE delega para os nodos escravos decidirem localmente a taxa de envio de mensagens, baseados em suas cargas restantes das baterias.

7.2. Controle de Potência de Transmissão Autônomico (CPTA)

A abordagem CPTA é baseada na idéia de ajuste da potência de transmissão levando em consideração a *Ef* da RSSF. Na Figura 7.1, é possível notar o diagrama de blocos do algoritmo de auto-otimização.

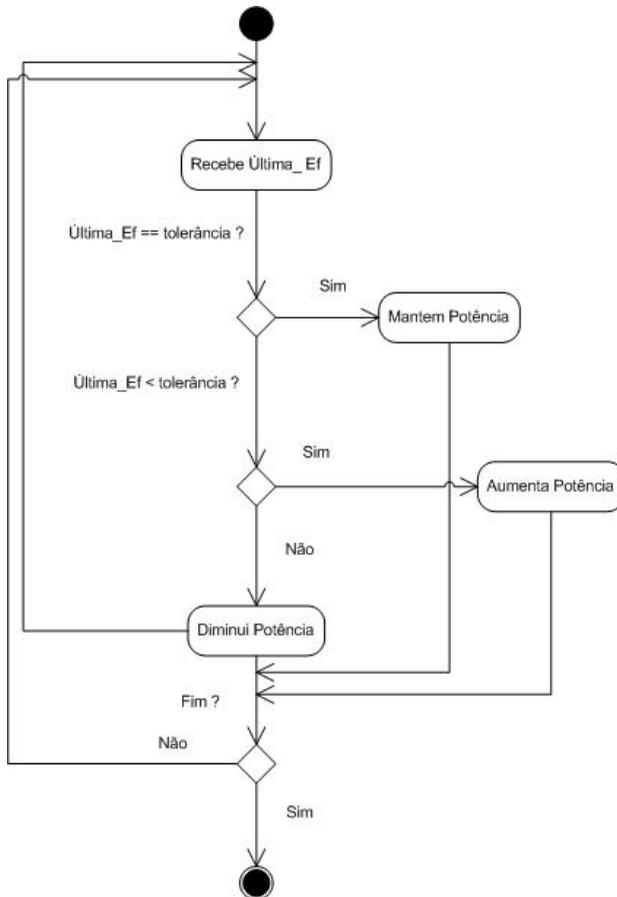


Figura 7.1: Algoritmo CPTA.

Observando o algoritmo da Figura 7.1, é possível notar que a potência de transmissão é ajustada baseada no resultado obtido da comparação entre *Última_Ef*, computada no fim de cada *MA* e *tolerância*, que é definida no início do funcionamento da rede.

Desta forma, a *Última_Ef* é computada usando os dados coletados durante um *MA* enquanto o conjunto de mensagens que compõe o *MA* em questão é enviado. Seria importante ressaltar que, independentemente da tecnologia de RSSF empregada, os nodos sensores possuem uma potência de transmissão máxima e mínima pré-definida, a qual não pode ser modificada pelo algoritmo. Além disso, a potência de transmissão é aumentada ou diminuída passo-a-passo (níveis discretos), sendo que todos os níveis de potência de transmissão são testados. Finalmente, o algoritmo CPTA é executado pelos nodos escravos da RSSF e foi implementado na camada de aplicação.

7.2.1. Resultados Experimentais

Nesta seção é apresentado o estudo de caso adotado durante os experimentos executados em um ambiente de Interferência Eletromagnética (EMI). Os principais objetivos destes experimentos são os seguintes: (1) demonstrar o impacto do ruído eletromagnético na E_f de uma RSSF e (2) demonstrar a efetividade da técnica CPTA.

O estudo de caso adotado foi composto por um nodo Mestre e oito nodos escravos. O nodo Mestre e quatro dos escravos utilizam módulos XBee PRO, enquanto que os outros quatro nodos Escravos adotam um módulo de comunicação Xbee [Xbee, 2010]. Eles executam as seguintes tarefas:

- *Nodo Mestre* : inicia a comunicação, executa a tarefa de fusão de dados e é responsável por enviar os parâmetros necessários para a otimização da potência de transmissão pelos nodos Escravos.
- *Nodo Escravo*: executa o algoritmo CPTA a fim de otimizar a potência de transmissão baseado nos parâmetros enviados pelo mestre e envia as mensagens contendo os dados sensorizados para o mestre.

Os módulos *XBee* e os *XBee PRO* adotam o protocolo de rede IEEE 802.15.4.

A potência de transmissão tanto do *XBee* quanto do *XBee PRO* pode ser configurada para operar utilizando cinco diferentes níveis de potência de transmissão que correspondem aos níveis 0 a 4. A Tabela 7.1 demonstra os níveis de potência de transmissão dos dois diferentes módulos de comunicação que foram adotados nos experimentos.

Tabela 7.1 Níveis de potência de transmissão.

Nível	Xbee [dBm]	XBee PRO [dBm]
0	-10	10
1	-6	12
2	-4	14
3	-2	16
4	0	18

Durante os experimentos no ambiente com EMI, foi definido que cada experimento teria uma duração de 50 sessões, cada uma composta por 10 mensagens (requisito de entrega de cada nodo escravo). O tempo de *MA* foi configurado para 10s e o tempo de otimização para 0.5 s. Estes experimentos foram executados dentro de uma câmara anecóica³ e uma antena de rádio, sendo que a antena irradiava ruído sobre a RSSF.

Figura 7.2 demonstra o ambiente de EMI adotado onde é possível observar a antena e a RSSF implantada sobre uma mesa de acordo com a Figura 7.2.

Desta forma, a RSSF foi exposta a EMI de acordo com as seguintes configurações de ruído:

- Frequência de 2.0493 GHz (canal 11 do IEEE 802.15.4);

³ A câmara anecóica encontra-se no INTI – Buenos Aires: <http://www.inti.gob.ar>

- Modulação AM/FM simultânea;
- Desvio da modulação FM : 20 KHz;
- Sinal modulado AM: 20 KHz;
- Potência do gerador de -20 dBm a -10 dBm;

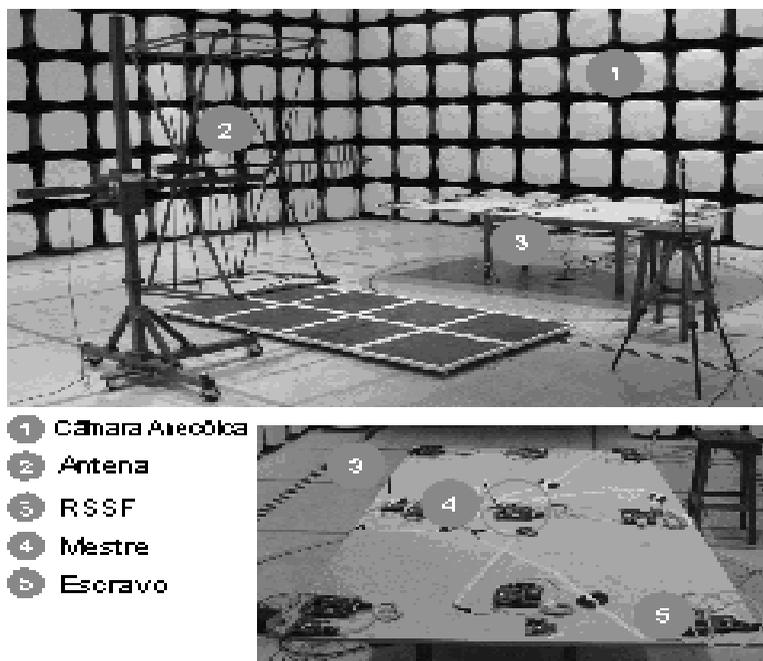


Figura 7.2: Ambiente EMI utilizado.

7.2.2. Resultados Experimentais

O principal objetivo dos experimentos da primeira fase foi definir o impacto do ruído EMI na E_f da RSSF. Logo, dois diferentes cenários foram considerados durante a primeira fase:

- *Cenário 1*: Composto por 5 experimentos sendo que cada um adota um dos diferentes níveis de potência de transmissão de 0 a 4 de acordo com a tabela I. Estes experimentos foram executados sem ruído EMI.
- *Cenário 2*: similar ao Cenário 1, porém durante os experimentos a RSSF foi exposta ao ruído EMI.

A Figura 7.3 apresenta os resultados obtidos durante a primeira fase dos experimentos. Cada ponto do gráfico é associado com uma potência de transmissão específica dos níveis 0 a 4 e representa o valor médio de consumo energético (eixo X) durante as 50 sessões e a E_f da RSSF (eixo Y).

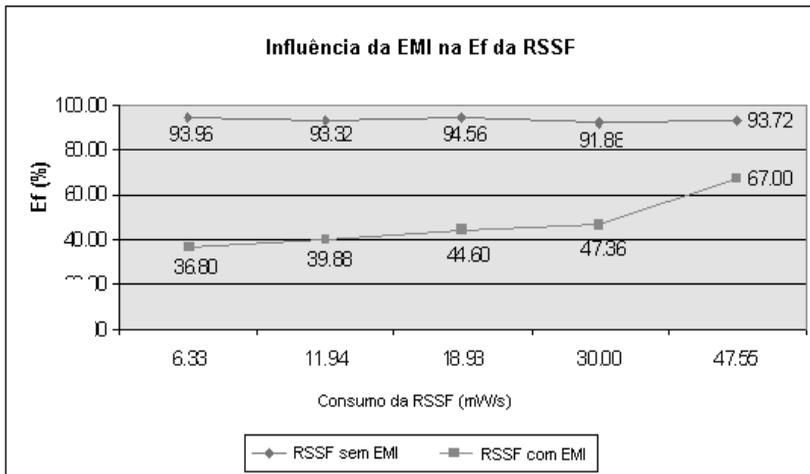


Figura 7.3. Influência da EMI na Ef de uma RSSF.

A Ef da RSSF foi calculada através da média das 50 Ef de cada MA, o mesmo foi considerado para o consumo energético. Quando o nível 0 da potência da transmissão é considerado, nota-se que o ruído afeta drasticamente a Ef da RSSF, que é reduzida de 93,96% para 36,8% quando esta é exposta ao ruído EMI. Porém nota-se que a redução da Ef é menor quando os nodos foram configurados para transmitir utilizando a potência de transmissão máxima. Neste caso, a redução foi de 93,72% para 67%.

A Figura 7.4 apresenta a comparação da Ef da RSSF com e sem EMI quando a potência de transmissão foi configurada para o nível máximo.

