

BENEDITO RODRIGUES BITENCORT JUNIOR

**FUSÃO DE DADOS PARALELA EM REDES DE
SENSORES SEM FIO DENSAS UTILIZANDO
ALGORITMO GENÉTICO**

**FLORIANÓPOLIS
2008**

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

FUSÃO DE DADOS PARALELA EM REDES DE
SENSORES SEM FIO DENSAS UTILIZANDO
ALGORITMO GENÉTICO

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas.

BENEDITO RODRIGUES BITENCORT JUNIOR

Florianópolis, Julho de 2008.

FUSÃO DE DADOS PARALELA EM REDES DE SENSORES SEM FIO DENSAS UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

BENEDITO RODRIGUES BITENCORT JUNIOR

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas, Área de Concentração em Controle, Automação e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Carlos Barros Montez, Dr.
Orientador

Eugênio de Bona Castelan Neto, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas

Banca Examinadora:

Carlos Barros Montez, Dr
Presidente

Mário Antônio Ribeiro Dantas, Dr.

Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes, Dr Eng.

Roberto Willrich, Dr.

À minha família.
Por ter sido o meu principal apoio,
durante esta minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, aos meus avós. Por terem me dado pais tão dedicados e amigos. Sem a ajuda deles não teria obtido o sucesso almejado.

Aos meus familiares e amigos. Pelo incentivo e apoio durante estes dois anos e meio de estadia em Santa Catarina.

Aos amigos e companheiros do laboratório. Pelos momentos de descontração que tivemos.

Ao meu orientador Carlos Barros Montez. Por ter me aceitado como seu orientando, pela dedicação empregada para a melhoria constante do trabalho, e principalmente, pelo empenho para que eu entregasse a versão final.

Ao colega Marcos Yuzuru de Oliveira Camada. Pela parceria e companheirismo no grupo de RSSF-TR.

Ao amigo Jim Lau. Pelo incentivo durante a reta final.

À Renata Melo e Silva de Oliveira. Pelo incentivo, dedicação, companheirismo e apoio.

Ao amigo Prof. Dr. Rodrigo Melo e Silva de Oliveira. Pela ajuda.

Ao meu irmão Ricardo Rian Marques Bitencort e minha cunhada Lucineide de Oliveira Bitencourt. Por terem me dado meus dois sobrinhos.

Ao amigo Samuel Menezes de Araújo. Por ceder a chave do seu apartamento. Durante minha estadia em Belém, para que eu pudesse escrever o meu trabalho.

Ao amigo Robson Costa. Pela amizade durante esses dois anos.

Por ultimo, agradeço àquelas pessoas que ajudaram de alguma forma, seja direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Ainda quando eu falasse todas as línguas dos homens e a língua dos próprios anjos, se eu não tiver caridade, serei como o bronze que soa e um címbalo que retine.

Ainda quando tivesse o dom da profecia, que penetrasse todos os mistérios, e tivesse perfeita ciência de todas as coisas; ainda quando tivesse toda a fé possível, até ao ponto de transportar montanhas, se não tiver caridade, nada sou.

E, quando houvesse distribuído aos meus bens para alimentar os pobres e houvesse entregado o meu corpo para ser queimado, se não tivesse caridade, tudo isso de nada me serviria.

A caridade é paciente; é branda e benfazeja; a caridade não é invejosa; não é temerária, nem precipitada; não se enche de orgulho; não é desdenhosa; não cuida de seus interesses; não se agasta, nem se azeda com coisa alguma; não suspeita mal; não se rejubila com a injustiça, mas se rejubila com a verdade; tudo suporta, tudo crê, tudo espera, tudo sofre.

Agora, estas três virtudes: a fé, a esperança e a caridade permanecem; mas, dentre elas, a mais excelente é a caridade.

São Paulo, 1º Epístola aos Coríntios, cap. XIII, vv.1 a 7 e 13.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas.

FUSÃO DE DADOS PARALELA EM REDES DE SENSORES SEM FIO DENSAS UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Benedito Rodrigues Bitencort Junior

Julho/2008

Orientador: Carlos Barros Montez, Dr.

Área de Concentração: Controle, Automação e Sistemas

Palavras-chave: Comunicação Autônoma e Tempo Real

Número de Páginas: xi + 85

Redes de sensores sem fio são redes que possuem severas restrições computacionais. Após a implantação dessas redes no ambiente, ainda existe o problema de auto-configuração e auto-gerenciamento em virtude da necessidade que se tem dessas redes serem autônomas. Conciliar as restrições computacionais bem como a gerência da estrutura dinâmica dessas redes é uma tarefa difícil.

O presente trabalho aborda o uso de algoritmo genético para atingir a auto-configuração e auto-otimização em redes de sensores sem fio densas. Duas abordagens de algoritmo genético foram implementadas e simuladas. Essas abordagens atuam em um nodo central, o qual não possui restrições de recursos. Este nodo é responsável por gerenciar os demais nodos da rede. O objetivo final é reduzir as perdas de mensagens, e melhorar a qualidade dos dados coletados. Como consequência, consegue-se aumentar a eficiência energética da rede. Os resultados das simulações demonstraram a viabilidade dessa abordagem.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Automation and Systems Engineering.

PARALLEL DATA FUSION IN DENSE WIRELESS SENSOR NETWORKS USING GENETIC ALGORITHMS

Benedito Rodrigues Bitencort Junior

July/2008

Advisor: Carlos Barros Montez, Dr.

Área of Concentration: Control, Automation and Systems

Keywords: Autonomic Computing and Real-Time

Number of Pages: xi + 85

There is a considerable computational limitation for running Wireless Sensor network. After its implantation into an environment, those networks still expose problems to be solve, e.g. autonomic self-configuring and self-management issues. Therefore, conciliating computational restrictions and networks structure management is a challenge.

The present work concerns the use of genetic algorithm to obtain self-configuring and self-optimization goals in dense wireless networks sensors. Two genetic algorithms approaches were implemented and simulated. Those approaches ran into a non resource-constrained central node. This node was the responsible to manage every other node at the networks. The main objective was to reduce the lost of messages, and also improve the quality of the collected data. As consequence, the energetic efficiency of the network meant to be increased. As results of simulations it was demonstrated that this approach is viable.

Sumário

1 **INTRODUÇÃO**..... 1

1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	4

2 **REDE DE SENSORES SEM FIO E FUSÃO DE DADOS** 6

2.1	INTRODUÇÃO.....	6
2.2	REDES <i>AD-HOC</i>	6
2.3	REDE DE SENSORES SEM FIO – RSSF	8
2.3.1	APLICAÇÕES	10
2.3.2	CARACTERÍSTICAS.....	11
2.3.3	CLASSIFICAÇÃO.....	15
2.3.4	ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO	20
2.4	TECNOLOGIA ZIGBEE E O PADRÃO IEEE 802.15.4	22
2.5	FUSÃO DE DADOS	25
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	27

3 **COMUNICAÇÃO AUTONÔMICA**..... 28

3.1	INTRODUÇÃO.....	28
3.2	SISTEMA NERVOSO	28
3.3	COMUNICAÇÃO AUTONÔMICA.....	29
3.3.1	NÍVEIS DE AUTONOMICIDADE	29
3.3.2	AUTO-GERENCIAMENTO.....	31
3.3.3	ELEMENTO AUTONÔMICO (EA).....	34
3.4	ALGORITMO GENÉTICO.....	36
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39

4 MODELO DE FUSÃO DE DADOS EM TEMPO REAL EM REDE DE SENSORES

<u>SEM FIO</u>	40
4.1 INTRODUÇÃO	40
4.2 VISÃO GERAL DO MODELO	41
4.2.1 MONITORAMENTO PERIÓDICO E VALIDADE TEMPORAL DOS DADOS	43
4.2.2 MÉTRICAS	43
4.3 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO	44
4.4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NO TRUETIME	46
4.5 ABORDAGENS PROPOSTAS	49
4.5.1 PROBABILIDADE DE ENVIO VARIÁVEL	50
4.5.2 ABORDAGENS AUTONÔMICAS BASEADAS EM ALGORITMO GENÉTICO	52
4.6 TRABALHOS RELACIONADOS	57
4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60

5 AVALIACÃO DA ABORDAGEM DE ALGORITMO GENÉTICO **61**

5.1 INTRODUÇÃO	61
5.2 ABORDAGEM I: MONO-OBJETIVO	61
5.3 ABORDAGEM II: MULTI-OBJETIVO	65
5.3.1 AUMENTO DA DENSIDADE EM TEMPO DE EXECUÇÃO	71
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	74

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

<u>APÊNDICE A - RESULTADOS DA ABORDAGEM DE PROBABILIDADE DE ENVIO VARIÁVEL</u>	77
---	-----------

<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	79
--	-----------

Índice de Figuras

FIGURA 1.1 – MÉDIA DE MENSAGENS RECEBIDAS E A EFICIÊNCIA [4].	2
FIGURA 2.1 – TIPOS DE REDE DE COMUNICAÇÃO DE DADOS.	7
FIGURA 2.2 – PADRÃO DE COMUNICAÇÃO DAS RSSFs.	12
FIGURA 2.3 – ARQUITETURA DO NODO SENSOR.	14
FIGURA 2.4 – DIFERENTES TAXONOMIAS PARA UMA RSSF.	15
FIGURA 2.5 – ESTRUTURA DA PILHA DE PROTOCOLOS DEFINIDA PELA ZIGBEE ALLIANCE.	23
FIGURA 2.6 – TOPOLOGIAS PREVISTAS PELO ZIGBEE: (A) ESTRELA, (B) ÁRVORE, (C) MALHA.	23
FIGURA 2.7 – ESTRUTURA DO SUPER-FRAME DO IEEE 802.15.4.	24
FIGURA 2.8 – FUSÃO DE DADOS SERIAL.	26
FIGURA 2.9 – FUSÃO DE DADOS PARALELA.	26
FIGURA 2.10 – FUSÃO DE DADOS HÍBRIDA.	27
FIGURA 3.1 - ARQUITETURA GENÉRICA DE UM ELEMENTO AUTÔNOMICO.	35
FIGURA 4.1 – TOPOLOGIA DA REDE PARA FUSÃO DE DADOS PARALELA.	41
FIGURA 4.2 – CONCEITO DE ROUND E DE SESSÃO.	43
FIGURA 4.3 – BLOCOS DO TRUETIME.	45
FIGURA 4.4 – BLOCO DE KERNEL QUE SIMULA O COMPORTAMENTO DE NODOS SENSORES.	45
FIGURA 4.5 – MODELOS DE ANTENAS.	46
FIGURA 4.6 – DESENHO ESQUEMÁTICO DOS SENSORES ESCRAVOS.	47
FIGURA 4.7 – ALGORITMO DO NODO ESCRAVO.	48
FIGURA 4.8 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO NODO MESTRE.	48
FIGURA 4.9 – ALGORITMO DO NODO MESTRE.	49
FIGURA 4.10 – ESTRUTURA DO CLASSIFICADOR NO ALGORITMO GENÉTICO.	53
FIGURA 4.11 – INTERPRETAÇÃO DO CROMOSSOMO.	54
FIGURA 4.12 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO GENÉTICO PARA A ABORDAGEM MONO-OBJETIVO.	55
FIGURA 4.13 – VISÃO DA ESTRUTURA DE SOFTWARE IMPLEMENTADO NO NODO MESTRE.	56
FIGURA 5.1 - COMPORTAMENTO DA REDE AO LONGO DO TEMPO DE SIMULAÇÃO DE 2000MS.	62
FIGURA 5.2 - TOTAL DE MENSAGENS RECEBIDAS E ENVIADAS PARA CADA DENSIDADE DA REDE.	63
FIGURA 5.3 - COMPORTAMENTO DA EFICIÊNCIA EFETIVA A CADA CHECKPOINT (DENSIDADE DE 100 NODOS).	64
FIGURA 5.4 - TESTE DE LIMAR PARA DENSIDADE DE 100 NODOS.	66
FIGURA 5.5 - TESTE DE LIMAR PARA DENSIDADE DE 50 NODOS.	66
FIGURA 5.6 – TESTE PARA LIMAR IGUAL A 12 VARIANDO A DENSIDADE DA REDE.	67
FIGURA 5.7- EFICIÊNCIA EFETIVA PARA A DENSIDADE DE 100 NODOS.	68
FIGURA 5.8 - QUALIDADE DA FUSÃO PARA A DENSIDADE DE 100 NODOS.	69
FIGURA 5.9 – PROBABILIDADE DE ENVIO A CADA CHECKPOINT PARA DENSIDADE DE 100 NODOS.	69
FIGURA 5.10 – CHECKPOINT PARA UM LIMAR FIXO IGUAL A 12 E DENSIDADE IGUAL A 100 NODOS.	70
FIGURA 5.11 – COMPORTAMENTO DA EFICIÊNCIA PARA O ACRÉSCIMO DE NODOS SENSORES.	72
FIGURA 5.12 – COMPORTAMENTO DA QUALIDADE DA FUSÃO.	73
FIGURA 5.13 – COMPORTAMENTO DA PROBABILIDADE DE ENVIO.	73
FIGURA A.1 - MENSAGENS RECEBIDAS E EFICIÊNCIA COM DENSIDADE DE 10 NODOS.	78
FIGURA A.2 - ABORDAGEM ADAPTATIVA USANDO DIFERENTES PROBABILIDADES DE ENVIO NO INÍCIO DE CADA SESSÃO DE MONITORAMENTO PARA DENSIDADE DE 50 NODOS.	78

Índice de Tabelas

TABELA 2.1 – CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DAS REDES <i>AD-HOC</i>	8
TABELA 2.2 – ALGUMAS ÁREAS DE APLICAÇÃO PARA RSSF.	10
TABELA 2.3 – CARACTERÍSTICAS DAS RSSFs.	12
TABELA 2.4 – CLASSIFICAÇÃO DAS REDES DE SENSORES SEM FIO SEGUNDO A SUA CONFIGURAÇÃO [8].	16
TABELA 2.5 – CLASSIFICAÇÃO DAS REDES DE SENSORES SEM FIO SEGUNDO O SENSORIAMENTO[8].	17
TABELA 2.6 – CLASSIFICAÇÃO DAS REDES DE SENSORES SEM FIO SEGUNDO A COMUNICAÇÃO [8].	17
TABELA 2.7 – CLASSIFICAÇÃO DAS REDES DE SENSORES SEM FIO SEGUNDO O PROCESSAMENTO [8].	18
TABELA 2.8 – CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A CONECTIVIDADE.	19
TABELA 2.9 – CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O ENDEREÇAMENTO DE REDE [25].	19
TABELA 3.1 - NÍVEIS DE AUTONOMICIDADE NA EVOLUÇÃO DE UM SISTEMA [52].	29
TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS DO MODELO PROPOSTO.	42
TABELA 5.1 - PERCENTUAL DE MENSAGENS RECEBIDAS E PERDIDAS NA REDE.	63
TABELA 5.2 - ANÁLISE DE DISPERSÃO DAS MÉTRICAS PARA AS DENSIDADES DE 100 E 50 NODOS.	64
TABELA 5.3 – PERCENTUAL DE MENSAGENS RECEBIDAS E PERDIDAS.	68
TABELA 5.4 – OVERHEAD EM ROUND CALCULADO PARA CADA FREQUÊNCIA DE <i>CHECKPOINT</i>	71
TABELA 5.5 – ANÁLISE DE DISPERSÃO DAS MÉTRICAS PARA AS DENSIDADES DE 100 E 50 NODOS.	71
TABELA A.1 - PARÂMETROS DO TRUETIME UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.	77
TABELA A.2 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA UMA REDE SEM ABORDAGEM PROBABILISTA.	77

1 Introdução

Com o avanço das pesquisas na área de microeletrônica houve a possibilidade do desenvolvimento de dispositivos cada vez menores, dotados de algum poder computacional. As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) surgem a partir deste avanço tecnológico, atendendo a uma necessidade de monitorar fenômenos físicos provenientes de um determinado ambiente. Esta nova tecnologia é recente e a sua aplicação é vasta e aplicável a diversos campos, na indústria, na área médica, na questão ambiental, na área militar. A comunidade científica vem pesquisando esta nova tecnologia aplicando-a em inúmeros campos de atividade. Neste sentido, há diversos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento de novos mecanismos e recursos que visam tornar estas redes cada vez mais atraentes para inúmeras aplicações.

1.1 Motivação

Implantar uma RSSF com grande densidade de nodos é vantajoso, principalmente, pelo aumento na confiabilidade dos dados monitorados. Além disso, quanto maior o número de nodos que pertencem à rede, maior a probabilidade desta permanecer operacional por mais tempo através de um escalonamento de sono (*sleep scheduling*).

No entanto, em uma rede de sensores com muitos nodos que efetuam leituras e enviam seus dados através de mensagens na rede, à medida que a densidade aumenta, maior é a possibilidade de colisões, retransmissões e perdas de mensagens. Além disso, muitas aplicações de RSSF, por lidarem diretamente com o ambiente, têm características de tempo real, e seus dados apresentam uma validade temporal (*data freshness*). Muitas mensagens podem demorar a chegar até seu destino e perderem sua validade temporal.

Para ilustrar esta situação, diversos experimentos foram efetuados usando o simulador TrueTime, adotando-se como camadas física e sub-camada MAC (*Medium Access Protocol*) o padrão IEEE 802.15.4 [52]. Empregou-se uma topologia em estrela, onde um nodo central é responsável por coletar dados enviados periodicamente pelos outros nodos. Diversos experimentos foram efetuados variando-se a densidade da rede.

No cenário adotado, utilizou-se um período de 1000ms para os nodos enviarem seus dados, e estes dados possuem um prazo (*deadline*) de 100ms para alcançarem o nodo central. A Figura 1.1 apresenta alguns resultados que ilustram este cenário. Duas métricas foram consideradas e são apresentadas na Figura 1.1: (i) **Média de mensagens recebidas** a cada período pelo nodo central, e (ii) **Eficiência**. Esta última representa a razão entre o total de mensagens recebidas pelo nodo central e enviadas pelos demais nodos, a cada período.

Analisando-se o gráfico da Figura 1.1 é possível notar que à medida que a densidade da rede aumenta, a média de mensagens recebidas pelo nodo central também aumenta. No entanto, a partir de uma determinada densidade, este aumento passa a ser muito pequeno. Observa-se, por exemplo, que a média de mensagens recebidas com uma densidade de 100 nodos (19 mensagens por período) é muito próxima da obtida com uma densidade de 200 nodos (21 mensagens por período). O número mínimo de mensagens que deveria alcançar o nodo central é dependente da aplicação. No entanto, percebe-se que se a chegada de 19 mensagens fosse suficiente para o nodo central, uma densidade de apenas 100 nodos seria suficiente para a aplicação.

Além disso, nota-se que a eficiência é reduzida consideravelmente com o aumento da densidade da rede. Quanto maior o número de nodos sensores enviando mensagens na rede, maior o número de colisões e, conseqüentemente, maior o número de mensagens que foram enviadas e que deixam de chegar ao nodo mestre antes do *deadline*. Mais ainda, a maior parte das mensagens nem mesmo chega a alcançar o nodo central. Isso é conseqüência do protocolo MAC IEEE 802.15.4 adotado. Este protocolo foi criado para redes com restrição energética (redes LR-WPAN, *Low-Rate Wireless Personal Area Network*) e o número máximo de tentativas de transmissão é limitado quando o nodo deseja transmitir e o canal de comunicação se torna ocupado.

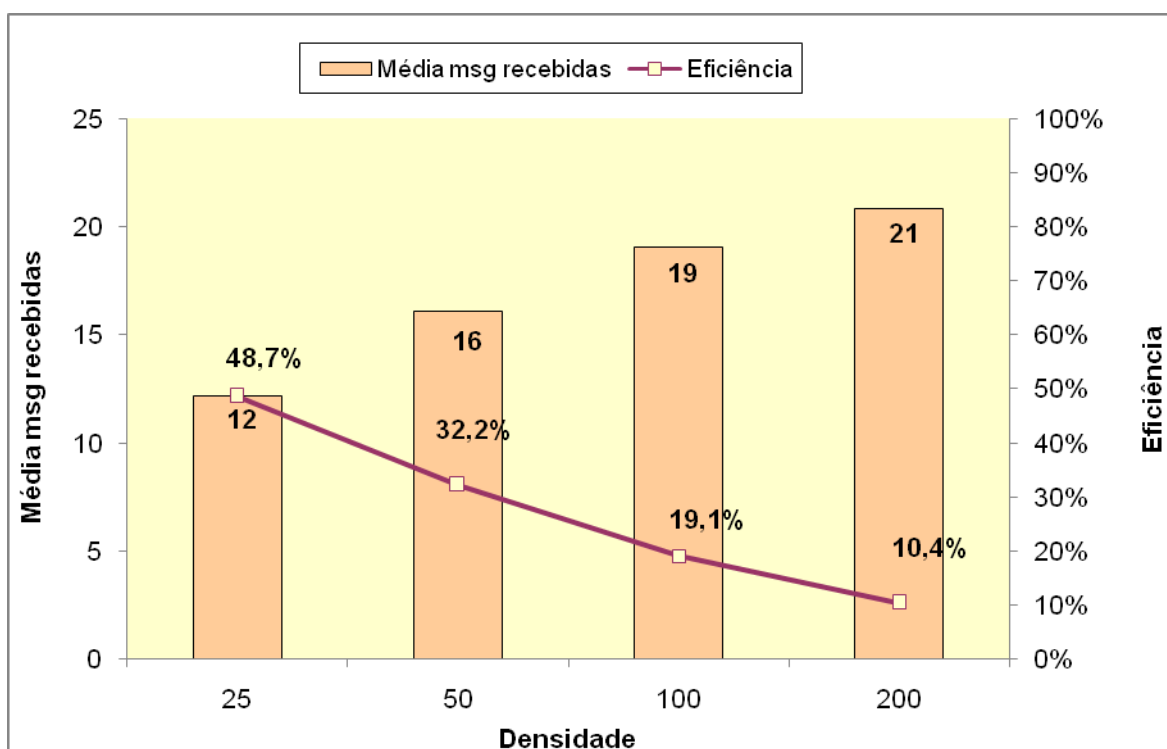


Figura 1.1 – Média de mensagens recebidas e a eficiência [4].

Observa-se ainda na Figura 1.1 que o valor de eficiência desta rede com 200 nodos é próximo de 10%. A cada dez mensagens que um nodo tenta enviar, aproximadamente

apenas uma alcança o nodo central. Neste caso observa-se que mesmo com uma densidade de apenas 100 nodos, o valor de eficiência obtido é menor que 20%. A métrica de eficiência mensura indiretamente o desperdício de energia (ou eficiência energética).

Como o gasto energético se dá em maior quantidade através da comunicação dos nodos sensores, uma maior densidade de rede implica em maior gasto energético, principalmente, porque redes mais densas tendem a ocasionar um maior número de desistência de transmissões e colisões e, por conseqüência, maior desperdício de energia. Portanto, é possível que o custo energético não compense a pequena melhora na média de mensagens recebidas [4].

1.2 Objetivos

Existem abordagens em que RSSF são implantadas espalhando-se aleatoriamente seus nodos na região que se deseja monitorar. Diversos nodos tornam-se não operacionais já na implantação, ou ao longo da operação da rede devido a falhas, problemas de estação escondida, etc. Isso cria diversas demandas que precisam ser cuidadosamente pesquisadas, pois estas redes possuem recursos computacionais e energéticos limitados. Isso ocasiona a busca por abordagens que objetivam reduzir o consumo de energia, conciliando com o limitado poder computacional de seus nodos.

Além disso, restrições temporais surgem em diversas aplicações pelo fato dessas redes interagirem diretamente com o ambiente. Como exemplo, poderia ser citado o uso de rede de sensores sem fio na detecção de intrusos em uma determinada área monitorada [23]. Caso os sensores detectem colaborativamente a presença de uma pessoa em uma determinada área, estes terão que enviar uma mensagem à estação base, informando a presença de tal pessoa. A comunicação entre os sensores e a estação base tem que se dar dentro de um prazo pré-estabelecido (um *deadline*), pois a estação base precisa trabalhar com dados recentes para a sua tomada de decisão.

Após a implantação dessas redes no ambiente, ainda existe o problema de auto-configuração e auto-gerenciamento em virtude da necessidade que se tem dessas redes serem autônomas. Isso decorre do fato da dificuldade da troca de bateria em cada nodo. Além disso, há ambientes nos quais o acesso humano para manutenção é inviabilizado.

Uma RSSF densa pode trazer vantagens com relação à confiabilidade e tempo de vida da rede. No entanto, conforme visto na seção anterior, uma rede densa usualmente apresenta ineficiência e um grande desperdício energético. Em uma rede deste tipo pode ser interessante controlar o comportamento dos nodos, ajustando seus parâmetros e permitindo que cada nodo decida se irá enviar seus dados em cada período, ou se irá simplesmente dormir (entrar no estado *sleep*) até o início do próximo período. Como não há possibilidade de intervenção humana para ajustar esses parâmetros, abordagens autonômicas tornam-se importantes.

As teorias de Computação Autônômica e Comunicação Autônômica aplicam técnicas de controle realimentado, auto-organização, monitoramento e inteligência artificial para o gerenciamento e manutenção de grandes sistemas. Esta técnica vem sendo empregada para lidar com a complexidade existente nos sistemas de computação, assim como o impacto desta complexidade na construção, composição, gerenciamento e manutenção desses sistemas.

Este trabalho propõe uma abordagem autônômica – principalmente com respeito ao auto-gerenciamento e auto-otimização – para redes de sensores sem fio densas e homogêneas (compostas de múltiplos sensores monitorando um único fenômeno físico em uma área) que necessitem de restrições temporais para o recebimento de mensagens, através do uso de algoritmo genético. A abordagem visa, através da teoria de comunicação autônômica, controlar o parâmetro denominado Probabilidade de Envio, buscando estabelecer um balanceamento entre os objetivos de obter a maior qualidade nas informações recebidas pela estação base e reduzir o consumo de energia da rede, maximizando seu tempo de vida.

Neste trabalho, as limitações deste tipo de rede foram consideradas. Portanto, optou-se por utilizar uma técnica de otimização – denominada *algoritmo genético* – para viabilizar as técnicas de auto-gerenciamento propostas pela teoria de computação autônômica. O principal objetivo do trabalho é explorar a possibilidade de uso de algoritmo genético para este tipo de rede, e analisar o seu impacto na melhoria do desempenho das RSSF. Duas métricas de desempenho foram empregadas: (i) qualidade da fusão (que corresponde à média de mensagens recebidas) e (ii) eficiência (que mensura a taxa de mensagens usado na fusão de dados).

1.3 Metodologia e organização do texto

A metodologia adotada foi, inicialmente, levantar todas as propostas e especificações existentes relacionadas a redes de sensores sem fio densas. Estudou-se também ferramentas disponíveis para a simulação dessas redes. Algumas das ferramentas analisadas não fazem parte deste texto. Os resultados deste estudo aparecem principalmente nos Capítulos 2 e 3 desta dissertação. O Capítulo 2 apresenta as redes de sensores sem fio e as técnicas de fusão de dados, os quais são os principais temas de estudo deste trabalho. No Capítulo 3 é abordada a teoria de comunicação autônômica e algoritmos genéticos. A ferramenta de simulação usada neste trabalho – TrueTime – é descrita no Capítulo 4.

A partir da literatura estudada, foi implementado um modelo de RSSF. O modelo implementado nesta dissertação foi desenvolvido em conjunto com o trabalho de doutoramento do aluno Alex R. Pinto [4][29][38].

As principais premissas consideradas no modelo implementado foram:

- i) A topologia da rede assume um formato estrela, no qual um nodo central, aqui denominado nodo mestre, recebe e processa (fusão de dados paralela) as mensagens encaminhadas pelos demais nodos.
- ii) O nodo mestre não possui problemas de energia (essa questão não é tratada neste trabalho).
- iii) No nodo mestre as informações são coletadas durante um período de tempo (tempo de sessão) na qual os demais nodos enviam suas mensagens periodicamente. Os tempos de sessão e de período são características da aplicação.
- iv) Há um prazo (*deadline*) para as mensagens serem usadas pelo nodo mestre.
- v) A informação coletada por um nodo, individualmente, não é confiável. Considera-se que a qualidade da informação coletada cresce proporcionalmente ao número de nodos que conseguem enviar suas informações dentro do prazo para o nodo mestre.

Este modelo e suas premissas são descritos com mais detalhes no Capítulo 4. Nesse capítulo também há a comparação do modelo implementado com outras propostas existentes na literatura científica.

Alguns experimentos iniciais foram efetuados, cujo principal resultado estão representados na Figura 1.1 deste Capítulo 1. A partir desses resultados, estabeleceram-se as duas principais premissas deste trabalho:

- vi) Dada uma rede de sensores sem fio densa, efetuando fusão de dados paralela tempo real, é necessário controlar o envio de mensagens dos nodos, para estabelecer-se uma solução de compromisso entre maximizar a qualidade da informação obtida e, simultaneamente, maximizar a eficiência da rede.
- vii) O controle de envio de mensagens precisa ser feito sem intervenção humana, apenas através de auto-ajustes de parâmetros efetuados pela própria rede.

Considerando essas sete premissas iniciais, a principal questão levantada e que foi estudada nesta dissertação foi:

- Neste tipo de rede é possível obter-se características de auto-organização (comunicação autonômica) através de técnicas de algoritmo genético?

Diversos experimentos foram efetuados sobre o modelo empregando técnicas com propriedades autonômicas de auto-configuração. Os resultados obtidos deram origem aos dados apresentados nesta dissertação, e que serviram de base para alguns artigos publicados no decorrer deste trabalho [4][29][38].

Os Capítulos 4 e 5 apresentam com detalhes o modelo desenvolvido e os resultados obtidos, respectivamente. No Capítulo 6, por fim, têm-se as considerações finais sobre todo o trabalho.

2 Rede de Sensores Sem Fio e Fusão de Dados

2.1 Introdução

O avanço tecnológico nas mais diversas áreas, como na comunicação sem fio e na microeletrônica – micro-processadores, novos materiais de sensoriamento, microsistemas eletro-mecânicos (MEMS¹ – *Micro Electro-Mechanical Systems*) –, tem possibilitado o desenvolvimento de dispositivos cada vez menores, que possuem baixo custo, consomem pouca energia e se comunicam a pequenas distâncias [5][10]. O desenvolvimento de nodos sensores é um exemplo desta evolução, e uma RSSF é uma consequência.

Estudos têm sido desenvolvidos para o desenvolvimento de suportes a redes de sensores sem fio, pela comunidade científica. Apesar da diversidade de pesquisas nos mais variados segmentos, um objetivo em comum é o consumo racional de energia e, conseqüentemente, o aumento do tempo de vida das redes. Protocolos padronizados de rede estão sendo propostos sempre levando em consideração a questão energética. Um exemplo é o IEEE 802.15.4 [53] Um problema que acompanha estas redes é que elas são voltadas à aplicação, o que acaba ocasionando o desenvolvimento de suportes de hardware e software, específicos para cada aplicação a qual se deseja fazer uso de sensores sem fio.

Os desafios de pesquisa nessa área são os mais diversos. Mesmo com o desenvolvimento de novas fontes de energia existe uma incansável busca de mecanismos que tentam prolongar o tempo de vida de cada nodo sensor e, conseqüentemente, da rede como um todo.

Este capítulo busca fornecer uma visão geral sobre as redes de sensores sem fio, seus conceitos básicos, suas principais características e desafios. Na seqüência, são apresentadas as principais características de redes *ad-hoc*, já que uma RSSF pode ser considerada como uma instância deste tipo de rede.

2.2 Redes Ad-hoc

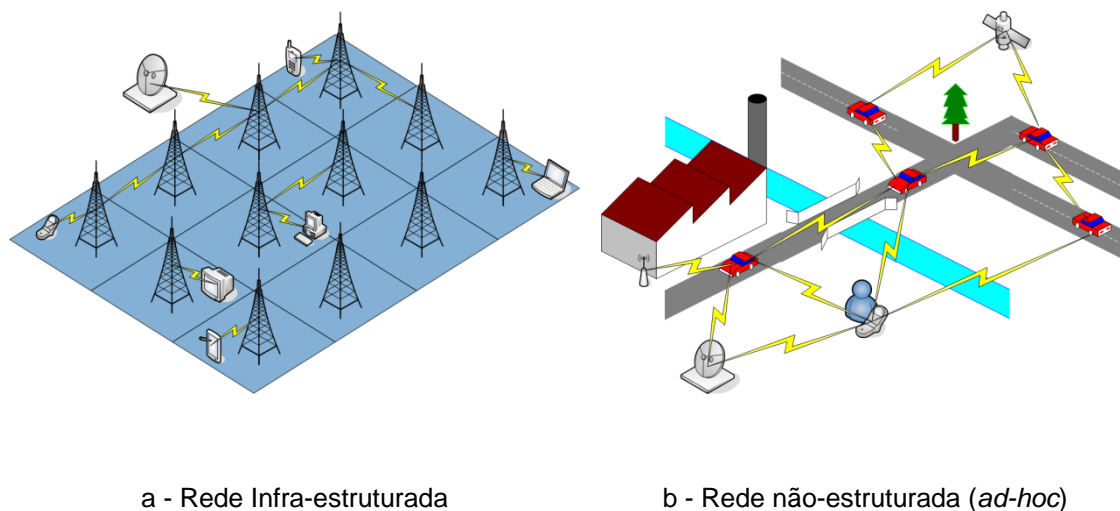
Uma rede *ad-hoc* é aquela na qual todos os nodos funcionam como uma espécie de roteador, encaminhando de forma comunitária as mensagens/pacotes advindas de nodos vizinhos [32]. Essas redes possibilitam com que seus nodos se comuniquem diretamente entre si usando a comunicação sem fio, sem a necessidade de uma infra-estrutura fixa, como uma estação base. Esta é a característica que mais diferencia as redes *ad-hoc* com

¹ É a integração de elementos mecânicos, sensores, atuadores e eletrônico em um substrato único de silício através da tecnologia de micro-fabricação [8].

relação às redes tradicionais sem fio [8]. Nessas últimas – exemplificadas pelas redes de telefonia celular e LAN sem fio – cada nodo se comunica por intermédio de uma estação base.

A diferença entre as redes sem fio tradicionais (estruturadas) e as redes *ad-hoc* (ou não estruturadas) pode ser visualizada através da Figura 2.1. Uma rede estruturada (Figura 2.1a) faz uso de estações base que possibilitam a comunicação entre os nodos. A Figura 2.1b mostra uma rede não estruturada, onde a comunicação é feita diretamente entre os nodos.

Espera-se que em alguns anos as redes *ad-hoc* venham revolucionar a comunicação sem fio, através da complementação dos paradigmas de redes tradicionais [27]. Pelo uso de vários dispositivos móveis – telefones celulares, PDAs, *laptops*, *paggers* e outros – equipamentos fixos, estações base, pontos de acesso de Internet sem fio e outros, os quais podem ser interconectados, formando uma espécie de rede global.



a - Rede Infra-estruturada

b - Rede não-estruturada (*ad-hoc*)

Figura 2.1 – Tipos de rede de comunicação de dados.

As redes *ad-hoc* são caracterizadas segundo três características básicas que as definem. Essas características são relacionadas à heterogeneidade, à mobilidade e à dispersão dessas redes (Tabela 2.1).

Aplicações para redes *ad-hoc* destinam-se a situações onde o uso de uma rede estruturada não seja possível, ou onde a implantação desse tipo de rede seja dispendiosa, ou, simplesmente, quando ocorra a necessidade de uma rede dinâmica que mude freqüentemente devido à entrada e saída de seus nodos [27].

Tabela 2.1 – Características típicas das redes *ad-hoc*.

Característica	Descrição
Rede heterogênea	Uma rede <i>ad-hoc</i> usualmente é composta por dispositivos heterogêneos. Os dispositivos podem ser os mais variados possíveis, tais como PDAs e <i>paggers</i> . Cada nodo da rede pode executar uma atividade diferente de acordo com a necessidade do usuário, mas todos os dispositivos estão estabelecendo algum tipo de comunicação entre si.
Mobilidade	Em uma rede <i>ad-hoc</i> os nodos tendem a ser móveis. Um exemplo de aplicação seria o de clientes móveis que podem receber informações de cotações de moeda ou de promoções ao passar em frente de estabelecimentos comerciais.
Rede relativamente dispersa	A adoção do paradigma <i>ad-hoc</i> é justificado quando a rede está geograficamente dispersa ou quando há a necessidade de estabelecer comunicação com dispositivos que entram e saem aleatoriamente da rede. Este tipo de rede usualmente apresenta uma topologia dinâmica.

2.3 Rede de Sensores Sem Fio – RSSF

A literatura define as RSSFs como um tipo de rede *ad-hoc*, pela sua característica de possibilitar a troca de informações diretamente entre os nodos da rede. As redes *ad-hoc* formam um sistema distribuído complexo que pode se auto-organizar livre e dinamicamente, de forma arbitrária, dentro de uma topologia de rede temporária e dinâmica. Não há necessidade de uma infra-estrutura previamente existente para que a comunicação ocorra [18], sendo este um fator chave deste novo paradigma [26][27][28].

De forma genérica, uma RSSF é um conjunto de dispositivos, cujo objetivo é capturar dados do mundo físico e transformá-los em dados no mundo virtual para que sejam tratados, e possibilitar a tomada de decisão em relação ao fenômeno que se está monitorando. Uma RSSF usualmente tem como objetivos, determinar o valor de alguma grandeza em local específico, detectar a ocorrência de eventos de interesse, estimar valores de parâmetros em função do evento detectado, classificar um objeto detectado, ou rastrear um objeto. Os dispositivos que compõem a rede formam a interface entre os dois mundos: real e digital.

Os nodos sensores que compõem uma RSSF possuem capacidades limitadas de processamento, armazenamento, comunicação (largura de banda) e fonte de energia.

Podem ser equipados com sensores acústicos, sísmicos, infravermelho, vídeo-câmera, calor, temperatura, pressão e outros [17]. Quanto a sua organização, podem formar *clusters*, onde pelo menos um dos sensores pode ser capaz de detectar um evento na região em que se encontra. Esses dispositivos possuem uma capacidade de processamento e de monitoramento considerável quando são utilizados em conjunto com outros nodos sensores, mas não individualmente. Portanto, para que se obtenha um resultado satisfatório, deve-se utilizar certa quantidade de nodos sensores com o intuito de combinar suas leituras em torno do fenômeno físico que se deseja monitorar [1]. A combinação de nodos sensores possibilita também aumentar a confiabilidade da rede.

Outras características e requisitos básicos de uma RSSF são descritas em [25]:

- Necessidade de se auto-organizar.
- Comunicação com difusão de curto alcance e roteamento com múltiplos saltos (*multihop*).
- Esforço cooperativo de nodos sensores.
- Mudança freqüente de topologia devido à perda de energia e falha nos nodos.
- Limitação da energia, potência de transmissão, memória e poder computacional.

Além de algumas das características que são herdadas das redes *ad-hoc*, as RSSF herdam, também, os problemas provenientes das redes sem fio em geral. Estação exposta e estação escondida são apenas alguns dos problemas enfrentados por este tipo de rede e que influenciam bastante em um dos principais fatores de estudos, o consumo de energia. Segundo [18], este é o maior problema enfrentado pelas redes de sensores sem fio. O motivo de caracterizar a fonte de energia como um dos principais problemas origina da necessidade de monitorar ambientes de difícil acesso, que impossibilitam a substituição da fonte de energia. O que ocasiona na necessidade de aumentar o tempo de vida da rede.

As RSSFs formam um novo paradigma, onde o ser humano passa a poder monitorar ambientes onde uma rede de sensores cabeada não seria viável, além de ambientes hostis, onde a presença de seres humanos torna-se impossível. Em [19] as RSSFs são definidas como o mecanismo que faltava para a interação do mundo virtual com o mundo físico. A razão para se usar RSSF vem do seu baixo custo, por nodo sensor, cuja projeção feita pela indústria eletrônica é de que esses dispositivos custem no máximo 1 dólar norte-americano em um futuro próximo [18].

Considerando a principal característica – necessidade de uso racional das fontes de energia –, os protocolos utilizados nas redes *ad-hoc* não se tornam atraentes para uma RSSF. Há a necessidade de desenvolver protocolos que visem diminuir o consumo de energia, e assim, prolongar o tempo de vida da rede. Um protocolo adequado para monitorar um determinado tipo de aplicação pode não ser adequado para outro tipo de aplicação.

Existem diversos outros desafios de pesquisa que necessitam ser explorados, para obter uma melhora considerável neste paradigma de rede. Com relação às características de

tempo real, por exemplo, existem alguns poucos protocolos que foram propostos com o intuito de atender às questões de restrição temporais em uma rede de sensores: o protocolo RAP [43] e o SPEED [40].

Esta dissertação apresenta uma abordagem de comunicação autônoma para RSSF densas e homogêneas, usando algoritmo genético e classificador. A abordagem objetiva atender alguns pré-requisitos básicos destas redes como: a necessidade de auto-gerenciamento, redução da perda de mensagens, aumento da eficiência da rede, melhorar a quantidade de dados recebidos e, como consequência, o resultado final do algoritmo de fusão.

2.3.1 Aplicações

As aplicações de uma RSSF são as mais diversas possíveis, no campo militar, na área médica, monitoramento ambiental, segurança, monitoramento de máquinas industriais, monitoramento de veículos, dentre outros. Algumas destas áreas de aplicação das RSSFs são listadas na Tabela 2.2, as quais são descritas em detalhes em [25].

Tabela 2.2 – Algumas áreas de aplicação para RSSF.

Área	Aplicação
Engenharia	<ul style="list-style-type: none"> • Telemática automotiva. • Sensoriamento e manutenção de plantas industriais. • Segurança comercial e residencial. • Indústria de aviação.
Agricultura e Monitoramento Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura de precisão. • Exploração planetária. • Monitoramento geográfico, água, <i>habitat</i>. • Detecção de desastres.
Engenharia Civil	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento de estruturas. • Planejamento urbano. • Recuperação de desastres.
Militar	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento de posse e gerenciamento. • Inspeção e monitoramento de campos de batalha. • Confrontos urbanos. • Proteção.

Área	Aplicação
Médica	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento de pacientes. • Monitoramento de salas cirúrgicas. • Monitoramento de cobaias.

Com o passar dos anos, a tendência é aumentar a adoção das redes de sensores, devido à necessidade humana de monitorar e coletar dados provenientes do mundo físico. Muitas vezes, em ambientes onde a presença humana torna-se inviável, ou até mesmo quando a implantação de uma rede cabeada torna-se difícil, o uso das redes de sensores sem fio passa a ser um atrativo. Por outro lado, a diminuição de custos, também influencia significativamente o uso das RSSFs. Na indústria de aviação, por exemplo, o uso dessas redes possibilita a redução do peso do avião devido a não necessidade de cabeamento para interligar os nodos sensores.

2.3.2 Características

Apesar das RSSFs serem definidas como um tipo de rede *ad-hoc*, uma RSSF possui características particulares que a diferencia das demais redes. Nas redes *ad-hoc* os dispositivos podem exercer atividades individuais. Cada nodo da rede pode ser autônomo e fazer uso da rede apenas para trafegar seus dados até um dispositivo destinatário. Nas redes de sensores sem fio, por outro lado, usualmente os nodos exercem uma atividade colaborativa, tanto na coleta de informações quanto na propagação destas informações para nodos sensores interessados ou solicitantes.

A abordagem de comunicação herdada das redes móveis *ad-hoc* permite com que os nodos sensores se comuniquem, diretamente entre si, ou através de múltiplos saltos dentro da rede, usando receptores e transmissores sem fio, sem a necessidade de uma infraestrutura de comunicação fixa [20].

A Figura 2.2 ilustra o padrão de comunicação das redes de sensores sem fio. Os nodos desta rede se comunicam, ou podem manter comunicação com redes externas (Internet, por exemplo) através de um *gateway*. Essa comunicação externa permite que computadores servidores possam armazenar os dados coletados. A comunicação também pode ser feita através de satélites, ou os nodos sensores podem encaminhar seus dados para uma estação base (ou *sink*), ou um usuário pode simplesmente conectar seu *Palmtop* ou *Laptop* à rede e solicitar os dados desejados. A interação do usuário com a rede pode ocorrer das mais variadas formas.

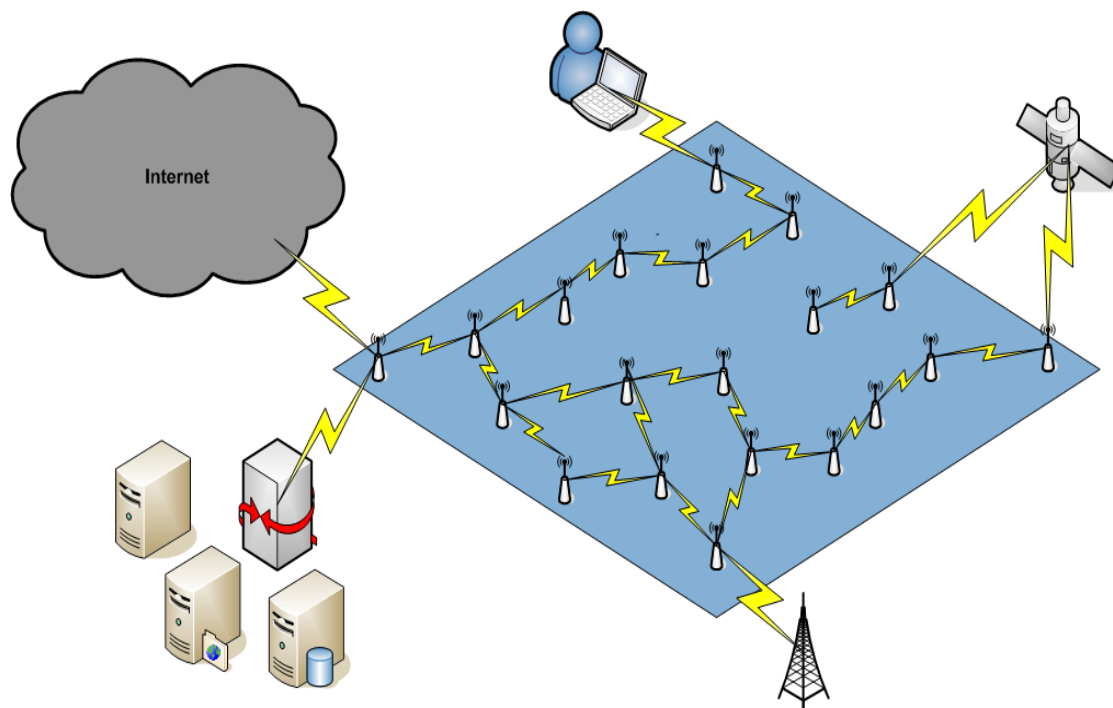


Figura 2.2 – Padrão de comunicação das RSSFs.