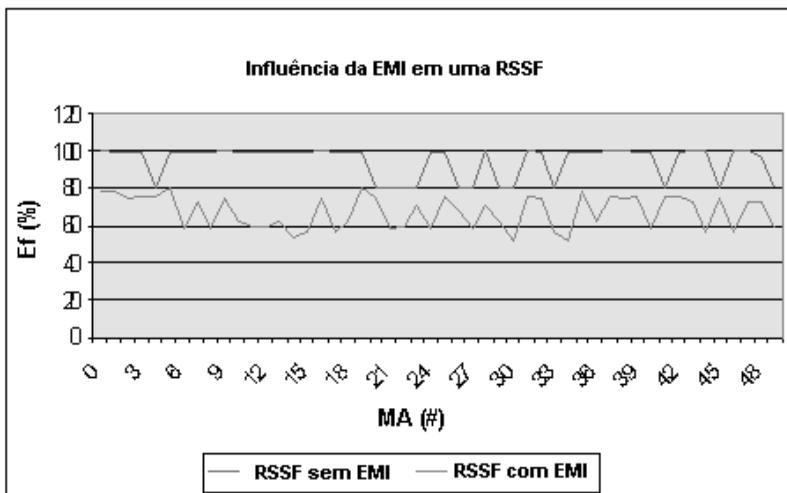


Figura 7.4 Comparação da Ef de uma RSSF com e sem EMI.

Observando-se a Figura 7.4 é possível notar que durante as 50 sessões a *Ef* da RSSF sempre oscilou em uma faixa de 20%. Comparando os dois gráficos é possível concluir que a EMI causa um declínio da *Ef* da RSSF. O aumento da potência de transmissão consegue manter um determinado nível de *Ef*. Entretanto, a EMI não é constante. Portanto, podemos concluir a importância da técnica CPTA que regula a potência de transmissão de acordo com o nível de *Ef* requerido enquanto economiza energia.

Durante a segunda fase dos experimentos, o principal objetivo foi avaliar a efetividade da técnica CPTA quando a RSSF era exposta a ruído EMI. Logo, o objetivo era manter uma *Ef* alvo para a rede enquanto que o consumo energético era otimizado. Seria importante ressaltar que durante as 50 sessões de cada teste o ruído somente foi aplicado durante metade do tempo de cada experimento. Desta forma, durante os *MI*s 0 a 24 o gerador de ruído foi desligado e durante os *MI*s 25 a 49 o gerador de ruído foi ligado e aplicou um ruído AM/FM de -20 dBm.

A Figura 7.5 demonstra a comparação por cada um dos cinco níveis de potência de transmissão e da RSSF adotando a técnica CPTA sendo que *Ef* e consumo energético são adotados como métricas. Cada ponto verde no gráfico é associado a uma *Ef* média e consumo energético considerando cada nível de potência de transmissão (o primeiro conjunto de pontos). O segundo conjunto de pontos (laranja) representam a média de *Ef* e consumo energético quando foi aplicada a técnica CPTA, sendo que as *Ef* alvos foram: 60%, 70%, 75%, 80% e 90%. Em outras palavras, cada ponto representa a *Ef* média assim como o consumo energético considerando os cinco níveis de potência de transmissão fixos e as cinco diferentes *Ef* alvo. Considerando ainda o gráfico da figura 7.7, nota-se que uma RSSF que utiliza a técnica CPTA atinge níveis de *Ef* mais

altos do que uma RSSF utilizando uma potência de transmissão fixa e ainda consome menos energia durante a transmissão dos dados.

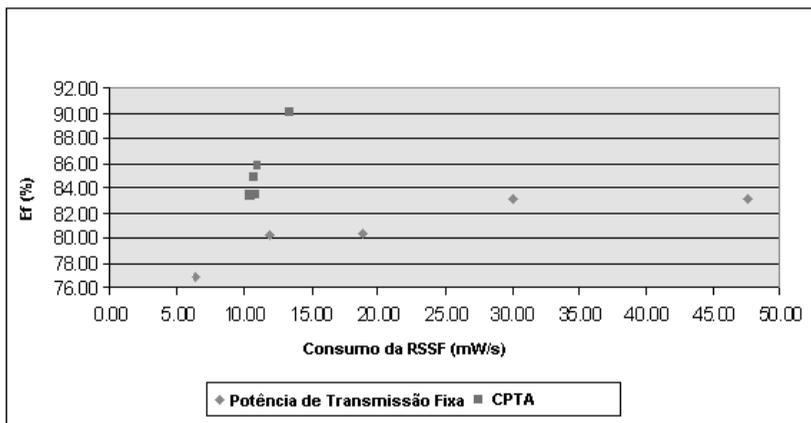


Figura 7.5. Avaliação da abordagem CPTA considerando Ef e energia consumida de uma RSSF submetida a um ruído de -20 dBM.

7.3. Abordagem RSSFCE (Abordagem Descentralizada Ciente de Energia para RSSF).

Nesta seção, a abordagem descentralizada ciente de energia para RSSF é apresentada. Esta abordagem possui o objetivo principal de manter um nível global mínimo de QoF e ainda assim aumentar o tempo de vida da RSSF. RSSFCE pode ser considerada descentralizada devido ao fato de que os nodos escravos possuem autonomia para decidir se enviam ou não as mensagens para o nodo mestre. Por um lado, um determinado valor de Pe é solicitado pelo nodo mestre com o objetivo de alcançar um determinado valor global de QoF . Os escravos, por sua vez, conseguem aumentar o tempo de vida da rede através de suas decisões locais baseadas no nível de tensão restante da bateria.

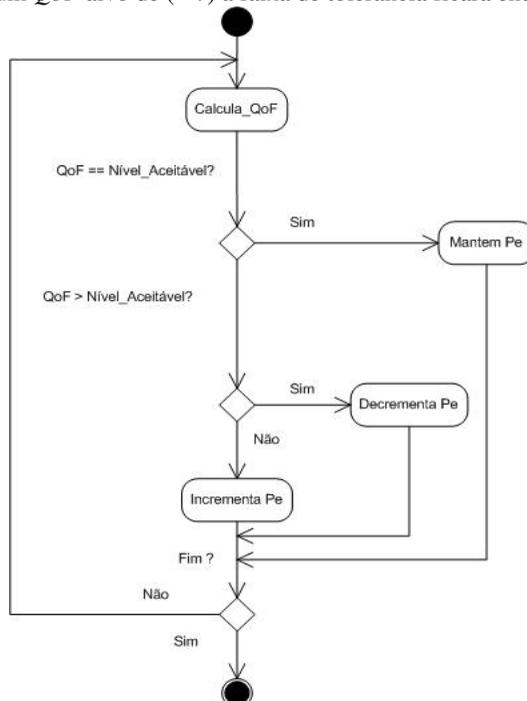
Os algoritmos do mestre e do escravo são apresentados nas Figuras 7.6 e 7.7 respectivamente. A idéia principal de RSSFCE é baseada na seguinte política: quando o nível de QoF está abaixo do alvo de QoF o mestre irá solicitar que os escravos aumentem a Pe . Os escravos utilizam a tabela 7.2 como fator de correção para determinar o valor local de Pe . Desta forma, cada escravo irá receber um valor de Pe do mestre e irá calcular seu próprio nível local de Pe . Por exemplo, se um escravo que possui 2.3 V de tensão restante receber uma Pe do mestre de 100%, este nodo irá gerar uma Pe local de 60% (baseado nos níveis da tabela 7.2).

Logo, RSSFCE consegue manter um determinado nível de QoF e ainda aumentar o tempo de vida da RSSF devido ao fato de que os escravos apresentam um comportamento egoísta (a taxa de transmissão do escravo é calculada baseada na tensão remanescente de cada escravo).

Tabela 7.2. Níveis de Probabilidade de Envio (Pe) nos nodos escravos.

Tensão Restante (mV)	2500	2400	2300	2200	2100
Pe MAX	100%	80%	60%	40%	20%

O algoritmo do mestre é apresentado na figura 7.6. Este nodo recebe as mensagens dos escravo e calcula o nível atual de QoF . O mestre verifica então se o nível atual de QoF encontra-se de acordo com o QoF alvo. O QoF alvo possui uma tolerância de ± 0.5 do nível de QoF . Desta forma, caso seja considerado um QoF alvo de (~ 7) a faixa de tolerância ficará entre 6.5 e 7.5.

**Figura 7.6: Algoritmo do mestre.**

Quando um escravo recebe uma Pe alvo (Pe imposta pelo mestre) primeiramente ele irá verificar seu nível de tensão (vide Figura 7.7). Após esta verificação, o nível de tensão do escravo é classificado de acordo com a tabela 7.2. O valor local de Pe é calculado de acordo com o fator de correção do nível de tensão atual do escravo.

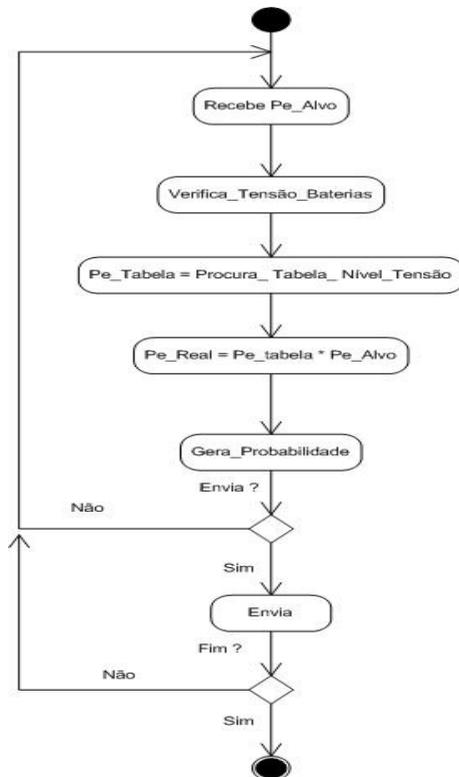


Figura 7.7 Algoritmo do escravo.

7.3.1 Validação através de medições em protótipo

O protótipo foi composto por 13 nodos MicaZ. Desta forma, 1 mestre e 12 escravos dispostos em topologia estrela fizeram parte dos testes. Os nodos foram implantados em uma área de 0,5x0,5m. A duração de cada *MI* foi de 0,1s e cada *MA* foi composto por 10 *MI*. A RSSF considerada nos testes é apresentada na figura 7.15.

A memória ocupada pelo código do RSSFCE é a seguinte:

- **Algoritmo MESTRE:** 572 bytes (memória RAM) e 15902 bytes (memória ROM)
- **Algoritmo ESCRAVO:** 333 bytes (memória RAM) e 12088 bytes (memória ROM).

O pacote enviado pelo mestre (mensagem de sincronização) possui 19 bytes de tamanho, e o pacote enviado pelos escravos possui 18 bytes de tamanho.

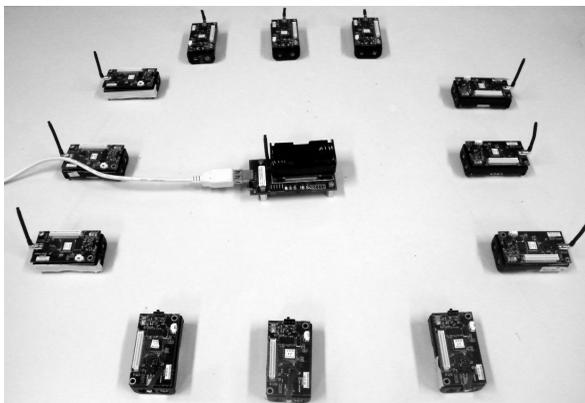


Figura 7.15: Topologia de RSSF considerada.

Os testes foram conduzidos em um ambiente com ruído não controlado (o ambiente possuía um número indeterminado de dispositivos utilizando IEEE 802.11). Logo, o principal objetivo dos testes não foi comprovar a efetividade do IEEE 802.15.4. O canal 16 foi utilizado nos testes, e dois cenários de teste foram considerados:

- **Cenário 1:** 5 testes foram realizados com uma RSSF baseada no protocolo IEEE 802.15.4 utilizando CSMA/CA sem *beacon* e sem modificações. Logo, cada nodo foi configurado para transmitir 10 mensagens/s. A duração de cada teste foi de 300 s.
- **Cenário 2:** 30 testes de 300s foram executados, baseados em nodos MicaZ utilizando a abordagem RSSFCE. O desempenho global da RSSF, assim como do nodo com maior e menor nível de bateria em cada teste foram monitorados. O *QoF* alvo foi configurado para o nível 7.

A evolução do nível de *QoF* obtido em um dos 30 testes é apresentada na Figura 7.8. Cada ponto do gráfico representa o *QoF* médio de 10s. É possível notar que durante alguns intervalos o nível de *QoF* encontra-se abaixo de 6,5 ou acima de 7,5 (tolerância do alvo de *QoF*), entretanto no próximo intervalo de tempo RSSFCE conseguiu atingir o *QoF* alvo. Além disso, na maior parte do tempo, o *QoF* médio encontra-se dentro do nível de tolerância de *QoF*.

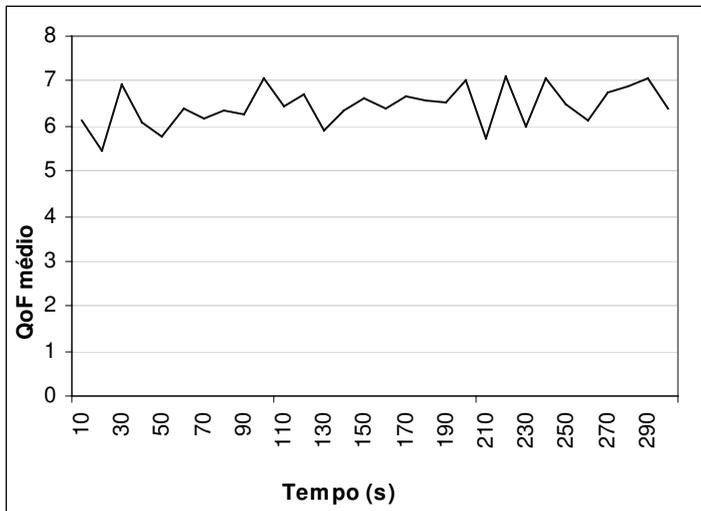


Figura 7.8. Evolução do QoF médio calculado a cada intervalo de 10s.

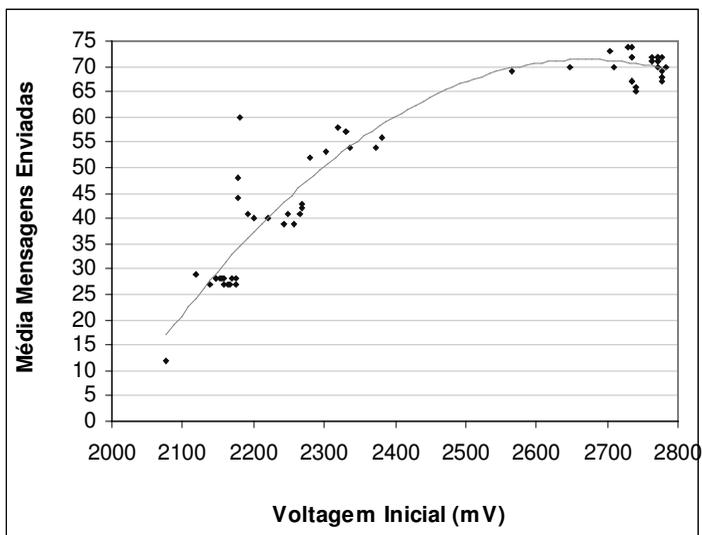


Figura 7.9. Gráfico de Dispersão de 30 testes (cada ponto representa o número de mensagens enviadas dos nodos com maior e menor nível de bateria).

Note que o valor inicial do eixo X da Figura 7.9 é de 2000 mV. Este valor é representado desta forma devido ao fato de que os nodos MicaZ conseguem se manter em funcionamento com nível de tensão das baterias acima deste nível. É possível notar que existem duas regiões apresentadas no gráfico da Figura 7.9: a

primeira região representa o nível de mensagens enviadas pelos nodos com menor nível de tensão da bateria e a segunda representa o número médio de mensagens enviadas pelos nodos com maior nível de tensão da bateria. Logo, cada ponto do gráfico da figura 7.9 representa no eixo X o nível inicial de tensão do nodo e no eixo Y o número médio de mensagens enviadas por *MA*.

A média de mensagens enviadas assim como o desvio padrão dos 30 testes executados são apresentados na Tabela 7.3. O valor representa a média total de mensagens recebidas pelo mestre em um *MA*. O valor indica a média das médias dos 30 testes. Entretanto, devido ao fato de que o protocolo IEEE 802.15.4 apresenta um comportamento estático (vide desvio padrão da tabela 7.3), somente 5 testes foram executados. Nota-se que um escravo que utiliza IEEE 802.15.4 envia ~234% mais mensagens que um nodo rodando RSSFCE com o menor nível de tensão das baterias. Quando o protocolo IEEE 802.15.4 padrão é comparado com um nodo com maior nível de tensão, a diferença fica em ~43%. Logo, RSSFCE demonstrou que é apto a manter o requisito de *QoF*. Além disso, o comportamento de diminuir o valor de *Pe* de nodos com menor nível de tensão restante induz a um aumento no tempo de vida da RSSF. Os valores médios de *Ef* e *QoF* são apresentados na tabela 7.4, é possível notar que mesmo em um ambiente com alta incidência de ruído eletromagnético, RSSFCE atinge um valor médio de *QoF* de 6.4 (o *QoF* alvo ficou entre 6,5 e 7,5) a *Ef* por sua vez ficou em 71,2%.

Tabela 7.3. Mensagens Enviadas: Média e Desvio Padrão de 30 Testes.

Nodos com menor tensão inicial	Nodos com maior tensão inicial	Nodos rodando IEEE 802.15.4
39.8 +/- 12.5	65.0 +/- 13.2	93.4 +/- 2.3

Tabela 7.4. Ef e QoF do RSSFCE em 30 Testes.

Ef	QoF
71.2 +/- 2.3	6.4 +/- 0.1

Os valores médios dos níveis de tensão iniciais em 30 testes são apresentados na Tabela 7.5. Nota-se um alto valor de desvio padrão, que pode ser explicado pelo fato de que o nível de tensão das baterias não foi controlado (durante os 30 testes diversos níveis de tensão foram apresentados). Logo, o alto nível de desvio apresentado na Tabela 7.2 pode ser explicado através do alto desvio padrão das voltagens apresentado na Tabela 7.3.

Tabela 7.5. Tensão inicial dos nodos com menor e maior nível de tensão em 30 testes.

Menor nível de tensão (mV)	Maior nível de tensão (mV)
2658 +/- 200,2	2235 +/- 125,5

Finalmente, a efetividade do RSSFCE pode ser confirmada através dos testes apresentados nesta seção. RSSFCE consegue ajustar o nível de *Pe* autonomamente e de forma descentralizada baseado nos níveis de tensão

restante dos escravos. Além disso, RSSFCE é apto a atingir o QoF alvo solicitado pelo mestre.

7.4. Considerações finais

A influência do ruído EMI em uma RSSF, assim como a efetividade da técnica CPTA, foram avaliadas na seção 7.2. O algoritmo CPTA ajusta o nível da potência de transmissão dos nodos escravos que verificam se a Ef da RSSF está atingindo a Ef alvo, mantendo um balanceamento entre Ef e energia consumida. Logo, conclui-se que a adoção da técnica CPTA aumenta o tempo de vida de uma RSSF submetida a ruído EMI sem que a QoS seja afetada. Os resultados obtidos durante os experimentos de EMI demonstraram a conveniência de utilizar um algoritmo de auto-otimização. Quando uma RSSF sem a técnica CPTA é considerada, a potência de transmissão é definida no início da Ma e permanece constante durante o funcionamento da rede. Uma vez que o ruído inerente em um ambiente real não é necessariamente constante, a abordagem de utilizar uma rede com máxima potência de transmissão para conseguir manter uma alta Ef aumenta o consumo energético desnecessariamente. Logo, considerando a variação do ruído inerente concluímos que a técnica CPTA consegue manter a Ef alvo e ainda aumentar o tempo de vida da rede. Finalmente, a técnica CPTA conseguiu garantir a Ef alvo da rede e manter o balanceamento entre Ef e energia consumida.

Tabela 7.6 Comparação qualitativa entre as abordagens cientes de energia.

Autor/Projeto	Características principais	Tempo real	Modo de comunicação	Aplicação
[Allipi e Galperti, 2008]	Sistema adaptativo para coleta de energia solar em nodos de RSSF.	Não	-	-
[Alippi <i>et al.</i> , 2009]	Protocolos de roteamento	Não	Híbrido	-
[Ergen e Varaiya, 2006]/PEDAMA CS.	protocolo de <i>time division multiple access</i> (TDMA) para RSSF <i>multihop</i>	Não	Serial	-
[Lavrati <i>et al.</i> , 2010]/CPTA	Abordagem de auto-otimização de potência de transmissão para RSSF.	Sim	Paralela	Monitoramento Ambiental
[Heo <i>et al.</i> , 2009]/EARQ	protocolo de roteamento baseado no nível energético da rede	Sim	Serial	Automação industrial
[Melodia <i>et al.</i> , 2010]	Abordagem de mobilidade que assegura que os	Não	-	-

	nodos se locomovam com um mínimo gasto energético			
[Quan <i>et al</i> , 2007]/REACA	protocolo de agrupamento baseado em ciclos	Não	Híbrida	-
RSSFCE	Abordagem descentralizada de auto-regulagem da taxa de envio de mensagens de acordo com o nível de tensão das baterias	Sim	Paralela	Monitoramento estrutural ou ambiental

Na seção 7.3 foi apresentada uma abordagem de tomada de decisão descentralizada baseada na tensão restante dos nodos sensores. Os resultados obtidos através de testes considerando protótipo com 12 escravo e 1 mestre Micaz indicaram que RSSFCE pode aumentar significativamente o tempo de vida da RSSF enquanto atinge um determinado requisito de *QoS*. Além disso, devido ao fato de que RSSFCE foi modelada como um *middleware* para dispositivos com IEEE 802.15.4 ele pode ser implementado facilmente em dispositivos de prateleira (COTS).