A Tabela 2.3 apresenta algumas das características de uma RSSF, em um contexto geral e resumido, e em comparação as redes *ad-hoc* [7][16].

Tabela 2.3 – Características das RSSFs.

Característica	Descrição
Endereçamento	Dependendo da aplicação, os nodos sensores podem ser endereçados unicamente ou não (o que é mais comum), e esses endereços podem ser fixos ou dinâmicos (ver tabela 2.9). Em uma aplicação onde o número de nodos é consideravelmente grande o endereçamento único torna-se inviável, pois o tamanho do endereço pode ser maior que o dado transmitido. Por outro lado, no chão de fábrica o endereçamento único pode ser aplicado devido ao número de nodos ser relativamente menor.
Fusão de dados	É a capacidade que os nodos sensores da rede possuem de reunir os dados coletados. Como consequência tem-se a redução da quantidade e do tamanho das mensagens que trafegam pela rede e, por conseguinte, do consumo de energia nestas redes.

Característica	Descrição
Mobilidade	Os nodos sensores podem ser móveis ou estacionários.
Restrições Temporais	Diz respeito aos dados coletados. Os dados coletados de um determinado local podem ter um tempo máximo (validade temporal) necessário para chegar ao nodo destinatário.
Densidade	As redes com o maior número de nodos são aquelas voltadas para aplicações ambientais. Aplicações voltadas para o chão de fábrica tendem a possuir uma densidade menor.
Auto-organização	É a característica que permite com que as RSSFs se organizem quando necessário. Nodos podem entrar e sair da rede devido à falta de energia, mobilidade, ou ao escalonamento de sensoriamento e transmissão. Por isso, uma RSSF deve se auto-organizar, pois geralmente a organização manual não é possível em algumas aplicações.
Colaboração	As RSSFs executam tarefas colaborativas. O objetivo é executar e estimar eventos de interesse, e em virtude das limitações presentes nos nodos e nas redes de sensores como um todo, os dados são fundidos ou agregados nos sensores para diminuir a quantidade de mensagens na rede.
Energia	A limitação de energia é um ponto crucial a ser discutido. Nodos podem ser simplesmente jogados em uma região de difícil acesso, ou submetido a uma aplicação onde a substituição da fonte de energia simplesmente torna-se impossível. Portanto, este é um ponto, onde os pesquisadores estão concentrando suas atenções, visando prolongar a vida útil da rede.

As características de Fusão, Restrições Temporais, Colaboração e Energia, conforme apresentados na Tabela 2.3, são consideradas particulares das redes de sensores sem fio, provenientes da aplicação alvo este tipo de rede. Há questões de projeto que também devem ser levadas em consideração e que influenciam no projeto de uma RSSF voltada para uma determinada aplicação: tolerância a faltas, escalabilidade e custo de produção. Esses fatores são importantes, pois servem como um guia para se projetar protocolos ou algoritmos para rede de sensores [5].

- **Tolerância a faltas:** Em uma rede, os nodos sensores podem falhar em virtude da falta de energia. Ou como são implantados em ambientes hostil, os nodos podem vir a ser destruídos fisicamente de alguma forma, além de sofrer interferências ambientais que impossibilite a troca de mensagens momentânea ou definitivamente

entre os nodos sensores. Tolerância a faltas é a habilidade de se manter as funcionalidades de uma rede de sensores sem qualquer interrupção [11][22].

- **Escalabilidade:** O número de nodos sensores dispostos em uma dada região pode variar desde dezenas até milhares [23]. A escalabilidade está diretamente ligada à densidade da rede. Esta rede pode aumentar a sua densidade ou diminuir com relação à quantidade de sensores inicialmente implantados, e deve ser capaz de se adaptar a esta nova densidade de forma com que a rede se mantenha operante. Em [24] é descrita uma fórmula para se calcular a densidade de uma região
- **Custo de Produção:** O custo de produção de um único nodo sensor é importante para se determinar o custo total da rede, designada para uma determinada aplicação. Se o custo total de implantação de uma RSSFs for muito alto com relação a uma rede tradicional, pode não haver justificativas para o seu uso.

A Figura 2.3 ilustra a arquitetura física de um nodo sensor, definindo os quatro componentes básicos que formam um nodo, os quais são: Unidade de Sensoriamento, Unidade de processamento, Unidade de Comunicação e Unidade de Energia [6].

- A **unidade de sensoriamento** é composta basicamente por duas sub-unidades: os sensores e o conversor A/D (analógico-digital). Este último possibilita converter os sinais analógicos, captados pelos sensores, para o formato digital, para poder ser encaminhados a unidade de processamento.

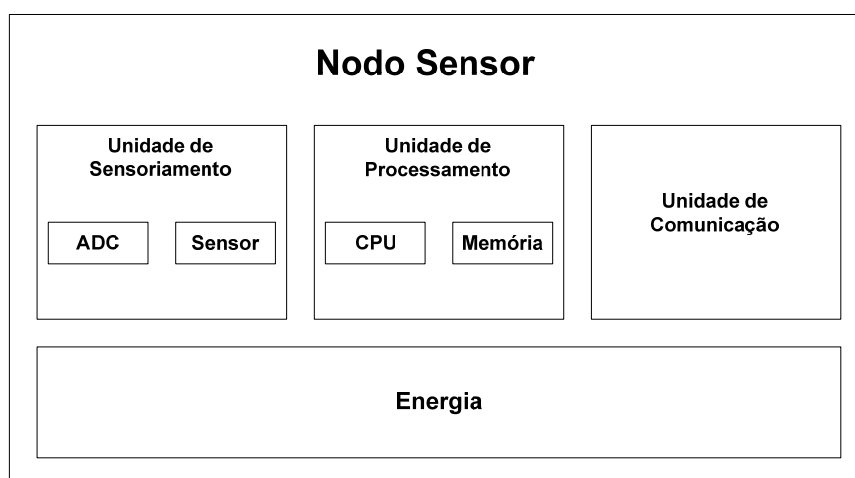


Figura 2.3 – Arquitetura do nodo sensor.

- A **unidade de processamento** é formada por duas sub-unidades: CPU e memória. A unidade de processamento é utilizada para processar os sinais digitais provenientes do conversor A/D, implementação das camadas dos protocolos de comunicação e para o armazenamento de dados.
- A **unidade de comunicação** é a responsável por permitir com que o nodo se conecte a rede, através da formação do enlace, que é definida pelo sensor utilizado, que pode ser de infra-vermelho, acústico, sísmico, etc.

- A **unidade de energia** é formada pela bateria do sensor, a questão mais delicada desta arquitetura. Park *et al.* [34] descrevem três tipos diferentes de baterias, além dos aspectos de comportamento das baterias reais que afetam a eficiência de energia das RSSFs.

2.3.3 Classificação

Baseado nas características apresentadas, uma RSSF pode ser classificada segundo sua configuração, sensoriamento, o tipo de comunicação utilizado, o tipo de processamento que executa, endereçamento e conectividade [7][21].

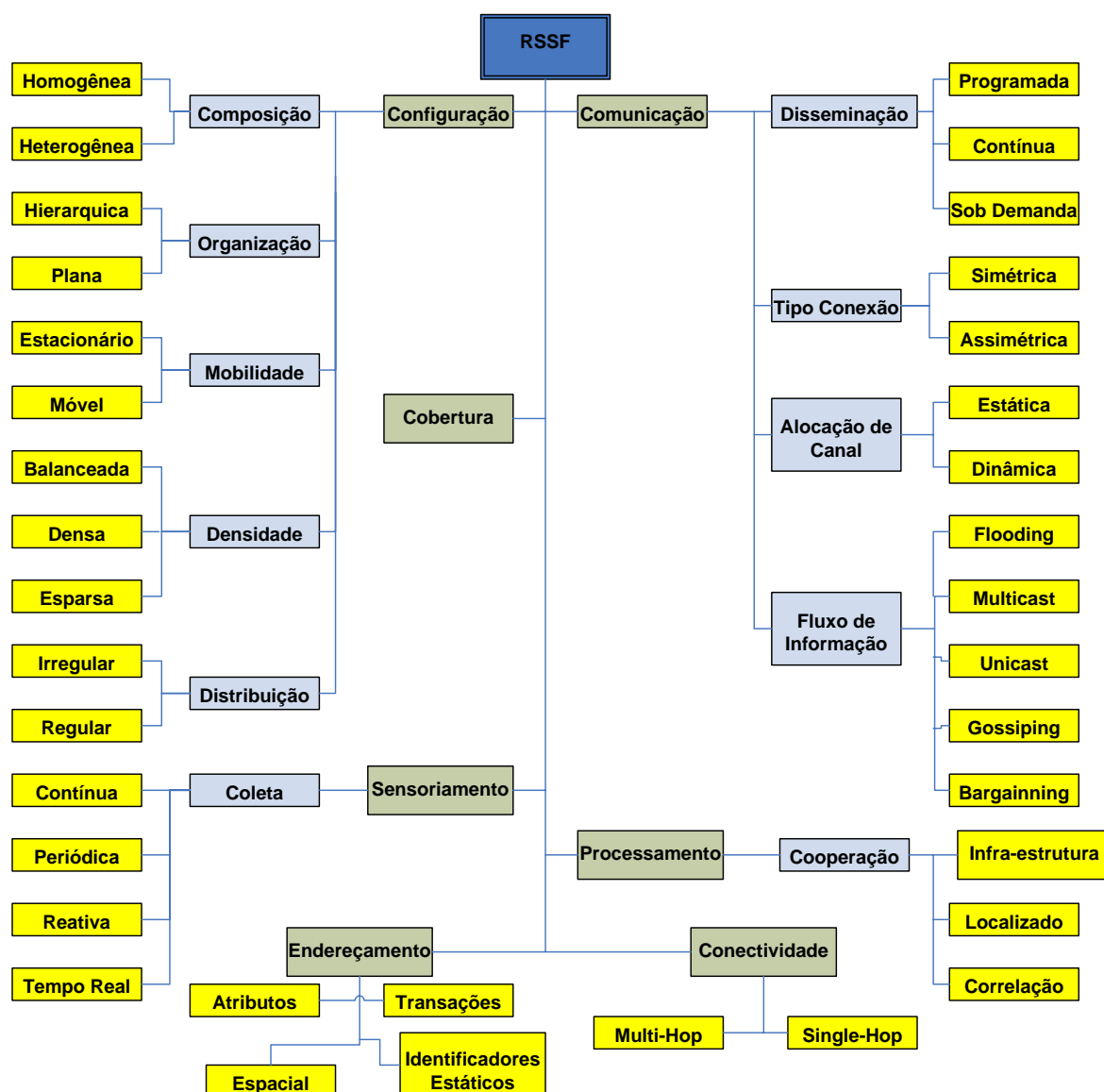


Figura 2.4 – Diferentes taxonomias para uma RSSF.

As Tabelas 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 descrevem essas classificações e a Figura 2.4 ilustra, em forma de árvore, a organização das classificações e características dessas redes.

Tabela 2.4 - Classificação das redes de sensores sem fio segundo a sua configuração [8].

Composição	<p><u>Homogênea</u>: Os nodos sensores apresentam as mesmas características de hardware. Porém podem, ou não, executar softwares diferentes.</p> <p><u>Heterogênea</u>: Os nodos sensores apresentam diferentes características de hardware.</p>
Organização	<p><u>Hierárquica</u>: Os nodos estão organizados em grupos (<i>clusters</i>). Cada grupo terá um líder (<i>cluster head</i>) que poderá ser eleito pelos nodos comuns. Os grupos podem organizar hierarquias entre si.</p> <p><u>Plana</u>: Rede formada pelos sensores, não existindo um contexto hierárquico neste tipo de organização.</p>
Mobilidade	<p><u>Estacionária</u>: Durante todo o tempo de vida da rede os nodos sensores permanecem no local onde foram depositados.</p> <p><u>Móvel</u>: Os nodos sensores podem ser deslocados do local onde inicialmente foram depositados.</p>
Densidade	<p><u>Balanceda</u>: Rede que apresenta uma concentração e distribuição de nodos por área, considerada ideal segundo o objetivo da rede.</p> <p><u>Densa</u>: Rede que apresenta uma alta concentração de nodos em uma determinada área.</p> <p><u>Esparsa</u>: Rede que apresenta uma baixa concentração de nodos por área.</p>
Distribuição	<p><u>Irregular</u>: Rede que apresenta uma distribuição não uniforme dos nodos na área monitorada.</p> <p><u>Regular</u>: Rede que apresenta uma distribuição uniforme de nodos sobre a área monitorada.</p>

A fase de configuração ocorre quando, por exemplo, os sensores são simplesmente jogados na área de interesse, os mesmos precisam se auto-organizar e formar a estrutura da rede para se comunicarem. Esta auto-organização ocorre através de métricas que permitem estabelecer conexão com sensores vizinhos, através de algoritmos que permitem essa troca de informações.

Tabela 2.5 – Classificação das redes de sensores sem fio segundo o sensoriamento[8].

Periódica	Os nodos sensores coletam dados sobre o fenômeno em intervalos regulares.
Contínua	Os nodos sensores coletam os dados sobre o fenômeno de forma contínua.
Reativa	Os nodos sensores coletam dados quando ocorrem eventos de interesse ou quando solicitado pela estação base.
Tempo real	Os nodos sensores coletam a maior quantidade de dados possível dentro de um intervalo de tempo especificado. Neste tipo de coleta, a questão de frescor dos dados se faz necessária para alguns tipos de aplicações.

A fase de sensoriamento está intimamente relacionada com a percepção do ambiente monitorado e coleta dos dados, a qual pode ser de forma distribuída, onde os sensores tendem a colaborar entre si para exercer a atividade de monitoramento.

Tabela 2.6 – Classificação das Redes de Sensores sem Fio segundo a comunicação [8].

Disseminação	<p><u>Programada</u>: Os nodos disseminam dados em intervalos regulares de tempo.</p> <p><u>Contínua</u>: Os nodos disseminam os dados continuamente.</p> <p><u>Sob demanda</u>: Os nodos disseminam os dados em resposta à consulta do observador e à ocorrência de eventos.</p>
Tipo Conexão	<p><u>Simétrica</u>: Todas as conexões existentes entre os nodos sensores, com exceção do nodo estação base, têm o mesmo alcance.</p> <p><u>Assimétrica</u>: As conexões entre os nodos comuns têm alcance diferente.</p>
Alocação de Canal	<p><u>Estática</u>: Em tempo de configuração, a largura de banda é dividida entre as partes. A cada nodo é atribuída uma parte privada da comunicação, minimizando a interferência entre nodos.</p> <p><u>Dinâmica</u>: Não existe atribuição fixa de largura de banda. Os nodos disputam dinamicamente o canal para comunicação dos dados.</p>

Fluxo de Informação	<p><u>Flooding</u>: Os nodos sensores fazem difusão de suas informações para seus vizinhos que, por sua vez, fazem difusão desses dados para os outros até alcançar o ponto de acesso, Esta abordagem possui alto <i>overhead</i>, mas está imune as mudanças dinâmicas de topologia e alguns ataques de impedimento de serviços (DoS – <i>Denial of Service</i>).</p> <p><u>Multicast</u>: Os nodos formam grupos e usam o <i>multicast</i> para comunicação entre membros do grupo.</p> <p><u>Unicast</u>: Os nodos sensores podem se comunicar diretamente com o ponto de acesso usando protocolos de roteamento multi-saltos.</p> <p><u>Gossiping</u>: Cada nodo seleciona os nodos para os quais enviam os dados.</p> <p><u>Bargaining</u>: Os nodos enviam os dados somente se o nodo destino manifestar interesse, isto é, existe um processo de negociação.</p> <p><u>Broadcasting</u>: Os nodos difundem sua informação na rede para todos os nodos escutarem inclusive o destinatário, não há técnica de roteamento empregada.</p>
----------------------------	--

A fase de comunicação está relacionada com a troca de informações entre sensores. O envio de informações é o maior consumidor da fonte de energia [33], por isso faz-se necessário criar métodos de alocação de canal e de como os dados serão propagados pela rede, dentre outros, de forma que a rede se adapte à aplicação desejada, levando em consideração o consumo de energia.

Tabela 2.7 – Classificação das redes de sensores sem fio segundo o processamento [8].

Cooperação	<p><u>Infra-estruturada</u>: Os nodos sensores executam procedimentos relacionados à infra-estrutura, da rede como, por exemplo, algoritmos de controle de acesso ao meio, roteamento, eleição de líderes, descoberta de localização e criptografia.</p> <p><u>Localizada</u>: Os nodos sensores executam, além dos procedimentos de infra-estrutura, algum tipo de processamento local básico como, por exemplo, tradução dos dados coletados pelos sensores baseada na calibração.</p> <p><u>Correlação</u>: Os nodos estão envolvidos em procedimentos de correlação de dados como fusão, supressão seletiva, contagem, compressão, multi-resolução.</p>
-------------------	---

Além das classificações apresentadas nas Tabelas 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7, citadas em [21] e [8], existem outros dois tipos de classificações que dizem respeito à cobertura e à conectividade da rede e que são apresentadas na Tabela 2.8.

A cobertura consiste na habilidade da rede em detectar e observar um elemento na área de monitoramento. A conectividade consiste em definir para cada um dos nodos sensores um caminho de menor custo até um dos nodos estação base [2].

Tabela 2.8 – Classificação segundo a conectividade.

Conectividade	<u>Único salto</u> [2]: A informação trafega do nodo sensor ao nodo estação base com apenas um único salto, sem passar por outros nodos sensores.
	<u>Multi-salto</u> [2]: A informação trafega do nodo sensor ao nodo estação base, sendo roteado por outros nodos sensores.

Em [25] é apresentada uma classificação segundo o endereçamento das redes de sensores, que pode ser: endereçamento espacial, baseado em atributos ou de transações. O endereçamento tem o propósito de provimento de informações topológicas para auxiliar na procura por rotas. No entanto, quanto maior o número de sensores em uma determinada rede, o espaço de endereçamento também deverá aumentar. Levando em consideração que cada bit transmitido diminui a vida útil da rede, o endereçamento pode acrescentar na rede um *overhead* significativo, por isso em muitos trabalhos na área de RSSF o uso de endereçamento neste tipo de rede é quase inexistente.

A Tabela 2.9 apresenta os tipos de endereçamentos, que podem ser utilizados nas RSSFs.

Tabela 2.9 – Classificação segundo o endereçamento de rede [25].

Espacial	É um tipo de endereçamento baseado em coordenadas geográficas, que permite com que o sensor tenha o conhecimento de sua localidade, ou de onde esta partindo a informação desejada. Existem algoritmos de roteamento que utilizam deste método para rotar informações, e são conhecidos como algoritmos geográficos. Endereços globais podem ser dados a um sensor individual ou a um grupo de sensores através da sua localização geográfica.
Baseado em atributos	A nomeação baseada em atributos se diferencia da nomeação espacial, que leva em consideração a região geográfica dos nodos para endereçá-los. Enquanto que a nomeação baseada em atributos baseia-se em atributos externos à topologia e relevantes para a aplicação.
Transações	A nomeação em transações é bem diferente das demais, devido às características das nomeações anteriores assumirem apenas endereços estáticos. Em cada nova transação serão utilizados identificadores diferentes.

Identificadores Estáticos	Esta técnica de endereçamento faz uso de uma nomeação estática, estabelecida em tempo de configuração dos nodos sensores. Não há mudança dos identificadores a cada transação. Uma vez assumido um identificador, este permanece até o nodo ter sua fonte de energia esgotada.
----------------------------------	--

2.3.4 Arquitetura de Comunicação

O estudo referente à arquitetura de comunicação pode ser feito através das camadas da pilha de protocolos, segundo modelo OSI. Protocolos específicos têm sido desenvolvidos com o intuito de adequar às necessidades e limitações das RSSFs [8].

Camada Física

Esta camada é responsável pela seleção e geração de frequência para transmissão, detecção de sinal, modulação, e codificação de dados. Sua constituição pode ser de várias formas como: transmissão por rádio-frequência, infra-vermelho, sonora entre outras. Para cada aplicação existe uma forma de implementar a camada física que melhor se adapta à aplicação desejada.

O uso de radio-frequência é o mais comum. Os dispositivos utilizados em RSSF utilizam sistemas de rádio que operam na faixa de frequência conhecida como UHF (*Ultra High Frequency*), que podem variar entre 300MHz e 3GHz [30].

Existem problemas que podem afetar a comunicação entre os sensores: atenuação, ruído, absorção atmosférica, e múltiplos caminhos [31]. Toda degradação do sinal pode ocasionar problemas na interpretação dos dados quando o sensor destinatário recebê-lo. O sinal ainda pode sofrer degradação em ambientes internos, onde o sinal colide com obstáculos como paredes e objetos.

Para as redes de sensores sem fio a faixa padrão ISM, é usada. A faixa ISM é uma faixa de frequência aberta destinada à, aplicações industriais, médicas e científica, podendo mudar de acordo com cada país ou continente e não necessita de licença para ser usada. No Brasil, por exemplo, a faixa de operação da banda ISM é de 2.4GHz.

Camada de Enlace

Possui a responsabilidade de prover as seguintes atividades: encapsular os pacotes de dados em quadros, detecção dos quadros de dados, protocolos de controle de acesso ao meio (MAC – *Medium Access Control*), controle de erro, assegurar conexão ponto-a-ponto e ponto-multiponto confiável.

Os protocolos MAC são considerados como os de maior relevância para as redes de sensores, devido a suas influências diretas no consumo da fonte de energia [3][36]. Um protocolo MAC precisa garantir o acesso ao meio, evitando ou detectando colisão, auto-

organizando a rede, criando uma infra-estrutura básica para que sensores possam se comunicar e compartilhar recursos entre si dentro da rede.

Protocolos MAC podem ser classificados em dois tipos: alocação estática ou dinâmica. Os do primeiro tipo são apropriados para o tráfego contínuo de informações, e provêm um atraso limitado. Nos do segundo tipo, cada sensor precisa disputar com outros sensores o direito de enviar uma informação. Para esse tipo de alocação, o atraso máximo torna-se imprevisível. Para as RSSFs é usual empregar-se protocolos MAC baseados em alocação dinâmica de canal, do tipo CSMA/CA. O uso de alocação estática pode limitar o número de sensores na rede uma vez que cada canal de comunicação é ocupado por um nodo sensor.

O protocolo MAC deverá ser capaz de tratar alguns eventos que consomem energia desnecessariamente na rede [3], tais como colisão e *overhearing*. A colisão ocorre quando dois ou mais sensores tentam transmitir simultaneamente uma informação, ocasionando perdas dos pacotes, e consumo de energia devido a retransmissões. O *overhearing* é o uso desnecessário do rádio na escuta ao meio. Isso ocorre quando um determinado sensor recebe pacotes que são destinados a outro sensor da rede. Cada nodo sensor mantém o seu rádio ligado, mesmo quando os dados transmitidos não são destinados a ele. No caso de protocolos baseados em disputas pelo meio, o rádio poderia ser desligado por um período de tempo; e no caso de protocolos baseados em alocação estática, os rádios poderiam ficar desligados por um período de tempo pré-determinado.

Apesar dos protocolos propostos pela comunidade científica (ex. B-MAC, T-MAC, S-MAC e CSMA/CA), ainda existem pontos que necessitam ser analisados, por constituírem em algumas questões de pesquisa ainda em aberto para a camada de enlace. Protocolos MAC precisam ser projetados para as mais diferentes aplicações, e os que já existem precisam ser melhorados para utilizar a fonte de energia de forma mais racional possível.