Uma análise comparativa entre RSSFCE, CPTA e outros trabalhos relacionados é apresentada na Tabela 7.6.

8. Abordagem Autônoma para Qualidade de Serviço

8.1 Introdução

Aplicações que utilizam RSSF de diferentes tipos podem necessitar de diferentes requisitos de QoS. Uma aplicação de monitoramento ambiental, por exemplo, possui requisitos temporais menos rígidos que aplicações industriais. Apesar disso, todos os tipos de aplicações podem se beneficiar de um grande tempo de vida, baixa latência de mensagens e alta vazão (*throughput*) da rede [Koubaa *et al.*, 2009].

Por outro lado, a obtenção de QoS em RSSF é desafiadora devido ao fato de que as propriedades de QoS são interdependentes. Por conseguinte, o aumento na qualidade de uma métrica de desempenho pode acarretar na diminuição de outra. Por exemplo, quando aumentamos a qualidade da informação através do aumento do número de mensagens que são transmitidas e que chegam à estação base, aumentamos a probabilidade de haver colisões na rede e, simultaneamente, reduzimos o tempo de vida da rede, pois os nodos, individualmente, tendem a esgotar suas baterias com a maior atividade de comunicação.

Neste Apêndice apresentamos uma abordagem para provisão de QoS em RSSF densas de topologia altamente dinâmicas. Essa abordagem é baseada em um modelo de comunicação e métricas de avaliação ligeiramente diferentes dos apresentados no Capítulo 4. Como exemplo, no novo modelo de comunicação não há *deadlines* para as mensagens enviadas, no entanto, é considerado que a aplicação que executa no nodo mestre necessita que cada nodo transmita pelo menos K mensagens a cada MA⁴. A fim de prover uma solução de compromisso entre transmitir K mensagens e ter a maior eficiência de comunicação possível, as métricas de *Ef* e *QoS* são redefinidas neste novo modelo.

A abordagem para provisão de QoS em RSSF foi batizada de *Variable Offset Algorithm* (VOA) pois utiliza *offsets* calculados dinamicamente para melhorar o desempenho do algoritmo de *backoff* existente no protocolo IEEE 802.15.4. Apesar da idéia por trás do algoritmo ser bastante simples, testes baseados em protótipos utilizando nodos MicaZ e simulações realizadas com o simulador Truetime demonstraram a efetividade e viabilidade de implementação do VOA [Pinto *et al.*, 2010].

8. 2. Modelo de Comunicação

O modelo de comunicação considera um nodo mestre (*base station*) e N nodos escravos, sendo que os nodos enviam periodicamente os dados monitorados. O sinal é considerado homogêneo na área de monitoramento. Os dados coletados

⁴ É possível se conceber que há um *deadline* absoluto para cada mensagem e que este se situa exatamente no final de cada MA. No entanto, dependendo do número de MI em cada MA, este geralmente é um *deadline* muito folgado. Por este motivo, preferimos considerar que não há *deadlines* neste modelo de comunicação.

pelos escravos são enviados ao nodo mestre que realiza a tarefa de fusão de dados. Todos os nodos conseguem alcançar o nodo mestre em somente um salto. Desta forma, uma fusão de dados paralela é realizada no nodo mestre.

Os conceitos de sessão de monitoramento, Macro ciclo (MA), Micro ciclo (MI) e *Checkpoint* são adotados de forma semelhante ao do modelo apresentado no Capítulo 4. A cada MA, K mensagens precisam ser enviadas por cada nodo escravo. O parâmetro K é enviado como um requisito de QoS a cada *checkpoint*. Desta forma, um modelo K/N foi considerado, ou seja, os nodos escravos possuem um requisito de QoS de enviar K mensagem durante N MIs.

Os parâmetros K e o tempo máximo de *offset* são enviados pelo nodo mestre a cada *checkpoint*. O *offset* máximo é um parâmetro que é utilizado pelo VOA para gerar um número entre $(0, \text{MaxOffset}]$. Este número será o tempo em que o nodo ficará em espera até que tente enviar uma mensagem para o mestre.

Para guiar o funcionamento do algoritmo e ajustar o funcionamento da RSSF, o nodo mestre calcula as métricas de desempenho durante o *checkpoint*. No modelo proposto, duas métricas são consideradas: Qualidade da Fusão (*QoF*) e Eficiência (*Ef*). Essas métricas são calculadas de forma ligeiramente diferente das apresentadas no Capítulo 4. A *Ef* é calculada de acordo com a Equação (8.1):

$$Ef = \frac{\sum_{i=1}^N Mr_i}{K * Ne * N} \quad (8.1)$$

onde N é o número de MIs desde o último *checkpoint* C, Mr é o número de mensagens recebidas, K é o requisito de QoS e Ne é o número estimado de nodos escravos. O denominador da Equação (3) indica uma estimativa de quantas mensagens foram recebidas e usadas na fusão de dados.

Finalmente, *QoF* é a média de mensagens recebidas pelo nodo mestre durante todos os MAs e é calculada de acordo com a Equação (8.2):

$$QoF = \frac{\sum_{i=1}^N Mr_i}{McS} \quad (8.2)$$

onde McS é o número de MIs ativos (*checkpoints* não são considerados na *QoF*).

A mensagem de sincronização (*Sm*) enviada pelo nodo mestre no primeiro MI, contém as seguintes informações:

$$Sm = | McS, mcS, Kl (Sm \text{ fields})$$

8.3. Abordagem AOV (Algoritmo de Offset Variável)

O principal objetivo da abordagem AOV é maximizar o número de mensagens que são recebidas a cada Macroциclo. Além disso, AOV visa atingir altos níveis de QoF e Eficiência da comunicação. Para isto um *offset* variável é gerado antes de cada transmissão nos nodos escravos. Uma vez que a eficiência da comunicação em redes IEEE 802.15.4 decai quando o nível de *Ne* aumenta, AOV apresenta excelentes resultados de QoF e Ef devido a minimização das colisões e desistências no meio de comunicação.

Os parâmetros que são utilizados na abordagem AOV são:

- **K:** número de transmissões requeridas pelo nodo mestre na inicialização da RSSF.
- **Max_Offset:** o offset máximo que um nodo escravo pode utilizar durante um Macroциclo. A principal idéia desta abordagem é incluir um *offset* na comunicação, desta forma a probabilidade de colisões é reduzida. Além disso, a ocupação do meio também é reduzida, devido ao fato da redução da probabilidade dos nodos efetuarem o CCA no mesmo instante.

As três principais contribuições apresentadas por esta abordagem são:

1. AOV é uma abordagem inovadora que aumenta a eficiência da comunicação em RSSF densas organizadas em topologia estrela. AOV pode ser facilmente implementada em dispositivos IEEE 802.15.4 já que foi modelada para atuar na camada de aplicação.
2. Resultados obtidos via simulação em uma RSSF com nodos aleatoriamente implantados em uma área de 70x70m demonstraram a efetividade da abordagem. AOV possibilitou o aumento da eficiência da comunicação além de minimizar a quantidade de mensagens enviadas.
3. A implementação de AOV em nodos MicaZ é factível e foi realizada. Testes com diferentes níveis de QoF e *Ne* variáveis foram efetuados.

Os resultados coletados durante testes com protótipos e simulações demonstraram um aumento significativo de desempenho do AOV em comparação ao padrão IEEE 802.15.4.

8.4. Algoritmos nos nodos mestre e escravos

O algoritmo do nodo mestre (Figura 8.1) fica encarregado de determinar o *offset* máximo que os nodos escravos podem gerar. Além disso, o número de transmissões é ditado pelo nodo mestre. O início do macroциclo também é sinalizado pelo algoritmo do nodo mestre. De acordo com simulações realizadas anteriormente, o parametro *max_offset* causa alterações nos níveis de *QoF* e *Ef* atingidos.

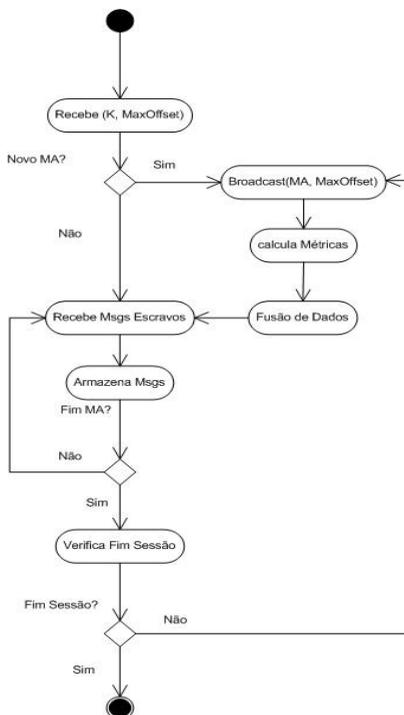


Figura 8.1: Algoritmo AOV – Mestre.

Durante a inicialização de um novo MA, o algoritmo do nodo escravo de AOV (vide Figura 8.2) gera um número aleatório no intervalo de $(0, \text{Max_Offset}]$. Desta forma, a probabilidade de 2 nodos executarem CCA no mesmo instante é minimizada. Além disso, a ocupação do meio é maximizada (mais nodos podem enviar mensagens em um MA). Entretanto, quando o N_e aumenta o nível de E_f diminui.

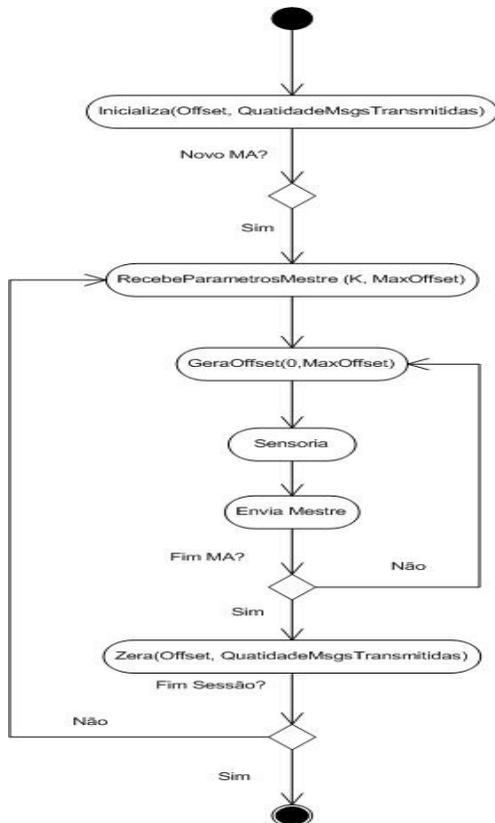


Figura 8.2: Algoritmo AOV – Escravo.