Camada de Rede

A camada de rede é a responsável pelo roteamento dos dados monitorados dos sensores fonte até a estação base. As técnicas de roteamento destinadas às redes tradicionais não podem ser aplicadas às RSSFs, pois estas últimas têm como principal objetivo estabelecer rotas que aumentem o tempo de vida da rede. Para que este objetivo seja atingido, diversas técnicas são utilizadas pelos protocolos desta camada, como a redução de saltos, a escolha de sensores com maior índice de energia disponível, dentre outros. Além disso, a camada de rede deve permitir a fusão dos dados. A fusão é um método de combinar dados de diversos sensores em um conjunto de informações significantes, eliminando dados desnecessários gerados pelos sensores, diminuindo com isso o número de mensagens trafegando pela rede, *overhead* e o consumo de energia proveniente do envio de mensagens redundantes.

Assim como na camada de enlace, as questões de pesquisa em aberto giram em torno dos protocolos desta camada, que precisam ser aprimorados, ou desenvolvidos novos

protocolos que possibilitem administrar de forma racional e eficaz a mudança de topologia constante e a alta escalabilidade presente nas redes de sensores.

Camada de Transporte

A camada de transporte nem sempre é necessária em RSSF. A retransmissão de mensagens de controle para garantir uma comunicação TCP, por exemplo, não seria interessante para a rede uma vez que haveria um grande gasto energético transmitindo pacotes de controle pela rede. Há um grande desafio para o desenvolvimento de protocolos para esta camada, uma vez que os recursos dos sensores são limitados, principalmente, a capacidade de memória, impossibilitando o sensor armazenar grandes quantidades de informações [5] e o uso de mecanismos de retransmissão de quadros.

Camada de Aplicação

A camada de aplicação é voltada às necessidades do usuário da rede. Os protocolos oferecidos pela camada de aplicação devem fazer com que as demais camadas da pilha de protocolos tornem-se transparentes para a aplicação. Assim como as demais camadas, o desenvolvimento de protocolos para a camada de aplicação deve levar em consideração o consumo de energia.

2.4 Tecnologia ZigBee e o padrão IEEE 802.15.4

O objetivo da tecnologia ZigBee é possibilitar o desenvolvimento de redes que façam uso de baixo consumo de energia. Suas especificações – padronizadas pela ZigBee Alliance¹ – tratam sobre as camadas física, enlace, rede e segurança, e aplicação (Figura 2.5). Para as camadas de enlace (sub-camada MAC – Controle de Acesso ao Meio) e física é adotado o padrão IEEE 802.15.4 [53].

O uso de poucas camadas possibilita diminuir o *overhead* – evitando protocolos que não são importantes para RSSF – e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia da rede.

As especificações do padrão Zigbee [61] subdividem a camada de aplicação em três subcamadas. A subcamada de Suporte à Aplicação é responsável principalmente por encaminhar as mensagens entre os nodos da rede, filtrar mensagens, além de tratar da fragmentação e remontagem de dados. A subcamada Objeto de Dispositivo ZigBee tem como principal responsabilidade definir o papel de cada dispositivo na rede como, por exemplo, o coordenador da rede e os dispositivos finais. Além disso, ela é responsável também por descobrir os dispositivos presentes na rede. A subcamada Framework é o ambiente ao qual os objetos da aplicação são mantidos nos dispositivos Zigbee. Através desta subcamada os aplicativos do usuário trocam informações com as demais camadas para atingir os objetivos necessários.

¹ www.zigbee.org

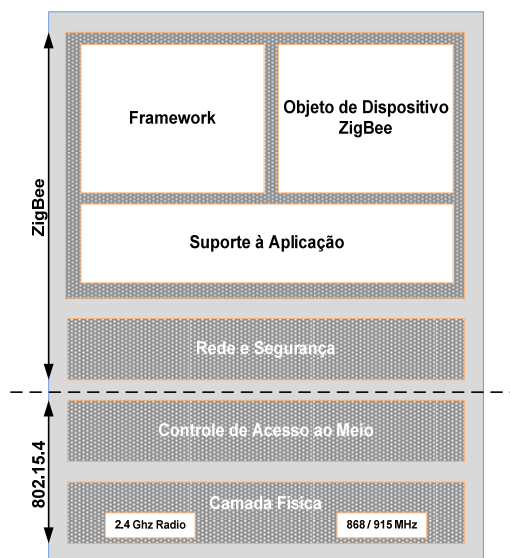


Figura 2.5 – Estrutura da pilha de protocolos definida pela Zigbee Alliance.

A camada de rede é responsável por assegurar o correto funcionamento da camada MAC, além de disponibilizar serviço para a camada de aplicação. Dois serviços são disponíveis por esta camada: o serviço de dados e o serviço de gerência de dados [61]. Sua funcionalidade está diretamente ligada à comunicação da rede, controlando a estrutura da rede – como, por exemplo, a topologia de rede –, cuidando do roteamento e da segurança das mensagens transmitidas. Esta camada suporta três topologias, malha (Figura 2.6c), estrela (Figura 2.6a) e árvore (Figura 2.6b). As topologias em árvore e malha fazem uso de técnicas de roteamento e não serão abordados neste trabalho.

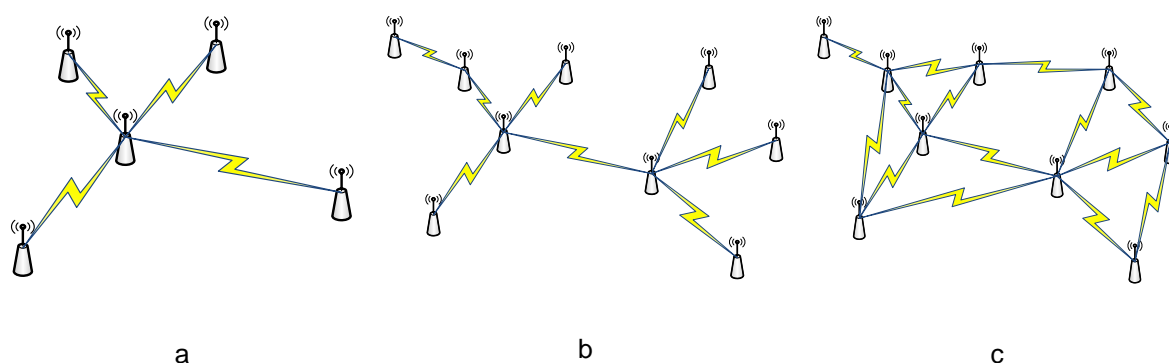


Figura 2.6 – Topologias previstas pelo ZigBee: (a) Estrela, (b) Árvore, (c) Malha.

A camada física e a subcamada MAC são especificadas pelo padrão IEEE 802.15.4 [53]. Este padrão foi desenvolvido para redes de baixa potência pelo órgão de padronização IEEE². A camada física pode operar sob três faixas de frequência. A banda

² <http://www.ieee.org>

ISM³ pode trabalhar com: (i) 16 canais com taxa de 250kbps na banda de 2,4GHz; (ii) 10 canais com taxa de 40kbps na banda 915MHz; ou (iii) 1 canal com taxa de 20kbps na banda 868MHz [76][77].

A subcamada MAC – Controle de Acesso ao Meio – é responsável por controlar o acesso ao canal de rádio, que é compartilhado por outros dispositivos. Esta subcamada tenta evitar colisão de pacotes e realizar a sincronização das transmissões dos quadros. Para esta camada, dois modos de operação são descritos pelo padrão IEEE 802.15.4 [53]: o modo com *beacon* (um modo sinalizado de acesso ao meio) e o modo sem *beacon* (um modo não sinalizado de acesso ao meio). O modo com *beacon* é destinado a dispositivos cujo tempo de resposta é baixo (baixa latência). Seu emprego é justificado quando é necessária a garantia de acesso ao canal de comunicação [76].

Uma *super-frame* é criado, onde as transmissões dos nodos precisam ocorrer em seus *slots*, e os *beacons* são enviados periodicamente com o intuito de sincronizar os nodos. A estrutura do super-frame é mostrada na Figura 2.7. A estrutura inicia e termina com um *beacon*. Entre os *beacons* tem-se uma divisão em 16 intervalos de tempos (*slots*) iguais. Os nove primeiros intervalos (CAP – *Contention Access Period*) podem ser usados por qualquer dispositivo na rede; e os sete intervalos seguintes (GTS – *Guaranteed Time Slot*) podem ser usados por um dispositivo, desde que seja solicitado. Com o uso de *beacons* o CSMA/CA passa a operar com *slots*.

A estrutura sem *beacon* faz uso do CSMA/CA sem *slot*. O nodo verifica se o meio está ocioso antes de iniciar a transmissão, com o intuito de diminuir a probabilidade de colisões. Quando uma colisão é detectada, o nodo aguarda um intervalo de tempo antes de tentar retransmitir seu pacote novamente.

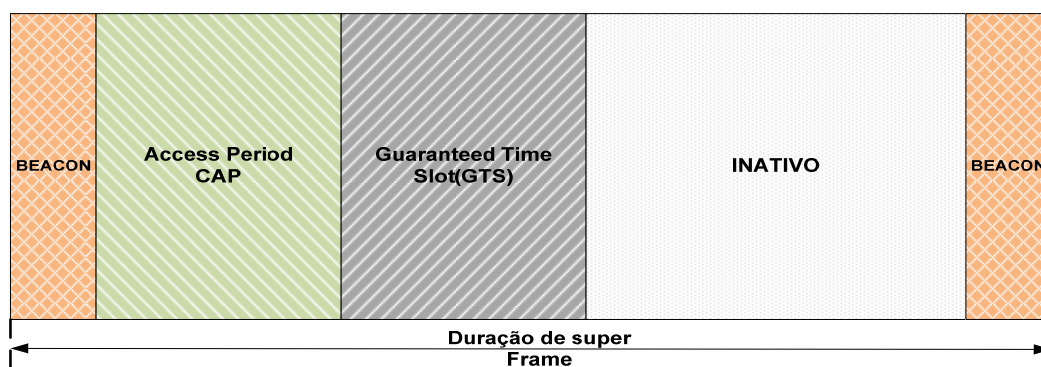


Figura 2.7 – Estrutura do super-frame do IEEE 802.15.4.

A especificação da camada de rede do Zigbee também define três papéis diferentes de dispositivos: coordenador, roteador e dispositivo final.

³ Faixa de banda aberta, não necessita de autorização de órgãos competentes para utilizar estas frequências.

- **Coordenador:** Dispositivo com maior número de funções dentro da rede, comuta dados entre rede e ainda pode formar redes, sendo este a raiz da árvore. Muitos trabalhos denominam este nodo sensor como estação base.
- **Roteador:** Atua como nodo intermediário dentro da rede, encaminhando pacotes de dados.
- **Dispositivo final:** Possui o menor número de funções implementadas. Destina-se ao envio de mensagens a outros nodos, não executando a atividade de roteamento. Por isso, necessita de pouca memória.

2.5 Fusão de Dados

A fusão de dados corresponde a um conjunto de técnicas desenvolvidas, que visa reduzir o consumo energético da rede e prolongar seu tempo de vida eliminando a redundância de mensagens e, conseqüentemente, diminuindo o número de colisões [67].

Outro objetivo da fusão de dados está diretamente relacionado com o reconhecimento de informações mediante um canal ruidoso. O processo de fusão, neste caso, tenta reconhecer a possibilidade de um determinado evento ter ocorrido mesmo que o sinal sofra uma degradação proveniente do meio [70].

Devido à grande aplicação das redes de sensores sem fio e às características limitadas dos dispositivos sensores, o desenvolvimento de técnicas de fusão de dados tem sido de grande necessidade para as mais diversas aplicações deste novo tipo de rede.

Considerando a comunicação entre os nodos sensores da rede, a fusão de dados é realizada em aplicações onde o monitoramento colaborativo [29] é realizado, podendo ser de três tipos: serial [68], paralela [4] e híbrida [68][4][69].

A fusão serial faz uso de técnicas de roteamento, por isso os dados são trafegados pelos sensores da origem até o destino. A fusão pode ocorrer em cada nodo sensor por onde o pacote passa. Os dados são coletados ao longo da rede podendo chegar ao destino já condensado, cabendo ao destinatário apenas tomar a decisão final. Nesta técnica, como pode ser percebido, cada sensor fica com a responsabilidade de receber a leitura proveniente de outro sensor, ler, agregar a sua própria leitura e executar um algoritmo de fusão de dados para encaminhar para o nodo seguinte apenas um único pacote contendo apenas uma única leitura resultante da sua fusão de dados.

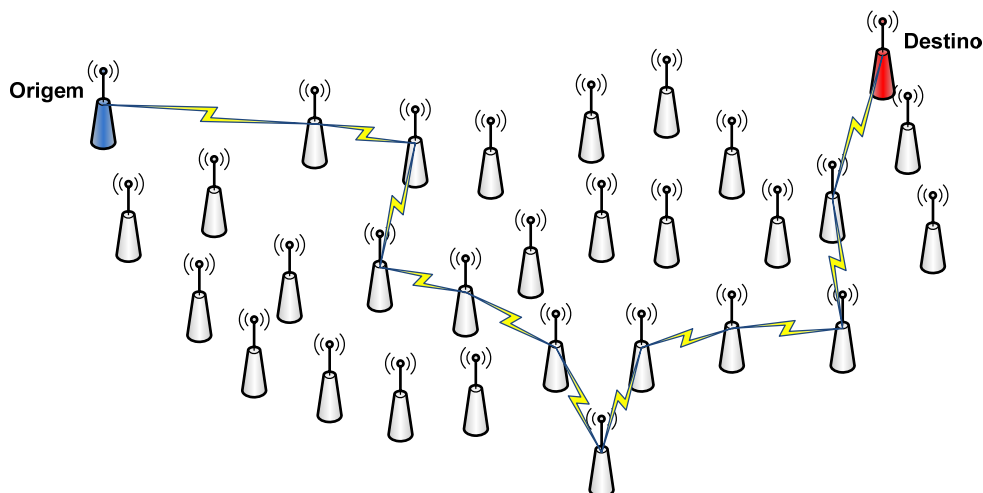


Figura 2.8 – Fusão de dados serial.

Na fusão paralela, todos os sensores processam seus dados independentemente e enviam seus dados coletados diretamente para o nodo destino, o qual se encarrega de fazer a fusão destes dados. Neste caso uma grande quantidade de mensagens pode ocasionar um grande número de colisões no nodo destino, porém esta técnica de fusão possibilita com que apenas um único nodo tenha o poder de processamento necessário para executar a fusão de dados, podendo os demais sensores executarem apenas as atividades de leitura do sinal do ambiente e envio do pacote ao destino e como consequência acabarem apresentando um custo menor.



Figura 2.9 – Fusão de dados paralela.

A fusão híbrida – também denominada de fusão hierárquica ou em árvore – faz uso da fusão serial e da paralela. A sua formação é composta de um grupo de nodos sensores (um *cluster*) o qual possui um líder denominado *cluster head*. A comunicação dentro do grupo de sensores é exercida de forma paralela. Após o *cluster head* receber as mensagens, encaminha os dados coletados dentro do seu grupo para o *cluster head* raiz, o qual será responsável por tomar a decisão final. O processo de fusão de dados ocorre em cada *cluster head*.

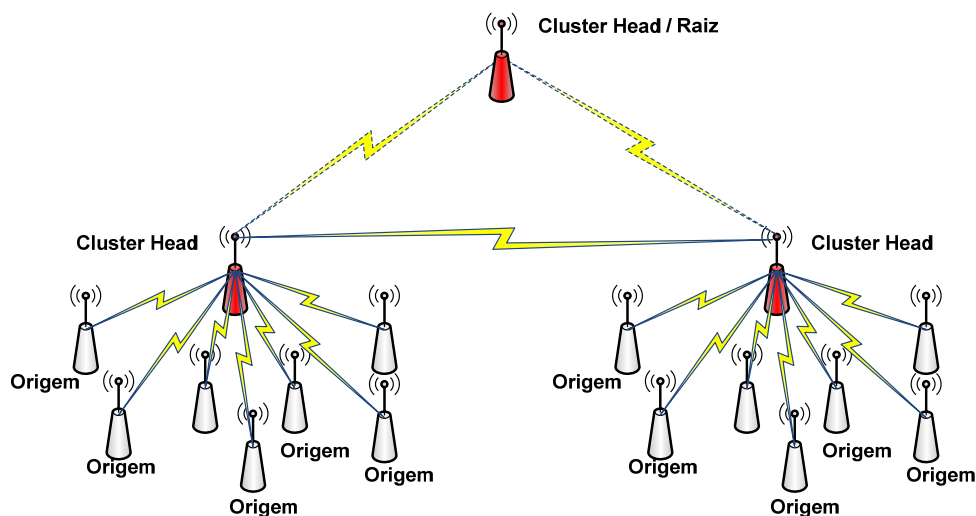


Figura 2.10 – Fusão de dados híbrida.

2.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou algumas importantes características das redes de sensores sem fio. Buscou-se na literatura as principais definições e classificações dessas redes. A tecnologia ZigBee e o padrão 802.15.4 ganharam destaque, graças ao fato que ambos estão se tornando um padrão *de fato* em RSSF. A avaliação da abordagem proposta nesta dissertação adota uma topologia estrela (prevista no IEEE 802.15.4 e formalizada no padrão ZigBee) e um MAC IEEE 802.15.4 sem *beacon*.

Diversos trabalhos estão sendo propostos. Contudo, ainda existem problemas que necessitam ser estudados e resolvidos. Isso ocasiona em uma nova área de pesquisa, com uma grande gama de oportunidades, cujos problemas são considerados, pela literatura científica como desafiantes. Este é o caso do desenvolvimento de abordagens para RSSF com propriedades auto-gerenciáveis. Esse tema é tratado na próxima seção.

3 Comunicação Autônômica

3.1 Introdução

O termo Computação Autônômica – *Autonomic Computing* – surgiu em meados de outubro de 2001, quando a IBM através do seu Vice Presidente de Pesquisa Sênior, Paul Horn, apresentou uma nova solução para a crise que a cada dia vinha crescendo, em virtude do aumento da complexidade para se tratar os sistemas computacionais, os quais tornavam-se cada vez mais complexos. Uma solução seria criar mecanismos pelos quais as máquinas deveriam ser capazes de se auto-gerenciar [45]. A intenção de Paul Horn ao denominar este novo paradigma de Computação Autônômica foi a de fazer uma analogia com elementos biológicos, em específico, o Sistema Nervoso Central (SNC) humano. Este sistema é capaz de reagir aos mais variados tipos de estímulos, liberando a consciência humana de algumas atividades diárias e vitais para o funcionamento do corpo, como os batimentos cardíacos, designar células para regenerar alguns órgãos no caso desse indivíduo vir a sofrer algum ferimento, dentre outras atividades.

O sistema passa a se auto-gerenciar, enquanto que o gerente assume uma posição de supervisor do sistema. Alguns sistemas que tendem a fazer uso de computação autônômica necessitam de pouco, ou até mesmo de nenhuma intervenção humana para mediar seu funcionamento. Isso depende do sistema e da própria finalidade a qual é submetido.

RSSF é um novo paradigma de rede que em virtude de sua aplicação muitas vezes pode ser inserido em um ambiente inóspito cuja intervenção humana é praticamente impossível. Com isso surge a necessidade das RSSF possuírem características autônômicas para se auto-gerenciar, administrando seus recursos computacionais.

Este capítulo aborda inicialmente as principais características que definem o paradigma de Comunicação Autônômica. A proposta de abordagem desta dissertação traz características comunicação autônômica. Por conseguinte, este capítulo serve como base para a compreensão do resto do trabalho.

3.2 Sistema Nervoso

Paul Horn baseou-se no SNC para descrever o novo paradigma denominado computação autônômica [39][41][43][46][48][47]. A comparação está no fato do sistema nervoso central executar atividades autônomas no corpo humano de forma inconsciente, enquanto que o consciente fica livre para executar outras atividades. Com isso, pode-se dizer que o ser humano não necessita enviar comandos de forma consciente para que órgãos executem suas atividades, ficando isto a cargo do SNC.

O sistema nervoso humano é dividido em dois sub-sistemas. (i) O SNC que é composto pelo encéfalo e a medula espinal, e o (ii) sistema nervoso periférico que é composto por inúmeros nervos que conectam o SNC às extremidades do corpo. Basicamente o sistema nervoso periférico é o responsável por canalizar os sinais até o SNC. O SNC possui as funções integrativas, sensitivas e motoras do corpo humano.

O encéfalo é a parte superior do sistema nervoso e encontra-se dentro da caixa craniana, é o principal responsável pela tomada de decisão. Quando um sinal é captado por algum sensor do sistema nervoso periférico, o mesmo é encaminhado até o SNC que se encarrega de receber a informação, inferir um resultado baseado nos conjuntos de informações, planejar qual órgão deverá ser ativado, e assim executar a atividade desejada [49].

3.3 Comunicação Autônômica

A computação autônômica define sistemas computacionais que são capazes de gerenciar a si próprios com nenhuma ou mínima intervenção humana [42]. Existe um novo paradigma relacionado à computação autônômica que se chama comunicação autônômica. Tanto comunicação autônômica quanto computação autônômica compartilham dos mesmos objetivos e princípios, porém, o foco de atividade é relativamente diferente. Computação autônômica está intimamente ligada a software de aplicação e gerência de recursos computacionais [50], enquanto que a comunicação autônômica é orientada a sistemas distribuídos, serviços e gerência de recursos de rede, e a forma como esses recursos se comunicam [51].

O foco deste trabalho é abordar tanto a comunicação quanto computação autônômica, agregando estes conceitos a RSSFs. No caso de uma RSSF, os dois paradigmas se complementam.

3.3.1 Níveis de autonomicidade

Segundo [41][51][52] existem cinco níveis nos quais um sistema deve passar para chegar a uma solução puramente autônômica, sem a intervenção humana. A Tabela 3.1 apresenta de forma resumida os níveis.

Tabela 3.1 - Níveis de autonomicidade na evolução de um sistema [52].

Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Básico	Gerenciado	Preditivo	Adaptativo	Autônômico
Manual	→			Autônômico

Os níveis apresentados na Tabela 3.1 servem apenas como uma ferramenta para classificar um sistema e analisar sua evolução durante o seu processo de transição rumo à computação autônoma. O sistema, durante o seu período de transição de um nível ao outro, pode simplesmente omitir alguns níveis. As descrições de cada nível são apresentadas a seguir.

- **Nível 1:** O *nível básico* representa o ponto de partida, onde alguns sistemas se encontram na atualidade. É o nível em que não se encontra nenhuma autonomicidade [52]. Cada dispositivo ou equipamento é gerenciado de forma independente de acordo com o seu fabricante. As ferramentas disponíveis tendem a ser locais e específicas para cada plataforma. Os profissionais das respectivas áreas são responsáveis por monitorar, implementar e configurar cada dispositivo ou equipamento do sistema.
- **Nível 2:** O segundo nível ou *nível gerenciado* é marcado pela presença de tecnologias capazes de gerenciar sistemas apenas para coleta de informações. Informações podem ser coletadas de diversos dispositivos diferentes a partir de uma linha de comando disparada em um terminal pelo administrador reduzindo o tempo em que este leva para coletar e filtrar informações, à medida que o sistema vai se tornando cada vez mais complexo. O processo de gerenciamento é documentado e melhorado através do tempo, mas ainda pode ser considerado como manual [52].
- **Nível 3:** No *nível preditivo* os sistemas são capazes de organizar-se, analisar dados, realizar e analisar transações, reconhecer padrões, definir a ótima configuração e fazer recomendações de atividades a serem executadas pelos administradores de sistemas. A partir deste nível o sistema passa a ter grande presença de autonomicidade. O mesmo se limita à análise de problemas e apresentação de possíveis soluções ao administrador. Porém, o sistema ainda não é capaz de tomar decisão baseada nas análises obtidas.
- **Nível 4:** No *nível adaptativo* os componentes do sistema podem automaticamente, tomar decisões e executar ações coerentes, baseando-se nas informações disponíveis e no conhecimento gerado por eles próprios com base no que está ocorrendo no sistema. Este nível é marcado pelo poder de tomada de decisão com base na análise do próprio sistema. Porém ainda possui uma intervenção mínima de seres humanos que ainda são responsáveis por guiar as atividades dos elementos pertencentes ao sistema.
- **Nível 5:** Este nível é o último da cadeia de níveis e, conseqüentemente, o mais avançado de todos por representar um nível puramente *autônomo*. Suas atividades são baseadas em objetivos e políticas de operação que são fornecidas pelos administradores, que assumem uma posição onde sua atividade é de apenas monitorar e/ou alterar os objetivos do sistema. Todos os serviços e recursos passam

a ser automatizadas. O administrador passa apenas a informar para o sistema o que fazer, como fazer fica a cargo da decisão do próprio sistema.