8.5. Resultados obtidos via simulação

O simulador TrueTime foi utilizado para avaliar o desempenho do AOV. Foi definida uma configuração de RSSF composta por 29 nodos escravos e 1 nodo mestre organizados em uma topologia estrela. A área de implantação foi definida como um quadrado de 70x70m, sendo que os nodos escravos foram aleatoriamente dispostos dentro desta área no início da simulação. Dois cenários foram avaliados:

- **Utilizando o AOV:** O MA foi composto por 10 MI's, sendo que cada MI possuía 0.1s de duração. O *offset* máximo foi configurado para $\frac{1}{2}$ MI. Cada simulação durou 1000 segundos (10000 MI);
- **Sem AOV:** Neste caso, usamos IEEE 802.15.4 no modo sem *beacon* com os parâmetros padrão. A topologia, número de nodos e MI são os mesmos utilizados no cenário com AOV.

Os valores dos parâmetros do meio sem fio que foram utilizados são os mesmos apresentados na Tabela 5.1 (Capítulo 5). Os resultados (Tabela 8.1) demonstram que AOV nunca apresenta uma *Ef* menor que 33%, e que o QoF é abaixo de 8,8. Quando comparado com o IEEE 802.15.4, AOV apresenta resultados muito acima do protocolo, principalmente se forem consideradas as mensagens recebidas. Se compararmos o valor de QoF (~7), AOV(K ~3) apresenta um número muito superior de mensagens recebidas.

Tabela 8.1 – Resultados de Simulação

AOV				
K	Mensagens Recebidas	Mensagens Requeridas	Ef (%)	QoF
1	27569	29000	95,1	2,9
2	55211	58000	95,2	5,5
3	78741	87000	90,5	7,8
4	81020	116000	69,8	8,1
5	83480	145000	57,6	8,3
6	86076	174000	49,5	8,6
7	87413	203000	43,1	8,7
8	87611	232000	37,8	8,7
9	88108	261000	33,8	8,8
IEEE 802.15.4				
K	Mensagens Recebidas	Mensagens Requeridas	Ef (%)	QoF
N	67531	261000	25,9	7,5

A Figura 8.3 apresenta a relação entre mensagens requeridas e recebidas. É possível notar que quando K é aumentado, a diferença entre mensagens requeridas e mensagens recebidas também aumenta.

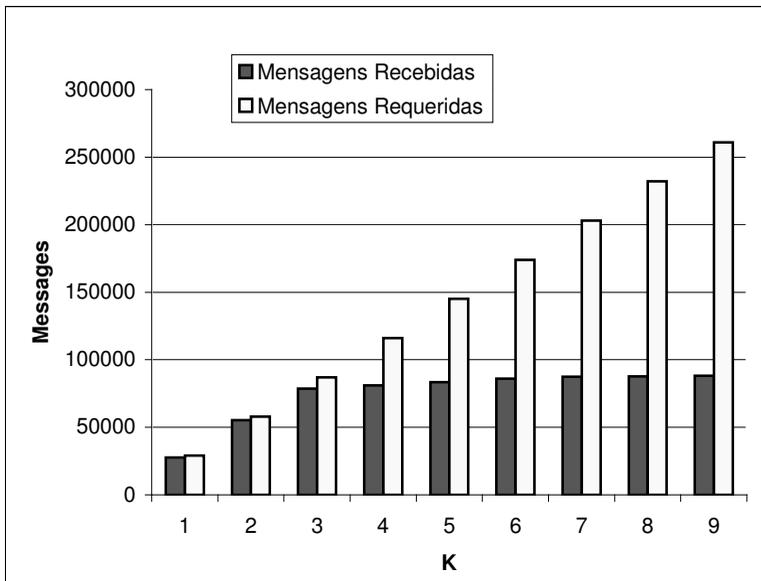


Figura 8.3: Relação entre mensagens requeridas e mensagens recebidas

A relação entre QoF e Ef é apresentada na Figura 8.4. Nota-se um comportamento bastante interessante, a estabilização do nível de QoF . Entre os níveis de K igual 4 a 9, o QoF fica entre 8 e 10. Logo, este comportamento indica uma saturação da rede. Em outras palavras, não fez diferença aumentar o número de mensagens enviadas na rede.

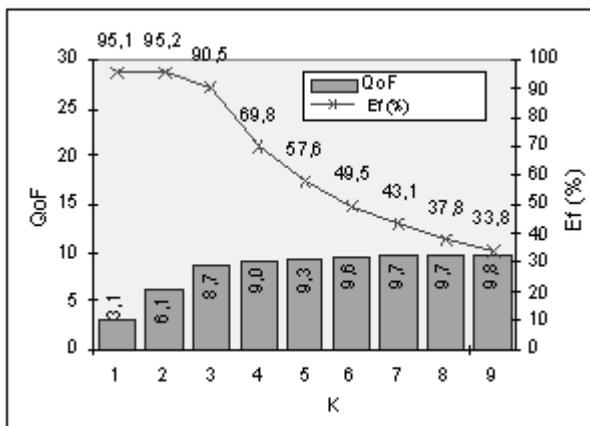


Figura 8.4: QoF e Ef

8.6 Resultados experimentais

Foram utilizados 30 nodos MicaZ (1 nodo mestre e 29 nodos escravos), tais nodos são compostos por um microcontrolador Atmel ATmega128L 8-bit com 128 kB de memória e módulo IEEE 802.15.4. A topologia e os parâmetros foram os mesmos utilizados na simulação. Entretanto a área de implantação foi de 1,3x1,3m.

A mensagem de *checkpoint* possui 19 bytes, e as mensagens enviadas pelos escravos 18 bytes. A memória utilizada pelo AOV é a seguinte:

- Algoritmo do Nodo Mestre: 572 bytes (memória RAM) e 15902 bytes (memória ROM);
- Algoritmo do nodo escravo: 333 bytes (memória RAM) e 12088 bytes (memória ROM).

Assim como nas simulações, dois cenários foram considerados, com e sem AOV (Tabela 8.2).

Tabela 8.2: Resultados Experimentais.

AOV				
K	Mensagens Recebidas	Mensagens Requeridas	Ef (%)	QoF
1	28.825	29.000	99,4	2,8
2	57.617	58.000	99,3	5,7
3	86.260	87.000	99,2	8,6
4	115.209	116.000	99,3	11,5
5	139.979	145.000	96,5	13,9
6	156.088	174.000	89,7	15,6
7	161.585	203.000	79,6	16,1
8	159.421	232.000	68,7	15,9
9	169.653	261.000	65,0	16,9

IEEE 802.15.4				
K	Mensagens Recebidas	Mensagens Requeridas	Ef (%)	QoF
N/A	80.127	261.000	30,7	8,0

N/A – Não aplicável.

Nota-se que quando K é aumentado, a *Ef* diminui. Entretanto, AOV apresenta bons níveis de *Ef* principalmente devido ao fato de que a duração do MI é de somente 0.1 s. Além disso, o decremento no nível de *Ef* somente é notado quando K é maior que 4. Quando K está na faixa de 1 a 4, os níveis de *Ef* atingidos foram maiores que 99%.

A relação entre mensagens recebidas e requeridas é apresentada na Figura 8.5. Nota-se que existe uma diferença entre mensagens estimadas e recebidas quando $K > 4$. O menor nível de *Ef* foi atingido quando $K = 9$ (65%).

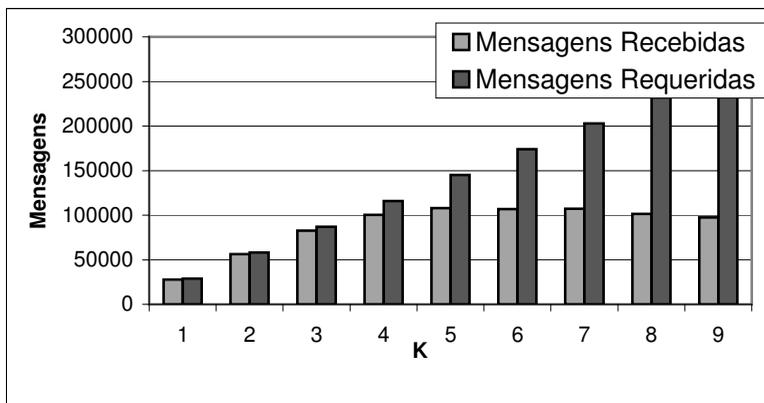


Figura 8.5: Mensagens requeridas e recebidas

A relação entre QoF e Ef é apresentada na Figura 8.6. Quando $K < 4$ o nível de Ef quase atinge seu máximo. Entretanto, quando K está próximo do número de MI ($K = 9$), observa-se um decréscimo na Ef e um aumento gradual no QoF . Isto é devido possivelmente ao fato de que o meio sem fio estar muito ocupado.

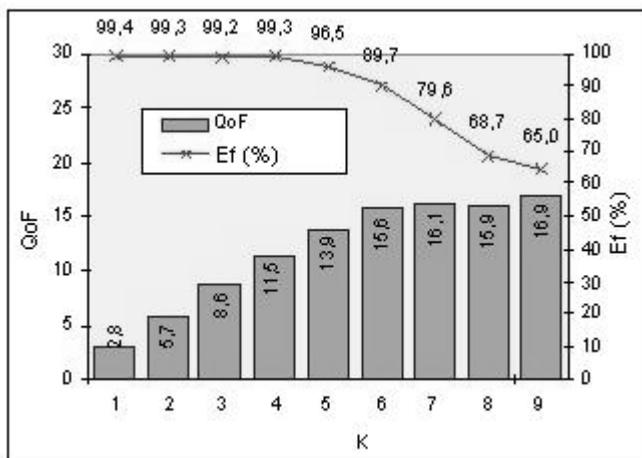


Figura 8.6: QoF e Ef

Um segundo experimento foi executado variando-se o número de escravos (Figura 8.7). O objetivo foi avaliar a influência do número de nodos nas métricas Ef e QoF . Quando comparado com AOV, IEEE 802.15.4 apresenta resultados similares somente quando a rede possui quatro nodos escravos. A diferença de desempenho entre AOV e IEEE 802.15.4 em uma rede com 29 nodos foi de quase 100%. Tais resultados demonstram que AOV apresenta um

desempenho satisfatório e que mantém um nível de QoS mínimo mesmo quando um alto é utilizado.

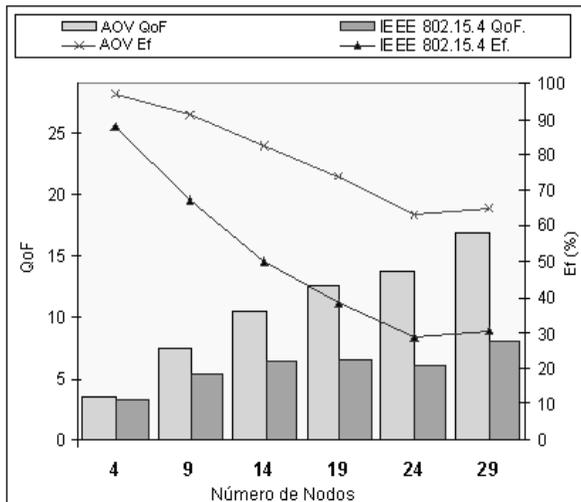


Figura 8.7: Experimento com N_e variável

Através dos resultados de simulação e do protótipo, conclui-se que AOV consegue aumentar a Ef em uma RSSF densa. As comparações com o protocolo IEEE 802.15.4 apresentaram um grande aumento de Ef e QoS (alguns resultados apresentaram mais de 100% de ganho na Ef). Além de claramente aumentar a Ef , AOV foi implementado na camada de aplicação sem que fossem necessárias modificações na pilha do IEEE 802.15.4.