Em uma RSSF o nível 5 pode ser aplicado tanto com relação ao nodo sensor quanto com relação à rede (computação autonômica e comunicação autonômica, respectivamente). No nível do nodo, por exemplo, pode-se possuir características autonômicas, decidindo quando enviar uma mensagem. No nível da rede, os nodos sensores podem trabalhar de forma colaborativa para melhor atender aos requisitos da rede como um todo.

Como exemplo, um nodo sensor pode estar com a sua energia baixa e enviar uma mensagem informando o seu nível de energia aos outros nodos que estão em sua proximidade. O nodo sensor que recebe essa informação pode decidir se aumenta ou não o seu raio de monitoramento com o intuito de tentar cobrir uma área maior, compensando o nodo que está preste a ficar inativo por falta de energia [47][48]. Um outro ponto importante é a necessidade de eliminar pontos cegos na rede. Uma RSSF Autonômica (AWSN – *Autonomic Wireless Sensor Network*) deveria ter a capacidade de decidir o que é melhor para a rede continuar executando sua atividade e ainda por cima conciliar o consumo de energia com o objetivo estabelecido para a rede de sensores.

3.3.2 Auto-gerenciamento

Existem quatro serviços básicos em um sistema autonômico: auto-configuração, auto-otimização, auto-cura (*self-healing*) e auto-proteção. Estes serviços têm como objetivo assegurar com que as tarefas do sistema sejam realizadas de forma transparente e contínua, necessitando de pouca ou até mesmo de nenhuma intervenção humana. Outros serviços auto-*, também surgem agregados como consequência aos quatro serviços principais básicos. São eles: auto-conhecimento, auto-consciência, auto-aprendizado, auto-diagnóstico, auto-recuperação, auto-organização, auto-serviço, auto-sustento e auto-manutenção.

Todas essas características podem ser combinadas para melhor atender aos objetivos da rede. Uma determinada atividade pode incluir uma ou mais das características acima citadas. Importante notar que muitas dessas características podem aparecer como necessidade em uma dada aplicação, já em outra pode não haver necessidade.

Auto-Configuração

Sistemas autonômicos devem se configurar ou reconfigurar autonomamente de acordo com as políticas de auto-nível que são repassadas ao sistema a partir de seus administradores. Essas políticas especificam o que é desejado e não como deve ser realizado. Quando um componente de hardware ou software é introduzido, ele se incorpora ao sistema como se ele já estivesse no ambiente anteriormente, e o resto do sistema vai se adaptar à sua presença – muito parecido com uma nova célula no corpo [44].

Em redes de sensores sem fio esta característica faz-se de suma importância devido ao comportamento dinâmico da rede e dos próprios sensores que podem entrar e sair ocasionando uma reconfiguração da topologia da rede quando necessário para determinadas aplicações.

Auto-Otimização

Os sistemas autônômicos devem buscar constantemente modos de melhorar as suas atividades, identificando e analisando oportunidades de se tornarem mais eficientes. Sistemas autônômicos podem aprender a fazer escolhas para sintonizar os seus parâmetros [46]. Tais sistemas deverão ser capazes de efetuar atualização (*upgrade*) de suas próprias funções.

Para as redes de sensores sem fio, os nodos sensores devem ser capazes de avaliar o consumo de energia junto com a qualidade de serviço oferecido, buscando sempre melhorar a rede para economizar energia e aumentar a qualidade de serviço. Portanto, o compromisso de custo-benefício deve ser levado em consideração nas técnicas de auto-otimização. Segundo [83], esta característica é considerada a mais importante para as RSSFs, pois esta se bem desenvolvida pode garantir a longevidade da rede de sensores.

Auto-Cura (Self-healing)

Os sistemas computacionais autônômicos devem descobrir, diagnosticar e reparar problemas que resultem de erros ou falhas de *software* ou *hardware*. Devido aos nodos sensores serem expostos aos mais variados ambientes, que muitas vezes podem danificar um sensor ou até mesmo fazer com que a operação da rede torne-se deficiente, esta característica pode ser considerada importante para diversas aplicações de RSSF.

Auto-Proteção

O sistema deve ser defendido, como um todo, contra ataques maliciosos, problemas de falhas isoladas ou de efeito cascata que permaneçam sem correção pelas técnicas de auto-regeneração. O sistema também poderá ser capaz de prever problemas, baseados nos primeiros relatórios (de *hardware* ou *software*) e deverão tomar medidas para evitá-los ou amenizá-los [44][47].

Proteger os nodos sensores do ambiente externo é uma tarefa complexa. Um exemplo é citado em [83], onde um agente que trafega pela rede coletando informação monitora constantemente o nível de energia dos nodos, buscando evitar o esgotamento de energia do nodo onde este esteja situado.

Auto-Conhecimento

Para realizar o gerenciamento segundo o princípio da computação autônômica, o sistema deve ter o conhecimento dos elementos que o compõe. Alguns trabalhos tentam apresentar uma abordagem para atender esta característica. Este é o caso de [21] que apresenta como

proposta uma arquitetura de gerenciamento para RSSFs que faz uso do auto-conhecimento para a sua atividade.

Auto-Consciência

Cada elemento pertencente ao sistema autônomo deve ter consciência do ambiente que o cerca, além dos próprios recursos disponíveis. Nas RSSFs, a troca de mensagens entre nodos pode ser intensa e em muitas aplicações há o uso de múltiplos-saltos, portanto há uma necessidade de conhecer o ambiente, os vizinhos e os caminhos que os mesmos podem trafegar a mensagem.

Auto-Aprendizado

Uma RSSF deve ter a capacidade de aprender, baseada em experiências e resultados obtidos em ações anteriores. Segundo [46] e [50], técnicas de aprendizado de máquina podem ser aplicadas aos sistemas autônomos. No entanto devem ser cuidadosamente testadas para o contexto desejado. Para RSSFs faz-se necessário o uso de técnicas que necessitem de pouco recurso computacional, o que pode tornar-se um grande desafio.

Auto-Diagnóstico

O principal objetivo do auto-diagnóstico é distinguir os pontos problemáticos dos que estão apenas apresentando problemas eventuais [41]. Dependendo da aplicação, a rede pode diagnosticar se um determinado sensor está fornecendo dados fora do padrão para o sinal monitorado. Isto pode caracterizar uma anomalia no ambiente ou simplesmente um defeito no sensor. Sob o ponto de vista do nodo sensor, este pode diagnosticar possíveis falhas de memória, dispositivos sensores, processador, dentre outros componentes. Com base neste diagnóstico tomar uma decisão, como se desligar da rede ou servir apenas como roteador de mensagens.

Auto-Recuperação

Uma rede com esta propriedade executa atividades de recuperação do sistema automaticamente, assim que diagnosticado e isolado o fator gerador de problemas no sistema [42]. Um exemplo que poderia ilustrar esta característica seria a possibilidade de um nodo sensor diagnosticar uma área de memória defeituosa. O nodo poderia simplesmente isolar esta área de memória impossibilitando com que seja alocado dados sobre ela.

Auto-Organização

Em muitas ocasiões, um sistema necessita organizar e reorganizar seus elementos de forma a manter os enlaces entre os elementos do sistema, objetivando garantir a realização de suas tarefas [40][48]. Em [83] O'Hare dá como exemplo de aplicação para esta característica a construção de grupos e da infra-estrutura de roteamento.

Auto–Manutenção

Os elementos de uma RSSF com esta característica devem ser capazes de ajustar parâmetros e configurações no intuito de alcançar ou manter objetivos pré-determinados. Exemplos para esta característica seriam a manutenção da área de cobertura do sensor, gerenciamento de mobilidade dos sensores, dentre outros.

3.3.3 Elemento autônomo (EA)

Um Elemento Autônomo é uma parte de um sistema que interage com outros Elementos Autônomos para atingir um objetivo em comum. A troca de informações entre eles mantém o sistema em completo funcionamento. Para o seu desenvolvimento, deve-se levar em consideração os objetivos e características específicos de cada aplicação. É este elemento autônomo que possibilita com que os componentes de um sistema possam se comportar de forma autônoma.

Uma arquitetura genérica é apresentada em [42] (Figura 3.1). Sua composição é formada pelo Elemento Gerenciável, a Base de Conhecimento, o processo de execução e a atividade do elemento autônomo. Dentro de uma RSSF o Elemento Autônomo corresponde a cada elemento da rede. Ou seja, cada nodo sensor pode ser considerado um elemento autônomo, e cada componente do nodo sensor pode ser considerado outro elemento autônomo, o que resulta no elemento autônomo nodo sensor, qual é formado por um conjunto de elementos autônomos módulos dos nodos sensores.

Elemento Gerenciável: Corresponde a cada dispositivo da rede ou módulo do nodo sensor. O elemento gerenciável é o componente ou dispositivo – ou o conjunto de componentes e dispositivos – sobre o qual o gerente autônomo está atuando [65]. Para uma RSSF, o nodo sensor pode possuir uma arquitetura de um gerente autônomo implementado internamente e ter os seus demais componentes – como memória, bateria, transmissor, receptor, etc. – sendo gerenciados pelo gerente autônomo, e esse se encarrega de tomar as decisões que melhor convém tanto para a rede quanto para o nodo sensor.

Gerente Autônomo: Cada elemento autônomo possui um gerente autônomo associado. Este é responsável por executar um laço de controle que executa a monitoração, análise dos dados obtidos a partir da fase, de monitoração, planejamento que visa melhorar o funcionamento deste dispositivo e a execução das novas atividades planejadas que são aplicadas ao elemento gerenciado [66].

Monitoramento: Constitui-se na primeira etapa executada pelo gerente autônomo. Executa o acompanhamento do elemento gerenciado através, da coleta de parâmetros internos e externos. A sua implementação pode ser de várias maneiras dependendo do sistema autônomo ao qual pertence. De qualquer forma, as informações são coletadas podendo ser combinadas e armazenadas na base de conhecimento [66].

Análise: É a segunda etapa executada pelo gerente autônomo. Esta possibilita com que os dados monitorados sejam convertidos para informações úteis e que possam ser utilizados para inferir resultados sobre diversos aspectos, como desempenho ou falhas, por exemplo, ligados ao elemento gerenciado [66]. Os dados que são coletados devem ser anexados e comparados aos outros dados previamente obtidos.

Planejamento: É a terceira etapa executada pelo gerente autônomo. Esta possui o objetivo de elaborar ou escolher um plano de ações a serem executadas, mediante o resultado da análise realizada pelo módulo de análise na fase anterior. A ordem de execução, e até mesmo o melhor algoritmo, são determinados nesta fase. O serviço de planejamento é considerado um ponto fundamental para o gerente autônomo, o uso de recursos baseados em aprendizado de máquina, pode resultar em um ótimo comportamento do gerente autônomo. Entretanto, este módulo influencia diretamente na solução proposta para melhorar a atuação do gerente autônomo sobre o elemento gerenciado.

Execução: Constitui-se na quarta etapa executada pelo gerente autônomo. É através deste módulo que o gerente autônomo consegue atuar sobre o elemento executando ações de reconfiguração e reprogramação. A etapa de execução, apenas executa o planejamento fornecido pela etapa anterior e trata das possíveis falhas que podem vir a ocorrer [66]. Não cabe a este módulo julgar se determinada ação é considerada adequada ou não, uma vez que o módulo de planejamento é encarregado de tal atividade.

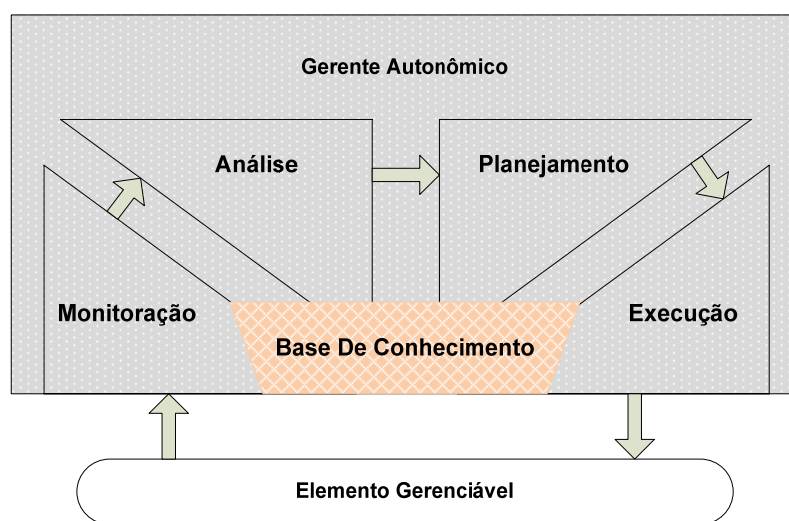


Figura 3.1 - Arquitetura genérica de um Elemento Autônomo.

Base de Conhecimento: É a responsável por armazenar dados, informações, conhecimento, políticas, algoritmos dentre outros. Todas as etapas/módulos do gerente autônomo possuem acesso a base de conhecimento, possibilitando com que o conhecimento esteja em uma base compartilhada, o qual pode ser simplesmente produzido pelo gerente autônomo, passado pelos elementos gerenciados ou o conhecimento pode ser recuperado a partir de serviços de informações externas [42][65][66].

O que se observa na arquitetura genérica do elemento dada na Figura 3.1 é que o gerente autônomo funciona como um laço, sendo alimentado pelos dados obtidos a partir

do elemento sendo gerenciado. Fazendo um paralelo com a Figura 2.3, que apresenta a arquitetura do nodo sensor, cada módulo da figura pode ser um elemento gerenciável, gerenciado por um gerente autônomo, onde cada gerente autônomo é responsável, por um determinado módulo e o correto funcionamento e administração deste módulo gerenciado por ele. Esses elementos autônomos trocam informações entre si para um melhor funcionamento de toda a rede, administrando autonomicamente o nodo sensor e, como consequência, a comunicação entre eles, garantindo assim a comunicação autônoma e a computação autônoma em uma RSSF.

3.4 Algoritmo genético

Na década de 70 surge um novo mecanismo robusto de busca [55] e otimização [12][13][15][56] proposto por John Rolland [63]. Este mecanismo se baseia na seleção natural proposta por Darwin em 1958.

1. Indivíduos da mesma ou de diferentes espécies tendem a disputar de forma contínua por limitados recursos presentes no meio ambiente.
2. Indivíduos considerados mais adaptados tendem a possuir uma melhor chance de sobrevivência e assim perpetuar a sua espécie.
3. A reprodução permite com que estes indivíduos mais adaptados propaguem mais significativamente suas características nas gerações seguintes.
4. O aumento do grau de adaptação da população tende a ser melhorada ao longo do tempo, devido aos cruzamentos entre indivíduos mais adaptados.
5. Considera-se que o processo de evolução ocorre sem falhas, porém os indivíduos estão sujeitos ao processo de mutação. Uma mutação é um fenômeno natural que pode ocorrer em populações de indivíduos a cada cruzamento.

Este novo modelo de algoritmo, denominado algoritmo genético, compreende a representação computacional da teoria de Darwin apresentada nos cinco tópicos acima. John Rolland especificou o comportamento dos algoritmos genéticos, de forma genérica que segue a ordem de execução, abaixo listada.

1. **Início da População:** Em um primeiro instante de tempo, uma população de cromossomos é criada. A criação pode ser (i) randômica uniforme, sendo que cada elemento do cromossomo possua a mesma probabilidade de ser escolhido para compor o cromossomo, ou (ii) randômica não uniforme, onde alguns elementos do cromossomo tendem a ser escolhidos com maior frequência que os demais. A população corresponde às possíveis respostas do sistema.

2. **Avaliação de População:** Os indivíduos da população são avaliados, para que seja analisado o quanto cada indivíduo resulta em um comportamento satisfatório para o sistema. A avaliação é o processo de escolha do cromossomo a ser testado, e é nesta avaliação que se determina o grau de adaptação de determinado cromossomo.
3. **Seleção de Reprodutores:** Indivíduos considerados mais adaptados são escolhidos para a reprodução. A escolha é baseada em técnicas que visam melhorar o tempo de resposta dos algoritmos genéticos [64].
4. **Cruzamento dos Escolhidos:** Os cromossomos escolhidos são recombinados, dando origem a novos indivíduos.
5. **Mutação:** Assume-se que há uma probabilidade muito baixa no sistema de alteração das características dos indivíduos. A mutação provoca uma variação na população.
6. **Atualização de População:** Os novos indivíduos são alocados na população.
7. **Término:** Se o algoritmo atender ao critério de parada, o mesmo é finalizado. Caso contrário, o algoritmo retorna ao item 2 e segue sua execução novamente.

Com isso, atualmente os mais diversos problemas, muitos deles pertencentes à classe de problemas NP-completo [54], receberam proposta de solução baseada em AG's. Tal especificação, dada por Rolland, pode ser implementada das mais diversas formas, objetivando atender as necessidades e atingir os objetivos desejados ao problema ao qual o AG foi destinado. Para qualquer aplicação, deve-se levar em consideração na implementação dos operadores genéticos diversos fatores, tais como a seleção de indivíduos para cruzamento, a forma de cruzamento dos escolhidos e a técnica de mutação, além dos parâmetros genéticos. Estes últimos correspondem, por exemplo, ao tamanho da população inicial, a taxa de cruzamento e a taxa de mutação. Todos esses fatores influenciam no comportamento do AG [14].

O objetivo de Holland era desenvolver uma abordagem teórica que descrevesse procedimentos para desenvolvimento de programas genéricos e máquinas com capacidade ilimitada de adaptação a ambientes arbitrários [12]. O algoritmo abaixo ilustra o comportamento genérico de um AG simples, descrito pelo seu autor.

1. Inicializa população de cromossomos.
2. Avalia população.
3. Seleciona pares para cruzamento.
4. Executa reprodução.
5. Executa mutação.
6. Repõe novos indivíduos à população.

A **população** de cromossomos é formada por cada indivíduo que é criado inicialmente. São estes indivíduos (cromossomos) que se tornam responsáveis por representar cada solução possível para o problema a ser tratado, através da sua manipulação. A representação da população (ou seja, de cada cromossomo) pode se dar de três formas: (i) uma *string* contendo apenas 0's e 1's, formando uma cadeia binária, sendo muito utilizada em uma otimização numérica, (ii) letras do alfabeto, utilizada em problemas como por exemplo do caixeiro viajante e (iii) cadeia de letras e números, podendo ser utilizado, por exemplo, para determinar regras de aprendizado para agentes.

Uma população diversificada possibilita aumentar a área de atuação e, conseqüentemente, o número de respostas possíveis para o sistema. O tamanho de cada cromossomo também influencia, pois cromossomos grandes podem representar uma maior quantidade de informações, porém, isso também depende da aplicação. Em [14] é apresentado uma estudo comparativo entre duas representações para os cromossomos.

Um aspecto importante que diz respeito como a população de cromossomos está relacionada à maneira com que a população evolui a cada geração. Esse aspecto pode ser (i) estado fixo, onde a população assume um tamanho constante durante todo o processo de evolução, (ii) incremental, onde os filhos são gerados e estes passam a assumir a posição escolhida de forma aleatória, e (iii) um modelo de ilhas, o qual representa o modelo utilizado nesta dissertação [57][58].

O modelo de ilhas pode ser descrito em três tipos e são ditos algoritmos genéticos paralelos [57][64] para uso em ambientes paralelos [58][64]. Tais modelos de implementação de AG's são bastante empregados em solução de problemas que exigem um poder computacional relativamente alto a ponto da necessidade de utilizar processamento paralelo (*clusters*) para obtenção do resultado desejado. Cada processador recebe uma população de cromossomos para trabalhar, e o trabalho pode se dar de três formas, conforme descrito abaixo.

1. **Rede** [64]: que é formado pela comunicação entre todas as ilhas, ou seja, todas as ilhas estabelecem comunicação entre si.
2. **Estrela** [64]: a ilha central gerencia as demais ilhas de borda e é a única que se comunica com todas as outras.
3. **Anel** [64]: Nesta topologia uma ilha envia seus melhores indivíduos para a ilha seguinte e recebe os da ilha anterior.

Na abordagem proposta nesta dissertação, será usado o conceito de ilhas. No entanto, não haverá troca e nem comunicação entre as ilhas utilizadas, e todas foram implementadas no mesmo processador não havendo uso de hardware para processamento paralelo.

Sistemas Classificadores

O sistema de classificadores representa um sistema de aprendizado de máquina. Tal sistema é capaz de aprender regras que são denominados de classificadores, cujo objetivo é guiar o desempenho do sistema em um ambiente arbitrário [59][60]. Sua formação segue três componentes principais:

1. **Sistema de regras de mensagens:** É dito um esquema computacional que usa regras como único recurso algorítmico. Como, por exemplo, se determinada condição for satisfeita então aplicar uma ação específica.
2. **Sistema de divisão de créditos:** Funciona como uma espécie de um banco, que cada cromossomo deve pagar uma parcela de sua aptidão a este sistema de divisão de créditos
3. **Algoritmo Genético:** Deve ser executado após a execução dos classificadores. Sua execução é dada de tempos em tempos.

Fogarty define o sistema de classificadores em [62] como um sistema que é formado por um conjunto de regras que, baseado em uma dada entrada, produz uma determinada saída.

Enquanto que o algoritmo genético empregado busca o espaço de possíveis melhores regras, um sistema apenas com os classificadores não possui a capacidade de aprender. O sistema de classificadores apresenta as regras de ação e reação a serem seguidas pelo sistema.

3.5 Considerações finais

O presente capítulo apresentou noções sobre comunicação autônoma e algoritmos genéticos. A idéia deste capítulo não foi esgotar o assunto até mesmo porque cada item aqui abordado constitui uma área de pesquisa muito bem elaborada.

4 Modelo de Fusão de Dados em Tempo Real em Rede de Sensores sem Fio

4.1 Introdução

RSSF usualmente são formadas por nodos sensores dispostos aleatoriamente sobre uma área. A organização lógica da rede, após os nodos serem fisicamente implantados no ambiente, pode se dar de diversas maneiras, empregando técnicas que visam principalmente reduzir o consumo de energia e, conseqüentemente, prolongar o tempo de vida da rede.

Quando a área a ser coberta pelos sensores não é muito vasta, pode-se assumir uma rede onde todos os nodos se alcançam com um único salto (*single-hop*) e, conseqüentemente, cada sensor pode enviar seus dados diretamente para uma estação base sem necessidade de roteamento. Por outro lado, quando a área a ser coberta é ampla, existem diversas abordagens que estruturam a rede em uma organização lógica hierárquica formada por agregados (*clusters*). Dentro de um agregado, todos os nodos alcançam com um único salto um nodo especial – nomeado nodo cabeça (*cluster head*). Este nodo é responsável por receber os dados dos nodos que compõem o agregado, fundi-los ou agregá-los em mensagens, buscando eliminar redundância de mensagens trafegando na rede e, por fim, encaminhá-las para uma estação base.