9. Conclusões

9.1.Revisão das Motivações e Objetivos

As RSSF são formadas por dispositivos de tamanho reduzido que possuem módulo de comunicação sem fio e que são capazes de realizar monitoramento, de forma pervasiva e não-intrusiva, no ambiente no qual estão inseridas. Entretanto, individualmente, os nodos de uma RSSF não são confiáveis. Além disso, o meio de comunicação em que estes atuam é sujeito ruídos, interferências eletromagnéticas, e outros tipos de falhas. Ainda assim, a falta de confiabilidade individual dos nodos e do meio de comunicação pode ser compensada através da implantação de um grande número de nodos e do uso de abordagens que permitam aos nodos cooperar, entre si, para realizar o monitoramento de determinada área.

A tendência de miniaturização pode levar, no futuro, ao desenvolvimento de dispositivos com escalas nanométricas, podendo elevar a milhares o número de nodos de uma RSSF. Por conseguinte, a manutenção e o ajuste de parâmetros de forma manual de redes desta magnitude tornam-se inexecutáveis. Além disso, as RSSF podem ser implantadas em áreas inhóspitas ou de difícil acesso, de forma que a troca de baterias seja financeiramente inviável ou, muitas vezes, até impossível.

Como as RSSF devem fornecer ao usuário uma visão global das grandezas medidas, não interessando o valor de um nodo individualmente, a utilização de técnicas de fusão de dados aumenta a confiabilidade dos valores obtidos e possibilita o fornecimento de uma visão geral da área monitorada. Finalmente, uma vez que as RSSF atuam diretamente no ambiente no qual estão inseridas, requisitos temporais quase sempre são presentes nas suas aplicações.

Conforme ressaltado no Capítulo 1, considerando essas características encontradas nas RSSF, de uma forma geral, este trabalho foi guiado no sentido de estudar e propor soluções para duas questões básicas:

- Como desenvolver abordagens que ofereçam para as aplicações uma qualidade de serviço mínima em RSSF densas?
- Como elaborar abordagens autônomicas que busquem garantir requisitos temporais para aplicações de fusão de dados e que, simultaneamente, mantenham um consumo energético baixo, mantendo, desta forma, a RSSF operacional pelo maior tempo possível?

Seguindo esses objetivos, nesta tese foram propostas e desenvolvidas abordagens autônomicas para a auto-otimização de parâmetros de RSSF dinâmica e com grande quantidade de nodos utilizada para aplicações de fusão de dados com requisitos temporais. As abordagens autônomicas propostas foram projetadas para, além de aumentar o tempo de vida da rede, fornecer garantias de QoS em RSSF com grande quantidade de nodos. Além disso, nesta tese também estudou-se a influência do aumento do N_e em RSSF baseadas no protocolo IEEE 802.15.4.

9.2. Visão Geral do Trabalho

Inicialmente realizamos um estudo do protocolo IEEE 802.15.4 e, através de simulações, testamos o seu comportamento em RSSF organizado em topologia estrela com grande quantidade de nodos. Observou-se que quando o número de nodos aumentava, a eficiência da comunicação da rede decrescia rapidamente. Desta forma, concluímos que o protocolo IEEE 802.15.4 é incapaz de lidar com o aumento da taxa de comunicação em uma RSSF. (Este mesmo comportamento também era descrito em alguns trabalhos isolados encontrados na literatura – vide Capítulo 3). Para estas simulações consideramos uma aplicação de fusão de dados, sendo que os dados enviados pelos nodos escravos possuíam validade temporal. Durante o estudo do comportamento do protocolo foi proposto o modelo de comunicação que seria utilizado nas abordagens propostas, assim como as métricas Ef e QoF .

A partir da detecção deste problema com o protocolo IEEE 802.15.4, foram propostas abordagens autônomicas simples para lidar com as falhas e mudanças de topologia nas RSSF consideradas. A primeira abordagem proposta foi a FPRSSF (Fusão de Dados Probabilista para Redes de Sensores sem Fio). FPRSSF introduziu o conceito de Probabilidade de Envio (Pe), que possibilitou um melhor espalhamento do algoritmo de *backoff* do CSMA/CA do IEEE 802.15.4. FPRSSF é um algoritmo de fácil implementação, porém não permite uma boa escalabilidade além de necessitar que o administrador do sistema possua conhecimento prévio do sistema.

A segunda abordagem autônomicas simples que foi apresentada nesta tese foi a CEARSSF (Controle de Envio Autônomico de Mensagens para Redes de Sensores sem Fio). A abordagem CEARSSF permite um melhor ajuste da Pe com o objetivo de atingir determinada QoF ou Ef . CEARSSF foi capaz de atingir níveis de Ef ou QoF alvos impostos como requisitos pelo administrador de sistema. As simulações realizadas com CEARSSF e FPRSSF demonstraram que, apesar de simples, essas abordagens conseguem aumentar a Ef e manter uma determinada QoF . Desta forma, FPRSSF e CEARSSF são capazes de prover requisitos de QoS e ainda aumentar o tempo de vida de RSSF com aplicações de fusão de dados de tempo real.

A abordagem de auto-otimização da Pe baseada em algoritmos de aprendizado de máquina genético (AAMG) foi desenvolvida com o intuito de maximizar a Ef e manter um determinado QoF em aplicações de fusão de dados temporal para RSSF densas e extremamente dinâmicas. AAMG foi validado via simulação e verificamos que AAMG é capaz de adaptar-se à mudança de número de sensores. Foram realizadas também simulações com variação da posição dos nodos e injeção de falhas na comunicação, sendo que AAMG conseguiu maximizar a Ef e manter um nível mínimo de QoF . A implementação e validação do AAMG em protótipo de RSSF mostrou a viabilidade da utilização de sistemas classificadores como algoritmo de aprendizado de máquina em RSSF. Foram realizadas diversas medições no protótipo desenvolvido, sendo

que o protótipo apresentou resultados semelhantes aos simulados. Além disso, os testes com variação do número de nodos mostrou também a escalabilidade do AAMG ainda que em RSSF dinâmicas.

A deficiência do AAMG em estabilizar a curva de E_f e manter uma determinada QoF foi sanada na segunda versão (AAMG2). O AAMG2 apresenta duas fases: a primeira semelhante ao funcionamento do AAMG e a segunda (fase *expert*) utiliza o conhecimento coletado na primeira fase para otimizar a E_f e manter um nível específico de QoF imposto pelo administrador do sistema. AAMG2 foi validado através de implementação em protótipo e demonstrou ganho frente ao protocolo IEEE 802.15.4. A validação do AAMG através de protótipo de RSSF e simulações mostraram sua eficácia em aplicações de fusão de dados com restrição temporal e topologia altamente dinâmica. A segunda versão do AAMG (AAMG2) permitiu ainda a estabilização da E_f e a manutenção do requisito de QoF .

Uma abordagem que utiliza *offsets* aleatórios para maximizar a E_f em RSSF multimídia também foi proposta. Apesar de simples, a abordagem conseguiu aumentar a E_f frente ao protocolo IEEE 802.15.4. A abordagem OAV que utiliza *offsets* aleatórios durante o funcionamento da RSSF também foi apresentada nesta tese. OAV foi validado através de simulação e implementação em protótipo de RSSF e conseguiu uma E_f bastante superior ao padrão IEEE 802.15.4.

Por fim, foram propostas duas abordagens autonômicas cientes de energia para RSSF: CPTA e RSSFCE. CPTA foi validada através de medições em protótipo de RSSF em câmara anecóica com ruído eletromagnético controlado. CPTA foi capaz de manter um determinado nível de E_f através da auto-regulagem da potência de transmissão dos nodos da RSSF. Portanto, a eficácia do CPTA em manter determinada E_f e ainda economizar energia através da regulagem em ambientes altamente ruidosos foi verificada nos testes. A segunda abordagem ciente de energia (RSSFCE) utiliza a carga restante das baterias dos nodos de RSSF para localmente ajustar o nível da taxa de transmissão dos escravos. RSSFCE considera um requisito do nodo mestre como entrada, porém ajusta localmente baseado na tensão restante das baterias. Os testes realizados mostraram que RSSFCE é capaz de aumentar o tempo de vida da rede e atender o requisito de QoF , através do comportamento egoísta dos nodos que auto-regulam suas taxas de envio.

Desta forma, concluímos que é possível garantir uma qualidade de serviço mínima em aplicações de fusão de dados com restrições temporais para RSSF densas com topologia altamente dinâmica. Além disso, as abordagens autonômicas propostas mostraram a eficácia do paradigma de computação autonômica para lidar com as incertezas do meio de comunicação sem fio, falhas nos nodos e variações do ambiente no qual as RSSF estão inseridas.

A tabela comparativa 9.1 apresenta as diferenças entre as abordagens desta tese e a indicação das situações em que cada abordagem é mais indicada.

Tabela 9.1 Análise Comparativa das Abordagens Desenvolvidas

	Economia Energética como 1º Objetivo	QoS	Multi-Objetivo	Topologia Dinâmica	Topologia Fixa	Tempo Real
AAMG				X		X
AAMG2			X	X		X
CEARSSF					X	
CPTA	X			X		
FPRSSF					X	X
RSSFCE	X	X			X	X
AOV		X		X		

9.3. Contribuições e Escopo do Trabalho

Nesta seção apresentaremos as contribuições desta tese, juntamente com os resultados publicados que cada abordagem gerou. A presente tese apresentou diversas contribuições, sendo que a primeira foi um estudo do comportamento do protocolo IEEE 802.15.4 em RSSF densas utilizando aplicação de fusão de dados com restrição temporal.

Mostramos que o IEEE 802.15.4 é incapaz de lidar com o aumento de nodos na RSSF. Além disso, o modelo de comunicação e as métricas utilizadas nesta tese foram desenvolvidas nesta primeira etapa do trabalho [Pinto *et al*, 2007a]. Este trabalho resultou na publicação:

- Pinto, A. R., B. Bitencort, MONTEZ, C., Uma Abordagem de Fusão de Dados com Restrição de Tempo Real em Redes de Sensores sem Fio. In: SBAI 2007, 2007, Florianópolis. Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2007.