Este trabalho assume um modelo de uma RSSF, densamente formada, onde os nodos alcançam com um único salto um nodo específico – aqui denominado nodo mestre – responsável por receber mensagens com dados de outros nodos – denominados nodos escravos – e fundir esses dados. O modelo a ser descrito neste capítulo pode representar, portanto, tanto uma rede *single-hop* (neste caso, o nodo mestre é a própria estação base), quanto um agregado denso de uma rede *multi-hop* (neste caso, o nodo mestre é o nodo cabeça). Neste último caso, a forma como a mensagem é posteriormente roteada até a estação base está fora do escopo deste trabalho.

Este trabalho assume uma topologia dinâmica e aleatória, pois com o tempo, alguns nodos da rede podem deixar de funcionar devido a danos e desgastes físicos, ou por ter suas fontes de energias esgotadas. O impacto que uma alta densidade causa na disseminação das mensagens e na qualidade final da fusão de dados são os principais pontos estudados nesta dissertação.

Este capítulo inicialmente fornece uma visão geral do modelo de redes de sensores sem fio e as métricas que serão utilizadas nas avaliações das abordagens propostas. Na seqüência é introduzido o TrueTime – ferramenta utilizada nas simulações –, e descrita a

implementação do modelo neste simulador. O capítulo termina descrevendo as duas principais abordagens que serão trabalhadas no próximo capítulo.

4.2 Visão geral do modelo

O modelo proposto assume uma rede formada por dezenas ou centenas de nodos sensores que encaminham seus dados periodicamente, na forma de mensagens, para um nodo específico, o qual efetua uma fusão paralela de dados, como pode ser visto na Figura 4.1. Todos os nodos da rede são dispostos aleatoriamente no ambiente. Os nodos sensores são denominados, neste trabalho, de sensores escravos. Um nodo especial, denominado mestre, recebe periodicamente os dados provenientes dos sensores escravos e se encarrega de efetuar a fusão de dados. Como este nodo é capaz de efetuar fusão de dados pode se assumir que o nodo mestre pode ser uma estação base, um *laptop*, um *palmtop* ou qualquer outro dispositivo que possua poder computacional suficiente para realizar a fusão de dados, até mesmo outro nodo sensor com maior poder computacional. Conforme observado na Figura 4.1, todos os nodos escravos estão dentro do raio de alcance do mestre, não necessitando de técnicas de roteamento.

$$A = 4 \times \pi \times R^2 \quad (4.1)$$

A área (A) coberta pelo sensor mestre compreende uma região calculada pela Fórmula 4.1 que mede a área (A) de uma esfera cujo raio é R [78]. Tal fórmula se aplica devido à distribuição de sinal pelas antenas isotrópicas que cria um volume esférico em torno do sensor. Se esta esfera for seccionada na horizontal, tem-se um círculo cuja área de cobertura pode ser ilustrada conforme Figura 4.1.

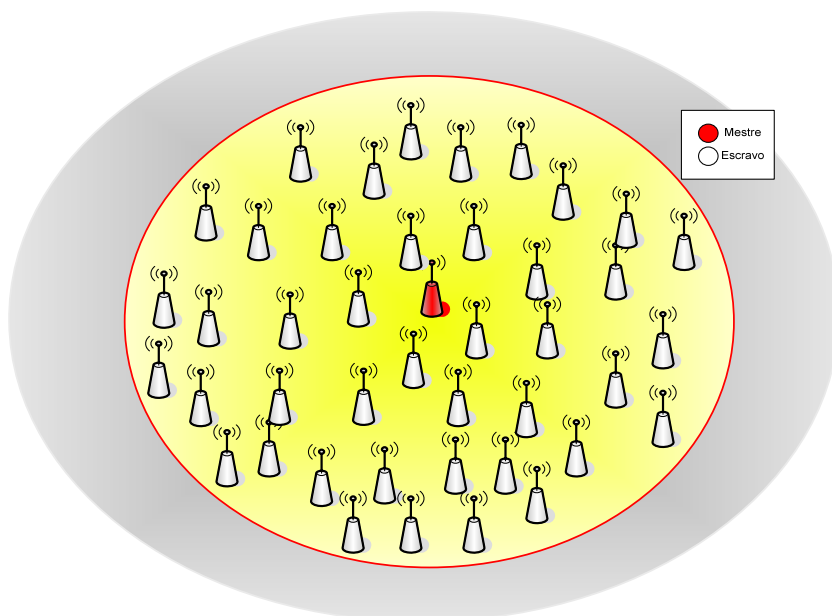


Figura 4.1 – Topologia da rede para fusão de dados paralela.

As características do modelo, que o melhor descreve, são condensadas pela Tabela 4.1. As informações são classificadas com base na configuração, sensoriamento, comunicação, processamento, conectividade e endereçamento da rede, e foram determinadas conforme características apresentadas no Capítulo 2.

Tabela 4.1 – Características do modelo proposto.

Configuração	Composição: homogênea Organização: plana Mobilidade: estacionária Densidade: densa Distribuição: irregular
Sensoriamento	Coleta: periódica e em tempo real
Comunicação	Disseminação: programada Tipo de conexão: simétrica Alocação de canal: dinâmica Fluxo de informação: difusão (<i>broadcasting</i>)
Processamento	Correlação
Conectividade	Alcance com único salto (<i>single-hop</i>)
Endereçamento de rede	Identificadores estáticos

O algoritmo de fusão de dados utilizado neste trabalho corresponde a uma média, conforme representado pela Equação 4.2 [4]; onde N é o número total de amostras recebidas e $a(i)$ corresponde a cada amostra. Uma amostra corresponde ao sinal coletado do ambiente. Outros algoritmos mais complexos também poderiam ser utilizados, como por exemplo, o proposto em [79]. No entanto, para este trabalho, o algoritmo usado para fusão não é importante.

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^n a(i)}{N} \quad (4.2)$$

Os nodos escravos são tidos como sensores de baixo custo, sujeitos a falhas, e que coletam informações sobre um sinal homogêneo – comum a todos os sensores escravos. Por esse motivo, uma das poucas premissas que se assume com relação ao algoritmo de fusão de dados é que este apresenta um resultado melhor quando o número de amostras usadas no seu cálculo aumenta.

4.2.1 Monitoramento periódico e validade temporal dos dados

Conforme outros trabalhos na área, assume-se que a grandeza monitorada muda com o tempo e os dados enviados pelos sensores possuem uma validade temporal [23][35][43]. No modelo proposto, para modelar esse envelhecimento do dado monitorado, considera-se que as mensagens possuem *deadlines* firmes.

No modelo temporal usado existe o conceito de *round* e de sessão (ver Figura 4.2). Considera-se que os nodos escravos enviam seus dados coletados do ambiente, periodicamente para o nodo mestre, o qual também efetua a fusão de dados periodicamente. Um *round* é uma grandeza que corresponde ao período estabelecido para os nodos escravos e mestre, efetuarem a coleta de dados e realizar a fusão de dados. O processo de monitoramento é efetuado durante certo tempo, o qual, neste trabalho recebe o nome de sessão. Por conseguinte, a sessão é um valor de tempo, múltiplo do valor de *round*, na qual a rede é monitorada conforme parâmetros de monitoramento pré-estabelecidos antes do início da sessão. A Figura 4.2 ilustra o conceito de *round* e de sessão, sendo que esta última, para facilitar a compreensão, possui um tempo curto de apenas 5 *rounds*.

Como o modelo considera que as mensagens possuem *deadlines*, optou-se arbitrariamente por um valor de *deadline* que coincide com cada final do período de monitoramento no nodo mestre menos um valor ε , que é o tempo necessário para o nodo mestre executar a fusão e dormir até o próximo *round*. Portanto, para que uma dada mensagem seja aceita pelo nodo mestre para fusão, esta deve estar no *round* corrente. Caso uma mensagem não chegue a tempo do processo de fusão, esta é contabilizada como perda de *deadline*, e a mensagem não será usada pelo nodo mestre.

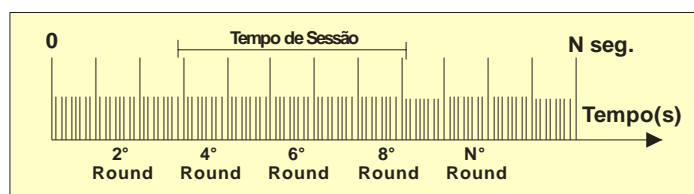


Figura 4.2 – Conceito de round e de sessão.

A implementação deste modelo assume a existência de alguma sincronização entre os nodos da rede. Os nodos mestre e escravos se sincronizam antes do início da sessão, e considera-se que o desvio (*drift*) dos relógios dos nodos sejam suficientemente pequenos para não haver necessidade de sincronização até a próxima sessão.

4.2.2 Métricas

A principal hipótese levantada por este trabalho é que, em uma rede densa, existe a necessidade de se adequar o número de mensagens enviadas pelos nodos escravos, buscando estabelecer um compromisso entre economizar energia da rede (aumentar a eficiência energética) e melhorar a qualidade final da fusão de dados (aumentar as

mensagens que chegam ao nodo mestre). Por este motivo, no modelo proposto assume-se duas métricas que serão avaliadas nos experimentos: (i) eficiência da rede, e (ii) qualidade da fusão. Essas métricas são um refinamento das apresentadas no Capítulo 1.

A Eficiência (E_f), dada pela Equação 4.3, representa a taxa de mensagens recebidas pelo nodo mestre dentro de seus *deadlines*, e mensura o rendimento da rede ao longo do tempo de sessão. O valor de E_f mede indiretamente o consumo de energia da rede, pois quanto menor o seu valor, maior o desperdício de energia proveniente do envio de mensagens que não serão utilizadas na fusão [4].

$$E_f = \frac{\text{TotalDeMensagensRecebidas}}{\text{TotalDeMensagensEnviadas}} \quad (4.3)$$

A Qualidade da Fusão (Q_oF) representa o percentual de qualidade obtida pela fusão em cada *round*. Assume-se que a qualidade do algoritmo de fusão é diretamente proporcional à quantidade de mensagens recebidas para a fusão. Uma vez que se torna impossível garantir a confiabilidade de poucos sensores, quanto maior o número de leituras, melhor a qualidade da fusão de dados. Claramente, equações complexas poderiam ser utilizadas dependendo do algoritmo de fusão empregado. Seria possível, por exemplo, estabelecer uma equação com um piso mínimo no número de sensores, sem o qual o valor obtido pela fusão seria zero. De forma complementar, estabelecer um patamar no número máximo de sensores, no qual a eficiência máxima é obtida. Por outro lado, sem perda de generalidade este trabalho assume uma função simples dada pela equação (4.4).

$$Q_oF = \frac{\text{TotalDeMensagensRecebidas}}{\text{TotalDeRounds}} \quad (4.4)$$

4.3 Ferramenta de simulação

O simulador utilizado para os experimentos foi o Truetime⁴, versão 1.5. Este simulador se constitui em um *toolbox* do Matlab⁵ que permite simular características de tempo real de redes de computadores, redes industriais e aplicações de controle via rede. Outras ferramentas existentes no Simulink do Matlab podem ser agregadas, criando sistemas cada vez mais complexos.

Essa ferramenta é estruturada em blocos (Figura 4.3), onde cada bloco possui uma finalidade dentro de um sistema. O bloco *kernel* é usado para simular computadores ou

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

5 <http://www.mathworks.com/>

dispositivos que possuem algum tipo de processamento próprio, o bloco *wireless network* possibilita simular o meio de transmissão sem fio, o bloco *battery* quando agregado ao *kernel*, possibilita simular um dispositivo que possui uma fonte de energia esgotável.

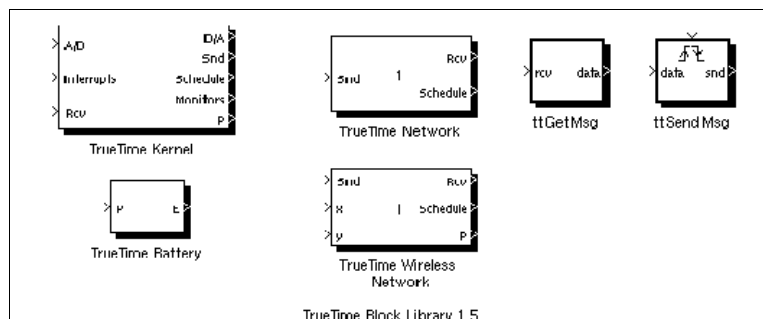


Figura 4.3 – Blocos do Truetime.

Na simulação, utilizou-se um *kernel* para cada nodo sensor da rede, inclusive para o nodo mestre. A Figura 4.4 apresenta a estrutura de cada nodo da rede na planta de simulação usada em todos os experimentos (a planta de simulação completa não pode ser exibida devido a suas dimensões). Como pode ser observado, o bloco *kernel* possui algumas entradas e saídas que necessitam ser configuradas para interligar os demais componentes do simulador. A ligação feita entre os conversores D/A e A/D permite configurar o comportamento da antena de captação do sinal obtido do meio. Os pontos X e Y são coordenadas pertinentes à configuração do próprio sensor. Estas coordenadas são responsáveis por modelar a topologia de rede. Com esta mesma estrutura pode-se dar características móveis aos dispositivos, caso necessário.

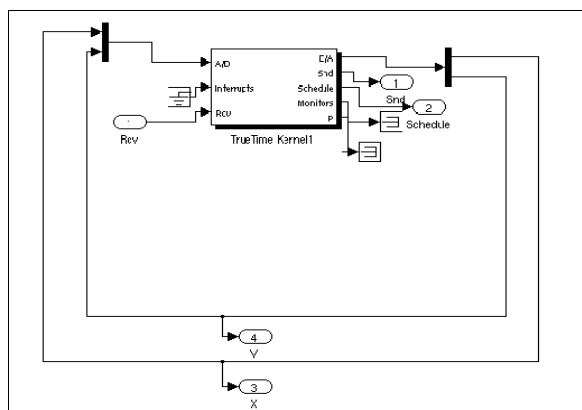


Figura 4.4 – Bloco de kernel que simula o comportamento de nodos sensores.

Já o bloco de rede, necessita apenas ter suas entradas e saídas apontando para os blocos destinatários e originários que desejam estabelecer uma comunicação. Em sua configuração interna, podem-se assumir diversos protocolos implementados no simulador, além da configuração de alguns parâmetros da rede que podem ser alterados.

4.4 Implementação do modelo no Truetime

Nesta dissertação, na simulação da RSSF, utilizou-se os protocolos 802.15.4 [53] e o padrão ZigBee [9][61]. Os parâmetros adotados para estes foram: velocidade de comunicação de 250kbits/s, número máximo de retransmissões iguais a 3, e um limiar de erro equivalente a 10%. Este último valor de parâmetro representa um meio físico em um ambiente bastante hostil. Os valores adotados para potência de transmissão (-20 dB) e o limiar de recebimento de mensagens (-90 dB) foram baseados em valores obtidos da especificação técnica do Telos Mote⁶, sendo estes parâmetros correspondentes ao comportamento assumido em um ambiente a céu aberto. Conforme mostrado na Figura 4.1.

O simulador implementa um modelo de antena isotrópica (tida como antena ideal) que é utilizada como base para diversos cálculos de engenharia na área de antenas. Seu comportamento é apresentado segundo uma circunferência perfeita (a) onde a potência irradiada ou recebida é a mesma em todas as direções, formando assim uma esfera com o sensor ao centro. Em (b) tem-se o comportamento da potência de irradiação de uma antena real que não é a mesma em todas as direções. A antena isotrópica é apenas um modelo matemático para servir de comparação para o projeto de antenas.

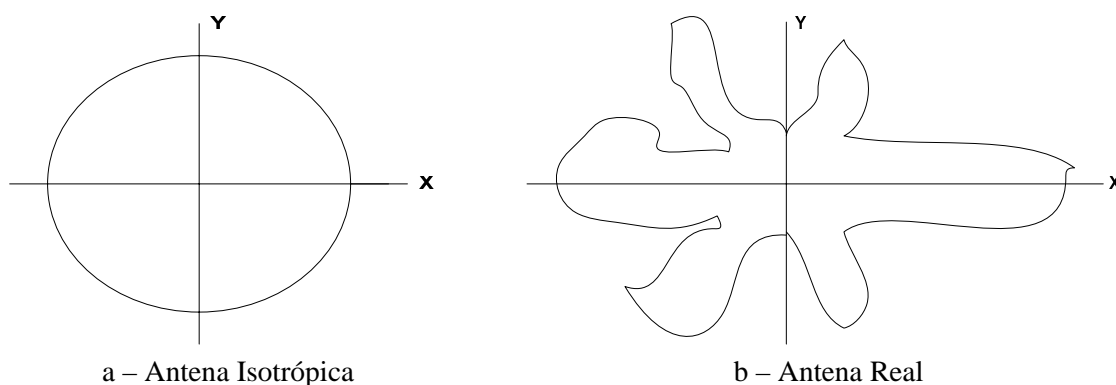


Figura 4.5 – Modelos de antenas.

A implementação dos sensores escravos (Figura 4.6) é constituída de apenas duas tarefas TMonitora e TEnvia. A tarefa TMonitora se encarrega de coletar uma amostra periódica do ambiente e a tarefa TEnvia é responsável por encaminhar esta amostra ao sensor mestre através de um canal de difusão *broadcasting*. A tarefa TMonitora, ao coletar os dados do ambiente, dispõe esse dado em uma área de memória, a qual tem associada um semáforo para controle de acesso a esta sessão crítica. A tarefa TEnvia acessa a sessão crítica, retira o valor ali depositado pela tarefa TMonitora, monta um pacote de dados de tamanho total de 12 bytes (96 bits) contendo o valor amostrado e o *round* em que foi gerada a amostra, conforme ilustrado na Figura 4.6.

⁶ <http://www.xbow.com/Home/HomePage.aspx>

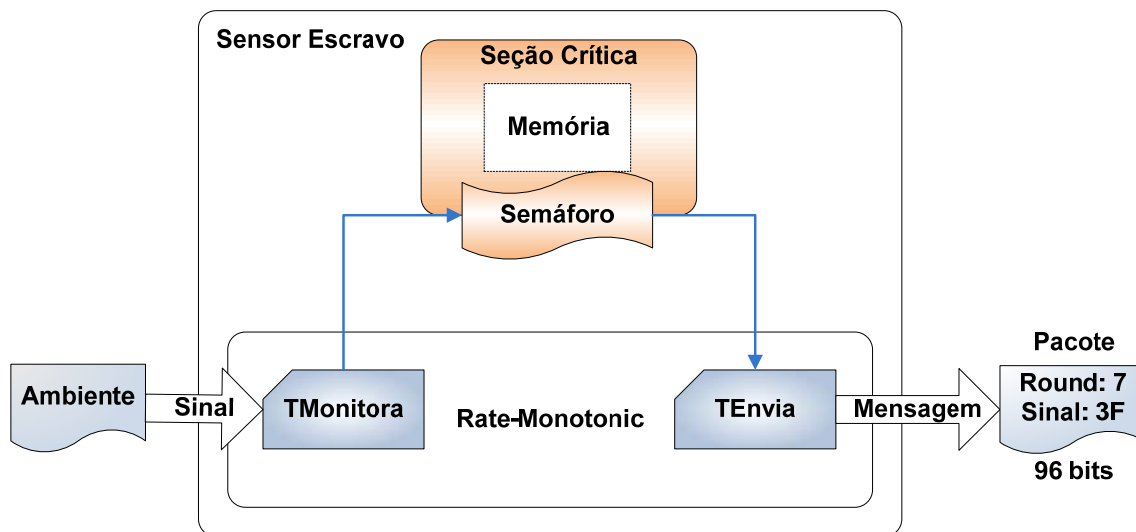


Figura 4.6 – Desenho esquemático dos sensores escravos.

A Figura 4.7 apresenta o algoritmo básico implementado nos nodos escravos. A cada início de sessão, os nodos escravos se sincronizam recebendo informações disseminadas pelo nodo mestre, tais como tempo de sessão, *round* e *deadline*. Após isso, durante toda a sessão, a cada *round*, os nodos monitoram grandezas físicas (TMonitora), montam mensagens e transmitem (TEnvia), e dormem até o início do próximo *round*.

O nodo mestre foi implementado com três tarefas periódicas denominadas TRecebe, TFusão e TEnvia, além de uma fila de informações coletadas dos sensores escravos conforme ilustra a Figura 4.8. A tarefa TRecebe coleta as amostras enviadas pelos nodos escravos e armazena na fila de amostras durante o período do *round* corrente. A tarefa TFusão se encarrega de acessar a sessão crítica e efetuar a fusão dos dados, periodicamente antes do início do próximo *round* utilizando as amostras presentes na fila. A tarefa TEnvia é empregada para o nodo mestre enviar informações de sincronização para os escravos.

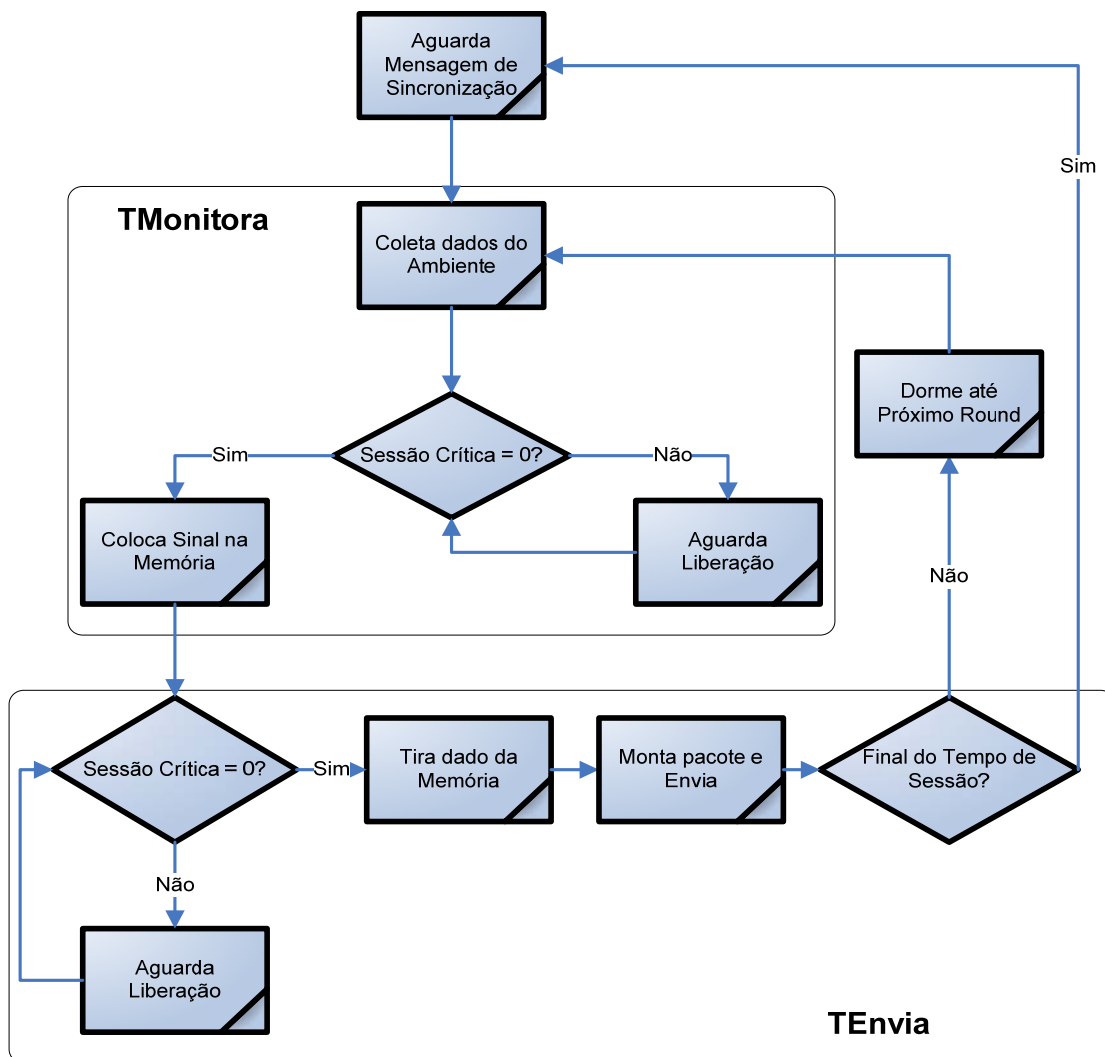


Figura 4.7 – Algoritmo do nodo escravo.