Uma abordagem para RSSF multimídia que utiliza *offsets* e consegue maximizar o número de mensagens recebidas pelo nodo mestre foi modelada e validada através de simulação [Pinto *et al*, 2007b]. Esta abordagem foi apresentada no evento Webmedia 2007 mas seus resultados não são apresentados nesta tese:

- Pinto, A. R., Dantas, M.A.R., B. Bitencort, Montez, C., Fusão de Dados Tempo Real em Redes de Sensores Sem Fio Multimídia. In: Webmedia 2007, Gramado. Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web. Porto Alegre: SBC, 2007. v. 1. p. 95-102.

A abordagem FPRSSF foi apresentada no 7th IFAC International Conference in Fieldbuses and Networks in Industrial Embedded Systems,

2007. FPRSSF apesar de simples introduziu o conceito de Pe que permite um melhor espalhamento do protocolo CSMA/CA do IEEE 802.15.4 [Pinto *et al*, 2007c].

- Pinto, A. R., B. Bitencort, Underlea Correa, Dantas, M.A.R., MONTEZ, C., Probabilistic Real-time Data Fusion in Wireless Sensor Networks with ZigBee. In: 7Th IFAC International Conference in Fieldbuses and Networks in Industrial Embedded Systems, 2007, Toulouse. 7th IFAC International Conference in Fieldbuses and Networks in Industrial Embedded Systems, 2007.

A abordagem autônômica baseada em algoritmos de aprendizado de máquina genético foi apresentada em [Pinto et al., 2008] e [Pinto et al., 2009]. AAMG foi apresentado no ETFA 2008 e IECON 2009.

- Pinto A.R., Montez, C., Dantas, M.A.R., Vasques, F., Genetic Machine Learning Approach for Data Fusion Applications in Dense Wireless Sensor Networks, WIP - 13th ETFA Hamburg, 2008.
- Pinto, A.R., Camada, M., Dantas, M. A.R, Montez, C., Portugal, P., Vasques, F., Genetic Machine Learning in the Optimization of Communication Efficiency in Wireless Sensor Networks, Proc. Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2009.

A abordagem AOV também foi proposta [Pinto *et al*, 2010] e demonstramos que ela é capaz de maximizar o número de mensagens entregues na estação base. AOV foi apresentado no 8th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems:

- Pinto, A.R., Ferreira, B.R., Montez, C., Portugal, P., Vasques, F., VOA: Variable Offset Algorithm for the Optimization of Communication Efficiency in Wireless Sensor Networks 8th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 2010

A abordagem CEARSSF foi apresentada no WTR 2009, CEARSSF consegue atingir requisitos de QoF impostos pelo administrador do sistema de forma simples e autônômica [Pinto et al, 2009b]:

- Pinto, A.R., Camada, M., Dantas, M.A.R, Montez, C., Portugal, P., Vasques, Self-organizing Approach for Real-time Data Fusion in Dense Wireless Sensor Networks, 11th Brazilian Worskhop on Real-Time and Embedded Systems, 2009.

Um middleware de RSSF para ambientes de agregados de computador foi proposta em [Ferreira et al, 2007], projeto cujo autor dessa tese participou.

- Ferreira, D.J., Dantas, M.A.R., Pinto, A. R., Montez, C., Rodrigues, M., A Middleware for OSCAR and Wireless Sensor Network

Environments. In: 21st International Symposium on High Performance Computing Systems and Applications, 2007.

O autor foi ainda co-autor da abordagem TPSO que auto-otimiza a potência de transmissão de RSSF implantadas em ambientes de alto ruído eletromagnético. TPSO foi apresentado no LATW2010 [Lavrati et al., 2010] e também teve uma publicação aceita no DSD Euromicro 2010 [Lavrati et al., 2010b].

- Lavratti, F., Pinto, A. R., Prestes, D., Bolzani, L., Vargas, F., Montez, C., “Towards a Transmission Power Self-Optimization in Reliable Wireless Sensor Networks”, Proc. 11th IEEE Latin American Test Workshop, 2010.
- Lavratti, F., Pinto, A. R., Bolzani, L., Vargas, F., Montez, C., Hernandez, F.; Gatti, E.; Silva, C., Evaluating a Transmission Power Self Optimization Technique for WSN in EMI Environments, Proc. 13th Euromicro Conference on Digital System Design, 2010.

Um capítulo de livro intitulado “Redes Locais Sem Fio: Conceito e Aplicações”, também teve participação do autor durante o desenvolvimento desta tese durante o estudo da literatura [Correa *et al*, 2005]. Tendo sido apresentado como mini-curso na 4a Escola Regional de Redes de Computadores.

- Correa Underlea, Pinto, A. R., D. J. Ferreira, Andres Codas, Montez, C., Redes Locais Sem Fio: Conceito e Aplicações. In: UPF. (Org.). 4a Escola Regional de Redes de Computadores, 2006, v. 1, p. 1-41.

9.4 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros recomendamos a utilização das abordagens autonômicas propostas para fornecer suporte de QoS a aplicações de monitoramento estrutural em construções. Desta forma, será possível testar as abordagens em uma aplicação real que necessita de requisitos temporais.

Outra direção de pesquisa seria a utilização do nível de tensão das baterias dos nodos para regular a potência de transmissão. Desta forma, seria possível combinar economia energética com QoS. Logo, este tipo de abordagem atingiria maiores tempos de vida da RSSF e ainda asseguraria a entrega de mensagens para o nodo mestre mesmo em ambientes com altas taxas de ruído eletromagnético.

A utilização de AAMG para otimização de vários parâmetros em RSSF densas seria uma direção de pesquisa interessante. Desta forma, o AAMG seria testado em problemas multi-objetivos onde a necessidade de otimização de parâmetros distintos aumentaria a complexidade da rede e possivelmente melhoraria o seu desempenho.

Topologias com nodos móveis em RSSF poderiam também serem desenvolvidas. Neste caso, a posição dos nodos seria modificada o que acarretaria em uma maior necessidade de utilização de abordagens autonômicas como AAMG e AAMG2. Possivelmente este tipo de topologia necessite de uma organização topológica distinta, como *mesh* ou *cluster-tree*. Neste caso, alguns nodos poderiam apresentar características de mobilidade enquanto outros seriam estacionários.

A utilização de algoritmos evolucionários para otimização de rotas em RSSF *mesh* é outra possível futura linha de pesquisa. Neste caso, o maior desafio é a sobrecarga dos algoritmos evolucionários e a natureza dinâmica das redes *mesh*. Neste caso, o balanceamento entre otimização das rotas e sobrecarga da abordagem evolucionária será necessário. Algoritmos genéticos multi-objetivos e distribuídos possivelmente seriam a solução mais indicada.

REFERÊNCIAS

- [Akyildiz *et al*, 2002] Akyildiz, I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y. e Cayirci E.(2002). A Survey on Sensor Networks. IEEE Communications Magazine, pp. 102-114.
- [Akyildiz, 2007] I. Akyildiz, T. Melodia, K. Chowdhury, A survey on wireless multimedia sensor networks, Computer Networks 51, Novembro de 2007.
- [Akyildiz *et al*, 2008] Akyildiz I., Brunetti, F., Blazquez C., Nanonetworks: A new communication paradigm, Computer Networks, no. 52, 2008, 2260–2279
- [Allipi e Galperti, 2008]Allipi, C. , Galperti, C., An Adaptative System for Optimal Solar Energy Harvesting in Wireless Sensor Networks Nodes. IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 55, No. 6, (2008), 1742-1750.
- [Alippi *et al*, 2009] Alippi, C., Camplani, R., Roveri, M., An Adaptative LLC-Based and Power-Aware Routing Algorithm. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 9, (2009), 3350-3357.
- [Bari *et al*, 2009]Bari, A., Wazed, S., Jaekel, A., Bandyopadhyay, S., A genetic algorithm based approach for energy efficient routing in two-tiered sensor networks, Journal on Ad Hoc Networks, no 7 (2009) 665–676.
- [Cerpa e Estrin, 2004] Cerpa, A., Estrin, D., ASCENT: Adaptative Self-Configuring sEnsor Networks Topologies, IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 3, No. 3, Julho-Setembro, 2004.
- [Correa *et al*, 2005] Correa Underlea, Pinto, A. R., D. J. Ferreira, Andres Cudas, Montez, C., Redes Locais Sem Fio: Conceito e Aplicações. In: UPF. (Org.). 4a Escola Regional de Redes de Computadores. : , 2006, v. 1, p. 1-41.
- [Costa e Sayeed, 2003] Costa, A., Sayeed, A., Data Versus Decision Fusion for Distributed Classification in Sensor Networks, Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003, 832-835.
- [Demirkol *et al*, 2006] Demirkol, I. , Ersoy, C. e Alagöz, F. , MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey, IEEE Communications Magazine, Abril 2006.

- [Dressler *et al*, 2008] Dressler, F., A study of self-organization mechanisms in ad hoc and sensor networks, *Computer Communications*, no. 31, 2008, 3018–3029.
- [Dressler *et al*, 2010] Dressler, F., Akan, O., A survey on bio-inspired networking, *Computer Networks*, no. 54, 2010, 881–900
- [Ergen e Varaiya, 2006] Ergen, S.C., Varaiya, P., PEDAMACS: Power Efficient and Delay Aware Medium Access Protocol for Sensor Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 5, No. 7, (2006), 920-930.
- [Felemban *et al*, 2006] Felemban, E., Lee, C., Ekici, E., MMSPEED: Multipath Multi-SPEED Protocol for QoS Guarantee of Reliability and Timeliness in Wireless Sensor Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 5, No. 6, 2006, 738-754.
- [Ferreira *et al*, 2007] Ferreira, D.J., Dantas, M.A.R., Pinto, A. R., Montez, C., Rodrigues, M., A Middleware for OSCAR and Wireless Sensor Network Environments. In: 21st International Symposium on High Performance Computing Systems and Applications, 2007.
- [Goldberg, 1989] Goldberg, D., *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [Hadim e Mohamed, 2006] Hadin, S. e Mohamed, N., *Middleware Challenges and Approaches for Wireless Sensor Networks*, *IEEE Distributed Systems Online*, vol. 7, no. 3, 2006.
- [Heinzelman *et al.*, 2004] Wendi B. Heinzelman, Amy L. Murphy, Hervaoldo S. Carvalho e Mark A. Perillo, *Middleware to Support Sensor Network Applications*, *IEEE Network*, Janeiro 2004.
- [Heo *et al*, 2009] Heo, J. , Hong, J., Cho, Y., EARQ: Energy Aware Routing for Real-Time and Reliable Communication in Wireless Industrial Sensor Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 5, No. 1, (2009), 3-11.
- [Huebscher e McCann, 2008] Huebscher M.C, McCann J.A. A survey of autonomic computing degrees, models, and applications. *ACM Comput Surveys* 2008;40(3):1-28.
- [Holland, 1984] J.H. Holland, “Genetic Algorithms and Adaptation”, in *Proc. of the NATO Advanced Research Institute on Adaptive Control of Ill-Defined Systems*, 1984, pp. 317-333.
- [IEEE802.15.4, 2008] Especificação IEEE 802.15.4 disponível em <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>, 2008
- [Ilyas e Mahgoub, 2005] Ilyas, M. e Mahgoub, I. *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*, 2005, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida USA.