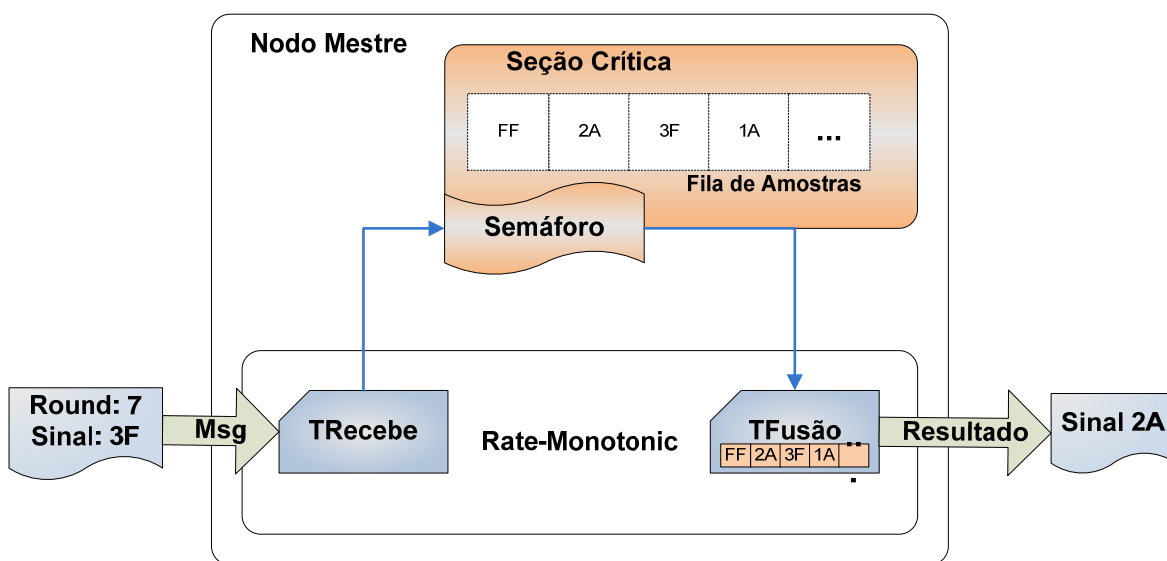


Figura 4.8 – Desenho esquemático do nodo mestre.

A política de prioridade fixa denominada taxa monotônica (*rate monotonic*) [80] foi adotada para o escalonamento das tarefas, tanto nos nodos escravos quanto no nodo mestre, sendo a $T_{fusão}$ a tarefa mais prioritária no nodo mestre e a T_{Envia} nos nodos escravos.

A Figura 4.9 apresenta o algoritmo do nodo mestre. No início de cada sessão o nodo mestre envia mensagem de sincronização aos nodos escravos com informações tais como tempo de sessão e valor de *round* (T_{Envia}). Após isso, o nodo mestre durante toda a sessão recebe dados disseminados pelos nodos escravos (T_{Recebe}) e efetua a fusão antes do término do *round* ($T_{Fusão}$).

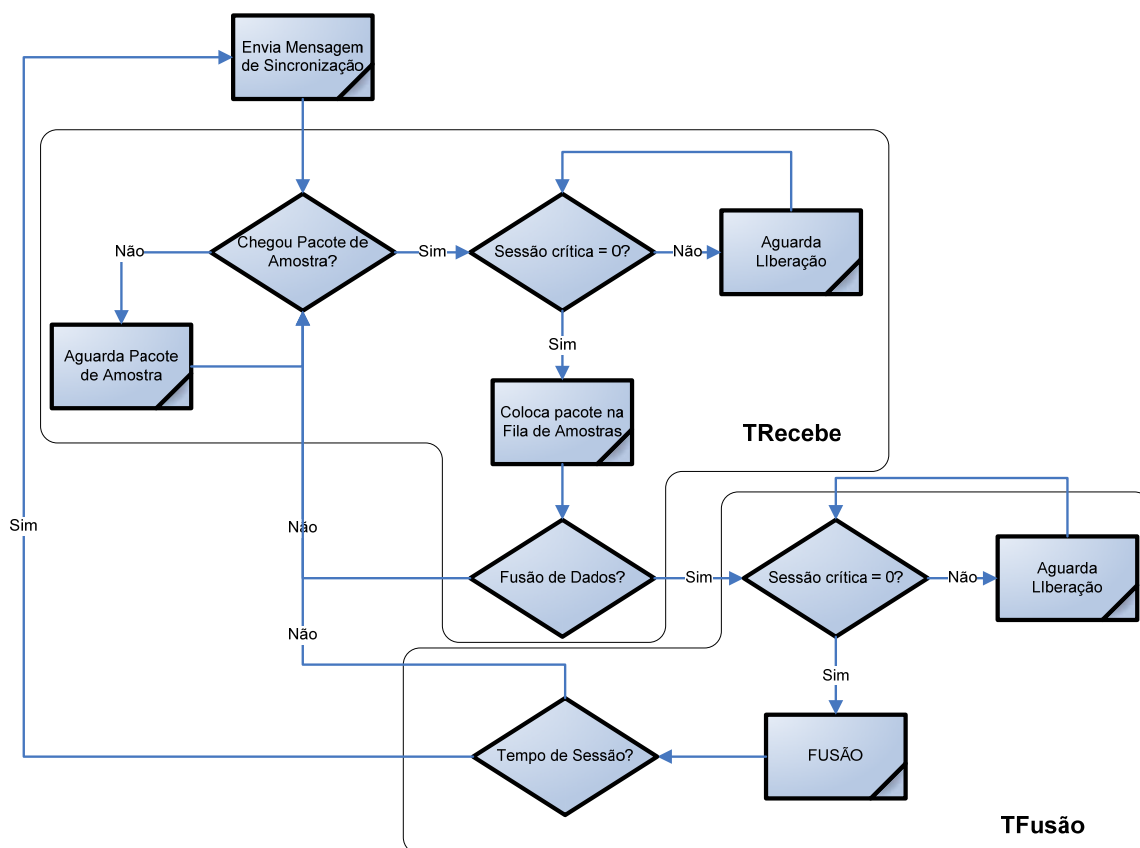


Figura 4.9 – Algoritmo do nodo mestre.

4.5 Abordagens propostas

Conforme visto anteriormente, abordagens dinâmicas são necessárias para lidar com os parâmetros da rede considerando as métricas QoF e Ef. Nesta dissertação são propostas duas abordagens que fazem uso de algoritmos genéticos. Estas abordagens tentam gerenciar a autonomicidade da rede através da determinação da probabilidade de envio dinamicamente com base em uma função objetivo pré-estabelecida. Antes da proposição das abordagens com algoritmo genético, em um primeiro momento foi feita a proposta de uma abordagem simples, denominada Probabilidade de Envio Variável.

O principal objetivo das abordagens é usar a probabilidade de envio para escalonar o envio de mensagens pelos nodos sensores, reduzindo consideravelmente a perda de mensagens pela rede. Porém, cabe ao algoritmo definir as melhores probabilidades que tendem a atingir o objetivo pré-estabelecido ao algoritmo genético. O objetivos das abordagens estão resumidos a seguir:

1) Probabilidade de envio variável

- Reduzir colisões e o desperdício de energia.
- Aumentar o tempo de vida da rede.
- Escalonar o envio de mensagens. O nodo sensor é capaz de decidir se envia ou não o dado coletado do ambiente.

2) Algoritmo genético mono-objetivo

- Mesmos objetivos da abordagem probabilista.
- Possibilitar auto-gerenciamento da estrutura dinâmica da maioria das aplicações de RSSF.
- Função objetivo busca apenas maximizar a eficiência da rede.

3) Algoritmo genético multi-objetivo

- Mesmos objetivos propostos pelas abordagens probabilista e mono-objetivo.
- Função objetivo busca maximizar a eficiência mantendo um nível pré-estabelecido de QoF.

A abordagem probabilidade de envio variável corresponde à base das abordagens, mono-objetivo e multi-objetivo, que fazem uso de algoritmo genético. A seção 4.5.1 descreve em detalhes a abordagem probabilista. Esta apresenta um bom comportamento quando a topologia da rede é estática. No entanto a maioria das aplicações faz uso de uma RSSF que apresenta comportamento dinâmico. Por este motivo, este trabalho enfoca principalmente os resultados das abordagens com algoritmo genético.

As abordagens mono-objetivo e multi-objetivo manipulam a probabilidade de envio para escalonar o envio de mensagens pelos nodos sensores, reduzindo consideravelmente a perda de mensagens pela rede. Porém cabe ao algoritmo genético definir as melhores probabilidades que tendem a atingir o objetivo pré-estabelecido.

4.5.1 Probabilidade de envio variável

Conforme visto no Capítulo 1, em uma rede densa, quando diversos nodos sensores resolvem transmitir seus dados ao mesmo tempo, ocorrem perdas de mensagens, retransmissões e, conseqüentemente, perdas de *deadlines* devido ao grande fluxo de

mensagens causado na rede ou até mesmo a proximidade entre alguns sensores onde um gera interferência sobre o outro. Uma abordagem simples é considerar que nem todo nodo escravo irá transmitir sua mensagem a cada *round*. A idéia é poder escalonar o envio de mensagens, economizando energia na transmissão dos sensores escravos, prolongando o tempo de vida da rede, reduzindo o número de colisões que tendem a ocorrer quando inúmeros sensores desejam enviar suas mensagens.

Na abordagem Probabilidade de Envio Variável [38] os algoritmos que executam nos nodos escravos e nodo mestre são os mesmos dos apresentados nas Figuras 4.7 e 4.9, respectivamente. No entanto, o procedimento “Monta pacote e Envia” do algoritmo do nodo escravo (Figura 4.7) passa a possuir a capacidade de decidir se envia, ou não, ao nodo mestre sua amostra coletada do ambiente. Essa escolha se dá a partir do parâmetro, denominado probabilidade de envio (PE). Este parâmetro é recalculado e enviado pelo nodo mestre aos nodos escravos no início de cada sessão, através do procedimento “Envia Mensagem de Sincronização” (Figura 4.9).

O valor de $TotalDeMensagensEnviadas(TME)$ é necessário para o cálculo da métrica E_f (Equação 4.3). No entanto, no início de cada sessão, o nodo mestre não sabe o número exato de nodos sensores escravos presentes na rede e, portanto, também não sabe o total de mensagens enviadas. Porém uma estimativa pode ser obtida ao longo do monitoramento dos *rounds* que compõem o tempo de sessão. Assume-se como o $TotalDeSensoresEscravos(TSE)$ o maior ID de sensor que chega dentro de algum *round* pertencente ao tempo de sessão monitorado. O valor de $TotalDeMensagensEnviadas(TME)$ passa a ser calculado no nodo mestre a partir da Equação 4.5:

$$TME = TSE * TotalDeRounds * PE \quad (4.5)$$

No final de cada sessão, o nodo mestre calcula um novo valor de PE a ser usado pelos nodos escravos na próxima sessão de monitoramento. Nesta abordagem, uma equação simples é adotada. Escolhe-se a PE de forma a melhorar a E_f . Utiliza-se a média de mensagens por *round* medida durante a sessão para o cálculo do novo valor de PE, segundo a Equação 4.6.

$$PE = \frac{MédiaDeMensagensPorRound}{TotalDeSensoresEscravos} \quad (4.6)$$

O uso de uma abordagem simples como a probabilidade de envio proposta em [56] se destina a redes de sensores cujo objetivo principal seria apenas diminuir o número de colisões na rede. No entanto, existem outros objetivos – como a gerência de autenticidade. São estes objetivos que as abordagens a seguir tentam atender.

O Apêndice A traz diversos resultados da avaliação do algoritmo que utiliza a proposta da probabilidade de envio variável [38].

4.5.2 Abordagens Autônomicas baseadas em algoritmo genético

O uso de abordagens evolucionistas – mais especificamente do algoritmo genético – surge como uma proposta para possibilitar com que a rede, durante o seu tempo de funcionamento, consiga administrar-se sem a intervenção humana determinando novos valores de probabilidade de envio ao longo do seu tempo de vida. O uso dessa abordagem agrega à rede duas vertentes básicas das redes autônomicas: a auto-otimização e auto-adaptação.

Com a auto-otimização a rede busca sempre uma probabilidade de envio ótima global (para a rede) através do ótimo local determinado pelo algoritmo genético, tentando maximizar a Ef , reduzindo o desperdício de energia. A auto-adaptação surge do fato da rede possuir uma topologia dinâmica. Com o emprego destas duas características auto-* pode-se criar uma RSSF auto-gerenciada.

Antes de prosseguir na descrição das abordagens, é necessário explicar algumas nomenclaturas assumidas para este trabalho.

Checkpoint: É o ponto de tempo onde, através do algoritmo genético, são realizados os cálculos das métricas de Ef e QoF , e destas métricas derivado o valor da nova PE que é enviado para os nodos escravos (evolução do sistema). O *checkpoint* implica em um sobre custo de 1 *round* na rede. Este é o período de tempo necessário para determinar as métricas e assim poder tomar uma decisão para melhorar o desempenho da rede. Nesta abordagem o *checkpoint* ocorre no último *round* de cada sessão (por esse motivo, a evolução só ocorre no final de cada sessão), no entanto essa premissa poderia ser facilmente relaxada.

Taxa de Reposição: Representa o número de cruzamentos que são executados. Dois cromossomos podem gerar apenas um único filho, por vez. Então, caso a taxa de reposição seja superior a 1, será escolhido mais de um casal de cromossomos, que possuem o mesmo campo “condição”.

Probabilidade de Mutação: A mutação é a mudança de um determinado *bit* do cromossomo de seu estado de zero para um, ou vice-versa. A probabilidade de mutação é um valor que representa a probabilidade de um novo cromossomo gerado, sofrer mutação. Ou seja, a mutação corresponde a um determinado gene sofrer alguma alteração. Neste experimento esse valor foi fixado em 1% e o cromossomo é representado por oito bits.

Orçamento (*budget*): Representa o valor que cada cromossomo possui. Cada cromossomo é criado com um valor de orçamento inicial fixo. Caso o cromossomo seja escolhido para teste, deverá pagar uma porcentagem do seu orçamento (10%) ao banco. Este valor é definido em cima do valor inicial de *budget* e não muda ao longo da atividade de rede. Por exemplo, se um determinado cromossomo iniciar com o valor 1000 no *budget* 10% de seu orçamento será 100 e este valor será constante ao longo da operação de rede.

Evolução: Representa o período em que o algoritmo genético evolui sua população de cromossomos através do cruzamento entre os mais adaptados. A evolução consiste em gerar novos cromossomos a partir dos mais aptos através do cruzamento destes indivíduos. Por exemplo, se o período de consulta da evolução for igual a dois, o algoritmo genético será executado a cada dois *checkpoints*, e se encarregará de evoluir a sua população de cromossomos baseado na taxa de reposição.

A implementação do algoritmo genético levou em consideração as limitações de redes de sensores sem fio, principalmente, restrições de memória e processamento. Os algoritmos dos nodos escravos e mestre seguem semelhantes aos apresentados pelas Figuras 4.7 e 4.9, respectivamente. No entanto, da mesma forma que ocorre na abordagem Probabilidade de Envio Variável [56], nesta abordagem os nodos escravos usam o parâmetro PE para determinar se a mensagem será enviada, ou não. O nodo mestre, da mesma forma que na abordagem anterior, também calcula um novo valor de probabilidade de envio a cada *checkpoint*. No entanto, este cálculo é efetuado pelo algoritmo genético, através do acréscimo de um sistema de classificadores [80][81], ilustrado pela Figura 4.10.

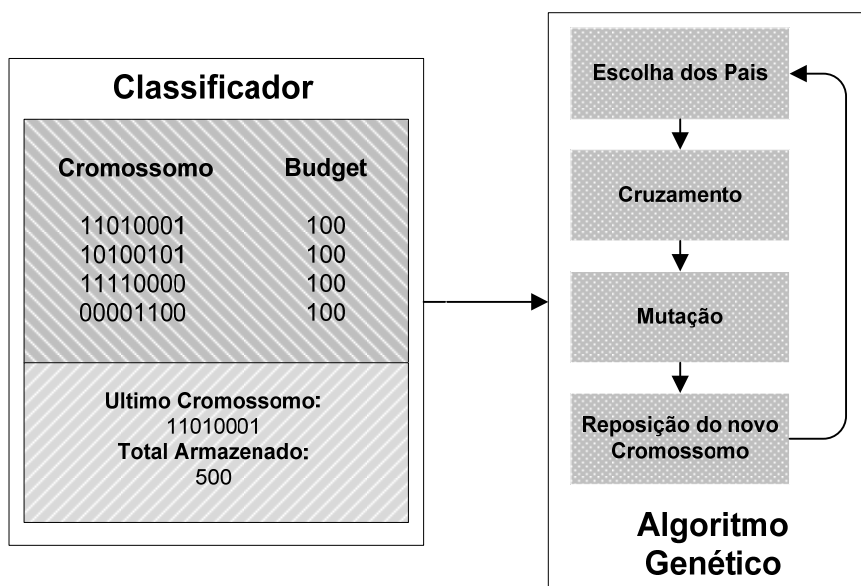


Figura 4.10 – Estrutura do classificador no algoritmo genético.

A implementação do sistema de classificadores, nesta dissertação, é composta por dois componentes que interagem entre si para alcançar o resultado desejado, o cromossomo e o banco. Os cromossomos são representados por uma cadeia binária de oito bits no total e possuem um saldo (*budget*) associado. Cada cadeia de *bits* é dividida em duas regiões, cada qual com quatro bits representativos, sendo a primeira região denominada condição e a segunda região denominada de ação, conforme ilustrado na Figura 4.11. A estrutura do cromossomo corresponde a um comando condicional do tipo: **se** <condição> **então** <ação>.

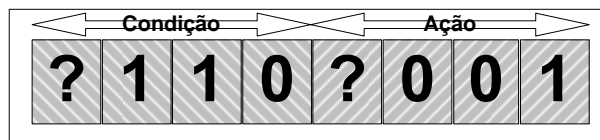


Figura 4.11 – Interpretação do cromossomo.

A condição representa o ganho ou a perda da eficiência do sistema, podendo ter valor negativo, caso o sistema perca eficiência, ou positivo, caso o sistema tenha conseguido aumentar sua eficiência durante os *rounds* monitorados. Dentre os quatro *bits* representativos da condição o primeiro define se esta é dada como positiva ou negativa. Condições cujo primeiro *bit* é 1 representam ganho do sistema, caso contrário, o sistema perdeu eficiência. Os três bits seguintes representam o nível de mudança da eficiência em relação à sessão anterior.

A ação representa a nova probabilidade de envio que deverá ser aumentada ou reduzida da atual probabilidade de envio, dependendo da condição encontrada pelo nodo mestre. Assim como a condição, a ação faz uso do seu primeiro *bit* representativo para determinar se a próxima probabilidade determinada pela ação deverá ser maior ou menor em relação à probabilidade de envio atual da rede. Os três últimos bits da ação representam o nível de mudança da probabilidade de envio da próxima sessão.

O conjunto de cromossomos forma a população de possíveis respostas para o sistema. Nesta abordagem utilizou-se um método onde cada condição forma uma espécie de ilha virtual. Cada condição possui quatro ações associados a si, ou seja, a cada grupo de quatro ações o mesmo campo condição é associado, que totaliza na formação de quatro cromossomos diferentes que possuem o mesmo campo condição. Sendo, então, um total de dezesseis condições, e cada uma possuindo quatro ações associadas, resultando em uma população de 64 cromossomos.

O orçamento é um valor inicial com que cada cromossomo é inicializado no sistema. É através deste que se define o cromossomo mais apto na população (o cromossomo que possuir maior valor é considerado o mais apto). Na inicialização da população de cromossomos todos possuem o mesmo orçamento. Mas à medida que estes cromossomos vão sendo selecionados, seus orçamentos vão sendo gastos através de pagamentos ao banco.

O banco é formado por dois subitens: (i) pelo último cromossomo escolhido para teste e (ii) o montante já acumulado, que foi pago por outros cromossomos anteriormente escolhidos, e ainda não transferido aos cromossomos que obtiveram desempenho satisfatório. O objetivo do banco é cobrar uma taxa dos cromossomos que são utilizados durante o processo, e premiar aqueles que conseguiram aumentar o valor de Ef da rede. Cada cromossomo escolhido paga um valor do seu orçamento ao banco para ser utilizado, se um determinado cromossomo conseguir melhorar a eficiência da rede, esta ação recebe o valor acumulado no montante tornando-se a ação mais apta do conjunto de ações e

conseqüentemente terá uma maior chance de proliferar seu DNA. De forma geral um cromossomo dito apto é aquele que possui o seu orçamento superior aos demais.

O módulo do algoritmo genético implementado é baseado em [82]. O algoritmo genético é responsável por evoluir a população de cromossomos, criando, cada vez mais, cromossomos derivados dos mais adaptados. Para isso, o algoritmo necessita fazer a escolha dos pais, que são dois cromossomos tidos como os mais adaptados pertencentes a uma determinada ilha que é escolhida de forma aleatória, ou seja, os pais possuem a mesma condição, porém ações diferentes. Os novos cromossomos filhos, originados a partir dos cromossomos pais são recolocados na mesma ilha – o ponto de corte é assumido apenas em cima das ações e não da condição –, podendo assumir a posição de um cromossomo qualquer inclusive dos seus pais.