- [Jungmin *et al*, 2005] Jungmin So, Jintae Kim, Indanil Gupta, Cushion: Autonomically Adaptive Data Fusion in Wireless Sensor Networks, MASS 2005.
- [Kang *et al*, 2004] Kang, K., Son H. S., Stankovic, J.A., Managing Deadline Miss Ratio and Sensor Data Freshness in Real-Time Databases, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 16, No. 10, 2004.
- [Kephart e Chess, 2003] Kephart , J.O., Chess, D.M. ,The Vision of Autonomic Computing, IEEE Computer, 2003.
- [Kim *et al*, 2007] Kim, S., Pakzad, S., Culler, D., Demmel, J., Fenves, G., Glaser, S., Turon, M., Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks, Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks, Massachusetts, USA, 2007.
- [Kopetz, 1997] Kopetz, H., Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications, TKluwer Academic Pub., 1997.
- [Koubaa *et al*, 2006] Koubaa, A., Alves, M., Tovar, E., A comprehensive Simulation Study of Slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks, In IEEE WFCS 2006, Torino (Italy), June 2006.
- [Koubaa *et al*, 2009] Koubaa, A., Severino, R., Alves, M., Tovar, E., Improving Quality-of-Service in Wireless Sensor Networks by mitigating “Hidden-Node Collisions”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Special Issue on Real-Time and Embedded Networked Systems, Volume 5, Number 3, August 2009
- [Lavrati *et al.*, 2010] Lavratti, F., Pinto, A. R., Prestes, D., Bolzani, L., Vargas,F., Montez, C., “Towards a Transmission Power Self-Optimization in Reliable Wireless Sensor Networks”, Proc. 11th IEEE Latin American Test Workshop, 2010.
- [Lavrati *et al*, 2010b] Lavratti, F., Pinto, A. R., Bolzani, L., Vargas,F., Montez, C., Hernandez, F.; Gatti, E.; Silva, C., Evaluating a Transmission Power Self Optimization Technique for WSN in EMI Environments, Proc. 13 th Euromicro Conference on Digital System Design, 2010.
- [Liao *et al*, 2008] Liao, W., Kao, Y., Fan, C., Data aggregation in wireless sensor networks using ant colony algorithm, Journal of Network and Computer Applications, no. 31, 2008, 387–401.
- [Liang e Liu, 2006] Liang, B., Liu Q. A Data Fusion Approach for Power Saving in Wireless Sensor Networks, First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences, IMSCCS '06, 2006, 582-586.

- [Liyang *et al*, 2005] Liyang Y., Neng W., Xiaoqiao M., Real-Time Forest Fire Detection with Wireless Sensor Networks, 2005.
- [Liu e Moura, 2004] Liu, E., Moura, J, Fusion in Sensor Networks: Convergence Study, Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004, 865-870.
- [Loureiro *et al*, 2003] Loureiro, A.A. et. al. Redes de Sensores sem Fio. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, 2003.
- [Machado *et al*, 2005] Machado, M., Goussevskaia, O., Mini, C.G. Rezende, A.A . F. Loureiro, G.R. Mateus, J.M. Nogueira, Data Dissemination in Autonomic Wireless Sensor Networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol 23, No. 12, Dezembro, 2005.
- [Mainwaring *et al*, 2002] Mainwaring, A., Culler, D., Polastre, J., Szewczyk, R., Anderson, J., Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring, Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, 2002, 88-97.
- [Melodia *et al*, 2010] Melodia, T., Pompili, D., Akyildiz, I.F., Handling Mobility in Wireless Sensor and Actor Networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 9, No. 2, (2010), 160-173.
- [MicaZ, 2010] MicaZ Mote Datasheets: [HTTP://www.xbow.com](http://www.xbow.com)
- [Miorandi *et al*, 2010] Miorandi, D., Yamamoto, L., Pellegrini, F., A survey of evolutionary and embryogenic approaches, Computer Networks, no. 54, 2010, 944–959.
- [Mitchell, 1996] Mitchell, M., An Introduction to Genetic Algorithm, MIT Press., 1996.
- [Molla e Ahamed, 2006] Molla, M. e Ahamed, S. I., A Survey for Sensor Network and Challenges, Proceedings of the 2006 International Conference on Parallel Processing Workshops, 2006
- [Morita *et al*, 2007] Morita, K., Watanabe, K., Hayashibara, N., Enokido, T. e Takanzawa, M., Efficient Data Transmission in a Lossy and Resource Limited Wireless Sensor-Actuator Network, Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'07), 2007.
- [Nakamura *et al*, 2007] Nakamura, E.F, Loureiro, A., Frery, A.C., Information fusion for wireless sensor networks: Methods, models, and classifications. *ACM Comput. Surv* 2007;39(3):9.
- [Nicholson, 2004] Nicholson, D., An Automatic Method for Eliminating Spurious Data From Sensor Networks, IEEE Target Tracking 2004: Algorithms and Applications, March 2004.

- [Niu *et al*, 2006] Niu,R., Vashney, P.K., Cheng, Q., Distributed Detection in a Large Wireless Sensor Network, Science Direct, Information Fusion 7, Julho, 2006.
- [Pai e Han, 2006] Pai, H., Han, Y., Power-Efficient Data Fusion Assurance Using Direct Voting Mecanism in Wireless Sensor Networks, IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous and Trustworthy Computing, 2006, 368-375.
- [Patil *et al*, 2004] Patil, S., Das, S., Nasipuri, A., Serial Data Fusion Using Space-filling Curves in Wireless Sensor Networks, IEEE SECON 2004, 2004, 182-190.
- [Pinto *et al*, 2007a] Pinto, A. R., B. Bitencort, MONTEZ, C., Uma Abordagem de Fusão de Dados com Restrição de Tempo Real em Redes de Sensores sem Fio. In: SBAI 2007, 2007, Florianópolis. Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2007.
- [Pinto *et al*, 2007b] Pinto, A. R., Dantas, M.A.R., B. Bitencort, Montez, C., Fusão de Dados Tempo Real em Redes de Sensores Sem Fio Multimídia. In: Webmedia 2007, Gramado. Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web. Porto Alegre : SBC, 2007. v. 1. p. 95-102.
- [Pinto *et al*, 2007c] Pinto, A. R., B. Bitencort, Underlea Correa, Dantas, M.A.R., MONTEZ, C., Probabilistic Real-time Data Fusion in Wireless Sensor Networks with ZigBee. In: 7Th IFAC International Conference in Fieldbuses and Networks in Industrial Embedded Systems, 2007, Toulouse. 7Th IFAC International Conference in Fieldbuses and Networks in Industrial Embedded Systems, 2007.
- [Pinto et al., 2008] Pinto A.R., Montez, C., Dantas, M.A.R., Vasques, F., Genetic Machine Learning Approach for Data Fusion Applications in Dense Wireless Sensor Networks, 13th ETFA Hamburg, 2008.
- [Pinto et al., 2009] Pinto, A.R., Camada, M., Dantas, M. A.R, Montez, C., Portugal, P., Vasques, F., Genetic Machine Learning in the Optimization of Communication Efficiency in Wireless Sensor Networks, Proc. Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2009.
- [Pinto et al, 2009b] Pinto, A.R., Camada, M., Dantas, M.A.R, Montez, C., Portugal, P., Vasques, Self-organizing Approach for Real-time Data Fusion in Dense Wireless Sensor Networks, 11th Brazilian Worskhop on Real-Time and Embedded Systems, 2009.
- [Pinto *et al*, 2010] Pinto, A.R., Ferreira, B.R., Montez, C., Portugal, P., Vasques,F, VOA: Variable Offset Algorithm for the Optimization of Communication Efficiency in Wireless Sensor Networks 8th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 2010

- [Quan *et al*, 2007] Quan, Z., Subramanian, A., Sayed, A.H., REACA: An Efficient Protocol Architecture for Large Scale Sensor Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 6, No. 10, (2007), 3846-3855.
- [Ruiz *et al*, 2005] Ruiz, L.B., *et. al.*, On The Design of A Self-Managed Wireless Sensor Network, *IEEE Communications Magazine*, Julho 2005.
- [Sachenko *et al*, 1998] Sachenco, A., Kochan, V., Turchenko, V., Intelligent Distributed Sensor Network, *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1998.
- [Shu *et al*, 2007] Shu, F., Sakurai, T., Zukerman, M., Vu, H., Packet Loss Analysis of the IEEE 802.15.4 MAC without Acknowledgements, *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 1, (2007), 79-81
- [Stankovic *et al*, 2003] Stankovic, J.A., Abdelzaher, T.F., Lu, C., Sha, L., Hou, J.C., Real-Time Communication and Coordination in Embedded Sensor Networks. *Proceedings of The IEEE*, Vol. 91, No. 7, (Jul. 2003), 1002-1022.
- [Wener-Allen *et al*, 2005] Werner-Allen, G., Johnson, J., Ruiz, M., Lees, J., Welsh, M., Monitoring Volcanic Eruptions with a wireless Sensor Network, *Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks*, 2005, 108-120.
- [Wu *et al*, 2004] Wu, Q., *et. al.*, On Computing Mobile Agent Routes for Data Fusion in Distributed Sensor Networks, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 16, No. 6. Junho, 2004.
- [Wu *et al*, 2009] Wu, Y., Fahmy S., Shroff, N. , Optimal Sleep/Wake Scheduling for Time-Synchronized Sensor Networks With QoS Guarantees, *IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING*, VOL. 17, NO. 5, 2009, 1508- 1521.
- [Yan *et al*, 2003] Yan T., He T., Stankovic, J.A., Differentiated Surveillance for Sensor Networks, *Proceedings of 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, LA, CA, USA, 2003.
- [Yick *et al*, 2008] Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal. D., Wireless sensor network survey, *Computer Networks*, no. 52, 2008, 2292–2330
- [Yuan *et al*, 2003] Yuan, W., Krishnamurthy, S.V., Tripathi, S.K., Synchronization of Multiple Levels of Data Fusion in Wireless Sensor Networks, *Global Telecommunications Conference 2003, GLOBECOM '03*, December 2003.
- [Xbee, 2010] XBee/XBee-PRO OEM RF Modules, <http://www.digi.com>
- [Xu *et al*, 2004] Xu, N., Rangwala, S., Chintalapudi, K., Ganesan, D., Broad, A., Govindan, R., Estrin, D., A Wireless Sensor Network For

Structural Monitoring, Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, Baltimore,USA. 2004.

[ZigBee, 2010] ZigBee Specification, <http://www.zigbee.org>, 2010.

[Zhu et al, 2006] Zhu, J., Papavassiliou, S., Yang, J., Adaptive Localized QoS-Constrained Data Aggregation and Processing in Distributed Sensor Networks, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol 17 no 9, September 2006, 923-933.