Abordagem I: Mono-Objetivo

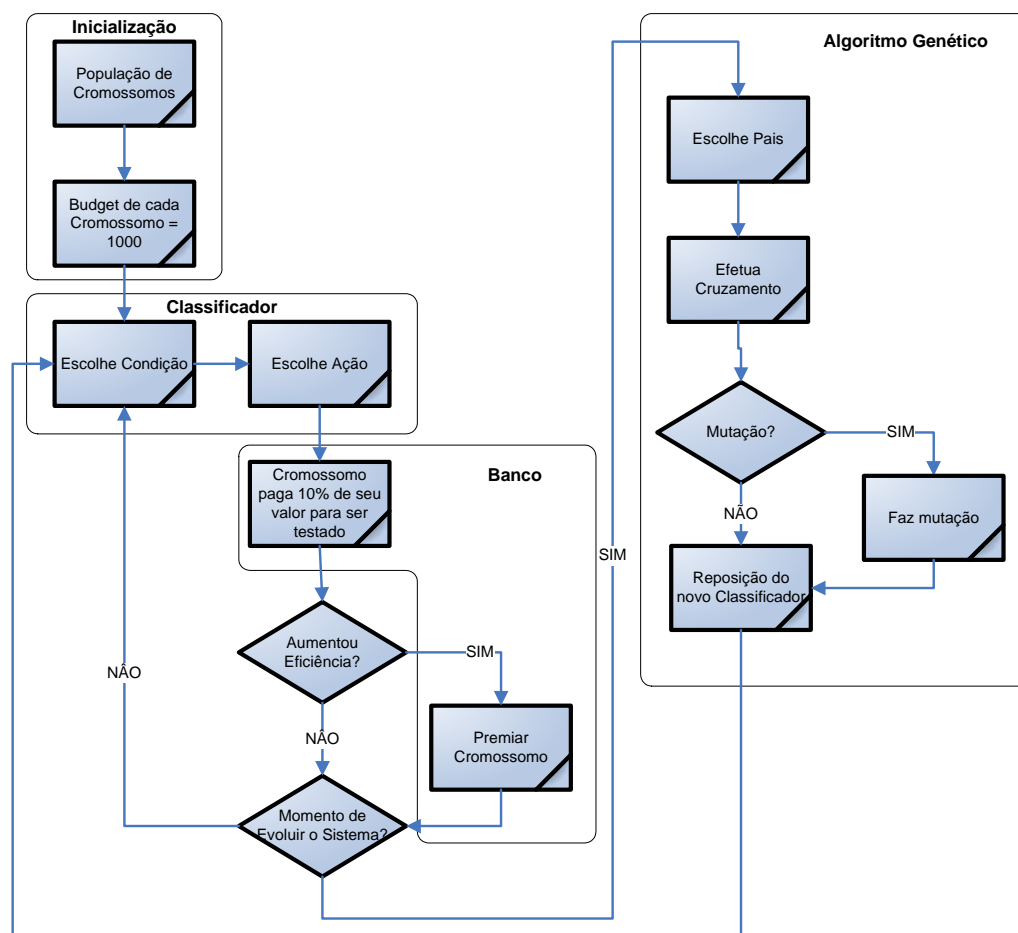


Figura 4.12 – Fluxograma do Algoritmo Genético para a abordagem mono-objetivo.

A Figura 4.12 representa a interação esquemática dos módulos apresentados na Figura 4.10 para a abordagem mono-objetivo. Na inicialização é criada uma população de

cromossomos e atribuído a cada um deles um orçamento de 1000. Em seguida o classificador se responsabiliza por escolher aleatoriamente um cromossomo que irá pagar um total de 10% do seu orçamento inicial para o banco, por ter sido escolhido. Na sequência é verificado se o cromossomo atual escolhido melhorou a eficiência da rede. Caso a resposta seja positiva então este cromossomo recebe o montante acumulado no banco, pago por outros cromossomos que foram testados anteriormente. Caso contrário um novo cromossomo é escolhido para teste.

A inserção do sistema de classificadores e do próprio algoritmo genético se deu como uma camada de *software* adicional (Figura 4.13). A primeira camada corresponde à rede física dos sensores. A segunda representa a implementação de troca de mensagens sem qualquer mecanismo que auto-gerencie o comportamento da rede. Por fim, a terceira camada é regida pelo sistema classificador e pelo algoritmo genético, que atua sobre os mecanismos de troca de mensagens e métricas para atingir o objetivo desejado.

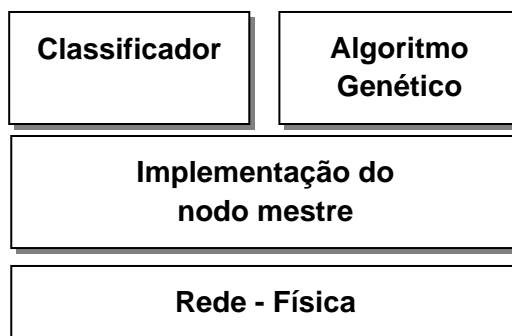


Figura 4.13 – Visão da estrutura de software implementado no nó mestre.

As métricas usadas neste trabalho, Ef e QoF, são calculadas a cada *checkpoint* e servem como base para calcular a probabilidade de envio para a próxima sessão. O cálculo dessas métricas são efetuados pelas mesmas fórmulas das Equações 4.3 e 4.4, respectivamente. A quantidade de mensagens enviadas é estimada através da Equação 4.5. A única diferença nos cálculos é que o número de *rounds* de cada sessão, usado no cálculo, é subtraído de um, já que o último *round* é utilizado para a computação do algoritmo genético (*checkpoint*).

O uso de algoritmo genético acoplado ao sistema de classificadores objetiva determinar uma PE que seja considerada adequada para uma determinada densidade. Para que isso ocorra, o classificador ajusta a PE com base no cálculo da Ef obtida, para determinar o ganho do sistema – que corresponde à variação da Ef. Este ganho indica se a próxima probabilidade de envio será menor ou maior na próxima sessão.

Abordagem II: Multi-Objetivo

A segunda abordagem de algoritmos genéticos comporta-se similar à abordagem mono-objetivo. A diferença é que o objetivo passa a ser o de tentar maximizar a eficiência da

rede ao mesmo tempo em que tenta manter a QoF acima ou igual a um valor de limiar pré-estabelecido.

4.6 Trabalhos relacionados

Com o surgimento das redes de sensores sem fio, as suas características particulares e a sua aplicação em ambientes inadequados para a presença humana, diversos trabalhos têm sido publicados contendo as mais diversas propostas para melhorar o desempenho deste tipo de rede.

Características de tempo real [23] e protocolos que visam o escalonamento do sono dos sensores [33] objetivando diminuir o consumo de energia e, conseqüentemente, prolongar o tempo de vida da rede são pontos chaves que estão sendo desenvolvidos para este tipo de rede. A computação autônômica surge como proposta que tende a acrescentar a possibilidade de adaptação em tempo real às condições da rede em um determinado momento. Por esses e outros motivos diversos trabalhos tentam atribuir características auto-gerenciáveis as RSSF.

Apesar da necessidade de abordagens autônômicas para as RSSF, alguns trabalhos relacionados, não fazem uso de outras técnicas como é o caso de [21], [37], [48], [69], [73], [74] e [75].

Em [68] é proposto um trabalho onde o autor faz uso de técnicas probabilistas. Há a combinação de técnicas de roteamento junto com a detecção colaborativa, que objetiva diminuir o consumo energético aumentando a confiabilidade da detecção de determinados eventos através da utilização de um número menor de sinais obtidos dos sensores na fusão de dados buscando atender a um nível de qualidade desejado.

Na abordagem proposta por Patil *et al.* [68] há a necessidade de técnicas de roteamento e fusão de dados em cada nodo sensor. Tais técnicas necessitam com que todos os sensores tenham poder computacional suficiente para realizar a fusão de dados. No entanto, a abordagem proposta por esta dissertação prevê que apenas um único nodo sensor tenha poder computacional suficiente para executar o algoritmo de fusão de dados.

Outra abordagem que faz uso de técnicas probabilistas é dada em [72]. O autor propõe um protocolo adaptativo para fusão de dados que faz uso de três tipos de protocolos que são selecionados de acordo com as condições do canal de transmissão. O objetivo deste protocolo adaptativo é manter um nível desejável de segurança dentro da rede, garantindo com que a fusão de dados seja executada com o mínimo de segurança possível. A idéia do protocolo constitui-se em três sub-protocolos: (i) protocolo baseado em árvore onde o trajeto de fusão de dados e transmissão de pacotes é pré selecionado, (ii) protocolo baseado em multi-caminho e, por último, (iii) protocolo para transmissão redundante de pacotes pela rede.

Gupta *et al.* em [72] propõe o uso de três algoritmos de fusão de dados que são executados de acordo com as condições do canal de transmissão. Um dos objetivos desta

dissertação é melhorar a métrica de qualidade da fusão. Isso possibilitará com que uma infinidade de algoritmos possam ser utilizados nesta abordagem. Para a maioria dos algoritmos de fusão, uma maior quantidade de mensagens possibilita com que o algoritmo retorne respostas mais confiáveis.

Em [69] é introduzido um algoritmo de disseminação de dados em RSSF autonômica, através de técnicas de roteamento que faz uso de mapa de energia [71]. O intuito é determinar rotas para trafegar pacotes através da determinação dinâmica, através do reconhecimento dos níveis de energia em cada sensor.

Machado et al. em [69] propõe o uso de computação autonômica para determinação de rotas usando como base a fonte de energia dos nodos sensores. A abordagem de algoritmo genético, proposta deste trabalho, não faz uso de técnicas de roteamento, tão pouco necessita realizar troca de mensagens demasiadas para manter um mapa de energia local, dos nodos sensores. O nodo mestre desconhece completamente a quantidade de sensores na rede.

Ruiz *et al.* [21][73] propõem uma arquitetura para RSSF que possibilita o auto-gerenciamento. A arquitetura MANNA, possibilita o auto-conhecimento, auto-consciência, auto-serviço, auto-organização, auto-configuração e auto-manutenção através da proposta de uma arquitetura que trabalha em três dimensões principais (Área funcional de gerência, Nível de gerência, e funcionalidades das redes de sensores sem fio).

Em [21] e [73] o autor conseguiu se aprofundar. Sua proposta se constitui em uma arquitetura de auto-gerenciamento, que obedece as características de computação autonômica. Apesar de propor muitas das características da teoria de computação autonômica, a arquitetura não propõe a auto-otimização que é fundamental para as redes de sensores. E que nesta dissertação é levado em consideração.

Em [48] o autor propõe um novo paradigma de processamento colaborativo segundo as características autonômicas. A questão chave da proposta é a divisão das camadas da arquitetura que visam garantir auto-configuração, auto-regeneração, auto-otimização e auto-proteção em todas as camadas. A troca de informações ocorre dentro de um cluster, o *cluster head* é escolhido, usando como base a fonte de energia e a proximidade do alvo desejado. O objetivo da abordagem é diminuir a distância entre os nodos da rede e o nodo que deseja obter determinado resultado, para isso a rede tem que ser conhecedora do ambiente ao qual esta inserida e conhecer a reserva de energia dos nodos vizinhos. Por outro lado, tem-se nesta abordagem um *cluster* sendo formado dinamicamente e de acordo com o objetivo a ser observado.

Kang et al. em [48] objetivou atender as quatro características básicas da computação autonômica. No entanto, a proposta se baseia em atender as características em cada camada da pilha de protocolo. Esta, dependendo do protocolo, pode não ser viável. Garantir autonomicidade em todos os níveis e em todos os nodos da rede ocasiona um alto consumo de energia. Esta dissertação propõe auto-gerenciamento implementado apenas na camada de aplicação, o que possibilita com que a proposta seja implementada em RSSFs

que façam uso de protocolos, de comunicação, diferentes. O autor também considera a organização em cluster para a sua abordagem, assim como esta dissertação.

Os trabalhos em [37][74] descrevem um dos primeiros protocolos que surgiram com o intuito de auto-organizar a rede de sensores. O protocolo atua sobre a camada MAC e possibilita a troca de mensagens objetivando organizar inicialmente a rede de sensores, e reestruturar a rede à medida que a topologia tende a se modificar devido aos problemas que podem ocorrer com os sensores (término de energia, defeito, etc). Portanto, a entrada e saída de nodos sensores na rede é prevista por este protocolo. O roteamento também pode ser considerado adaptativo, pois a escolha de rotas é baseada nos sensores vizinhos e na quantidade de energia que cada um possui.

Em [37][74] são descritos uns dos primeiros trabalhos que trouxeram a idéia de computação autonômica para as RSSFs. No entanto, o autor se preocupa apenas com a reestruturação lógica da rede, objetivando reestruturá-la a cada momento em que nodos entram e saem. Esta dissertação leva em consideração, essas características acrescentando a auto-otimização buscando sempre melhorar a estrutura da rede e diminuir o consumo de energia.

A computação bio-inspirada também pode ser aplicada nas redes de sensores para garantir auto-organização. Em [75] é apresentado um estudo baseado na computação bio-inspirada que tenta garantir auto-organização, auto-configuração, auto-regeneração e auto-adaptabilidade.

Esta dissertação segue a idéia de computação evolucionista, baseando-se no comportamento natural assim como em [75]. No entanto, a preocupação deste trabalho é exclusivamente com a auto-organização da rede.

Muitos outros trabalhos, atualmente, estão propondo abordagens baseadas na computação autonômica. Muitas destas fazem uso de computação evolucionista, bio-inspirada ou algum outro mecanismo que venha a garantir o comportamento de auto-* sobre a RSSF para alguma finalidade ou solução de um problema desejado.

Em um contexto geral, nenhum trabalho aqui descrito se preocupa com requisitos temporais impostos pela maioria das aplicações de RSSF. A abordagem proposta por esta dissertação buscar garantir apenas duas características da computação autonômica: auto-configuração e auto-otimização. Auto-configuração é proposta por quase todas as abordagens, no entanto auto-otimização é fundamental, e mesmo assim não é tratada por muitos autores.

Os trabalhos que mais se aproximam dentre os estudados nesta dissertação foram descritos acima, e o que se observa é que muitos estudos estão sendo desenvolvidos nesta área e a sua totalidade pode ser considerada um estudo recente.

4.7 Considerações finais

O presente capítulo apresentou uma visão geral do modelo do sistema e as abordagens cuja avaliação será apresentada no Capítulo 5. Além disso, foram apresentadas as métricas, a ferramenta de simulação e a implementação das abordagens no TrueTime. Por último, apresentou-se os trabalhos relacionados.

5 Avaliação da Abordagem de Algoritmo Genético

5.1 Introdução

Neste capítulo são avaliadas as duas abordagens implementadas para o uso de algoritmos genéticos como ferramenta de auto-gerenciamento para RSSF. As abordagens se constituem em Mono-objetivo, a qual, como o próprio nome sugere, tenta melhorar a métrica eficiência da rede e, a segunda abordagem é denominada de Multi-Objetivo, onde o algoritmo genético tenta melhorar a eficiência da rede mantendo um determinado nível de qualidade da fusão de dados. Ambas as abordagens, conforme já citado no capítulo anterior, originaram-se da abordagem Probabilidade de envio variável.

5.2 Abordagem I: Mono-Objetivo

O objetivo da primeira abordagem é apenas maximizar a eficiência da rede. O comportamento obtido para este algoritmo resultou no gráfico da Figura 5.1. Este gráfico traz três informações básicas, a QoF (Qualidade da Fusão de Dados), a Eficiência Nominal, que corresponde ao comportamento estimado pelo algoritmo genético, e a Eficiência Efetiva, a qual corresponde ao comportamento real ocorrido na rede. O gráfico, também, permite comparar os resultados da abordagem mono-objetivo com os dados obtidos no Capítulo 1 que são identificados por PE=100%.

O gráfico da Figura 5.1 apresenta uma Eficiência Nominal diferente da Eficiência Efetiva. Este comportamento ocorre devido à configuração do algoritmo genético, pois como o nodo mestre não possui conhecimento da quantidade de sensores na rede, este necessita estimar os valores de eficiência para que sejam determinadas as probabilidades de envio que serão utilizadas nas sessões seguintes. Quanto menor o espaçamento entre as linhas das métricas de eficiência nominal e efetiva menor será o erro da estimativa do algoritmo genético. Através da Eficiência Efetiva, pode-se compreender que à medida que a densidade aumenta, a eficiência da rede diminui. Este comportamento ocorre porque a Qualidade da Fusão aumenta significativamente. Portanto, quanto maior a qualidade da fusão, menor a Eficiência da Rede. Esta última tende a cair consideravelmente.

Comparando os resultados obtidos através do algoritmo genético, com os resultados anteriores para PE=100%, tem-se um comportamento satisfatório. Pois o algoritmo genético mono-objetivo, conseguiu melhorar a eficiência efetiva da rede. A diferença entre a eficiência efetiva da abordagem mono-objetivo e a eficiência para a PE=100% é 5%, 6.5%, 6.3% e 3.7%, para as densidades de 25, 50, 100 e 200 nodos, respectivamente.

O aumento da eficiência provocou uma diminuição na qualidade da fusão de dados, devido a menor quantidade de mensagens que circularam pela rede e as colisões que eventualmente ocorreram. A qualidade da fusão em todas as densidades foi menor, com uso do algoritmo genético, no entanto o objetivo foi atendido.

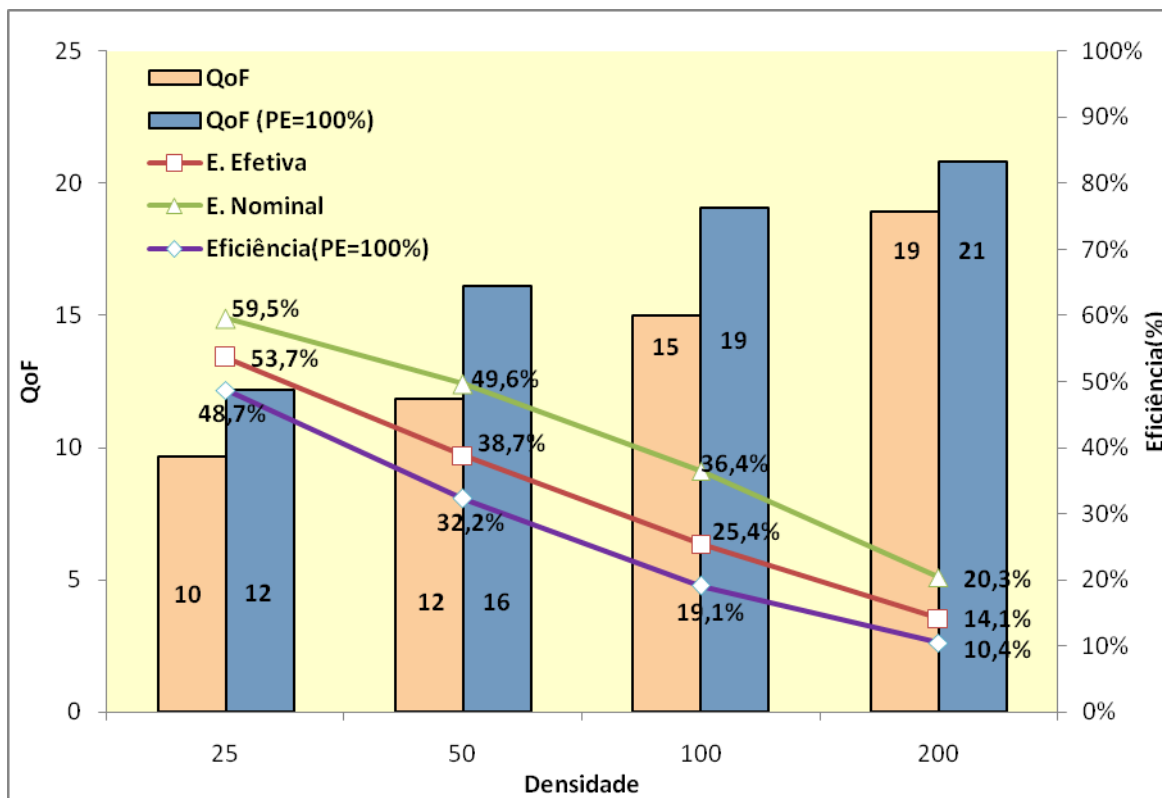


Figura 5.1 - Comportamento da rede ao longo do tempo de simulação de 2000ms.

O gráfico da Figura 5.2 ilustra o comportamento da rede quanto ao envio e recebimento de mensagens em cada densidade. No mesmo gráfico pode se ter uma idéia da perda de mensagens da rede. Na área mais clara é apresentado o total de mensagens recebidas, quanto a área mais escura tem-se o total de mensagens enviadas. O que fica claro é que apenas uma pequena quantidade de mensagens chega ao nodo mestre para serem fundidas, portanto, é correto afirmar que apenas uma pequena parcela das mensagens enviadas é aproveitada na fusão de dados.

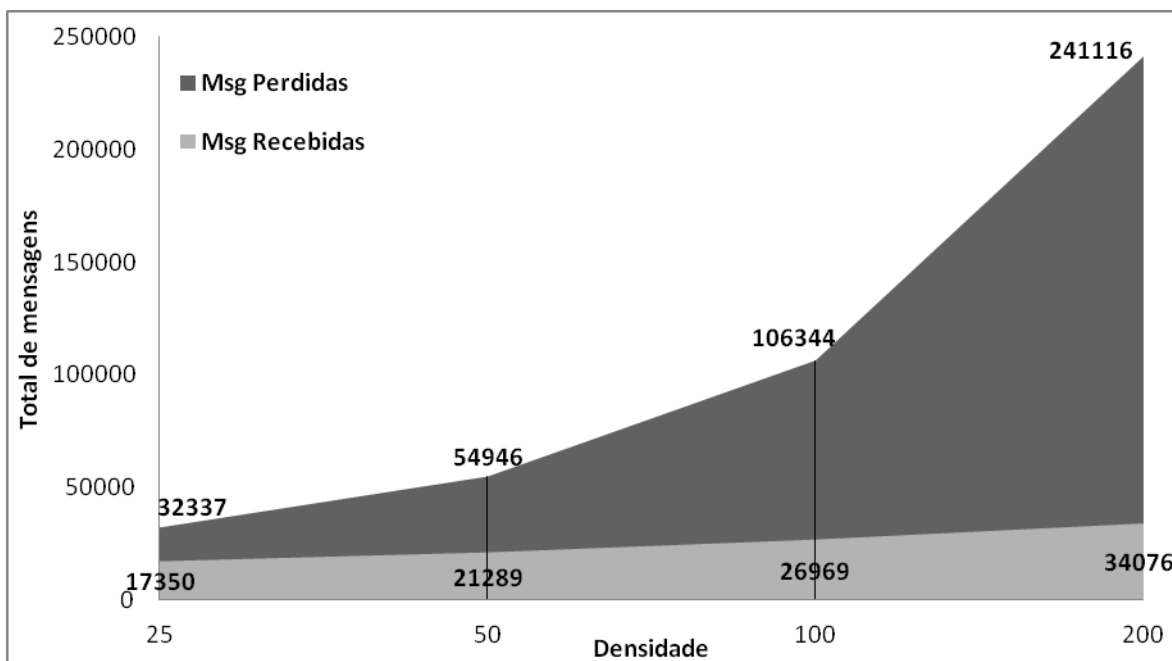


Figura 5.2 - Total de mensagens recebidas e enviadas para cada densidade da rede.

A Tabela 5.1 apresenta o percentual de mensagens perdidas pela rede. Até a densidade de 25 nodos sensores há um percentual de recebimento maior que o percentual de perdas, a partir da densidade de 50 nodos sensores a quantidade de perda de mensagens é bem maior que a quantidade de mensagens que chegam para serem fundidas e este percentual vai subindo a medida que a densidade aumenta. Na coluna de mensagens perdidas estão calculadas as perdas provenientes do meio e as mensagens que perderam os seus *deadlines*.

Tabela 5.1 - Percentual de mensagens recebidas e perdidas na rede.

Densidade	Recebidas	Perdidas
200	14%	86%
100	25%	75%
50	39%	61%
25	54%	46%

A Figura 5.3 apresenta o comportamento da eficiência dada pela rede em cada *checkpoint* para a densidade de 100 nodos. Para a presente abordagem que objetiva apenas maximizar a eficiência da rede, o algoritmo genético tentou manter a eficiência alta, porém observa-se no gráfico que em alguns momentos a eficiência cai consideravelmente em relação ao *checkpoint* anterior. No entanto, em determinados instantes a eficiência alcançava 100% e este aumento de eficiência faz com que a probabilidade de envio seja baixa e o tráfego de mensagens pela rede seja igual a 1%, ou seja, quase nula.

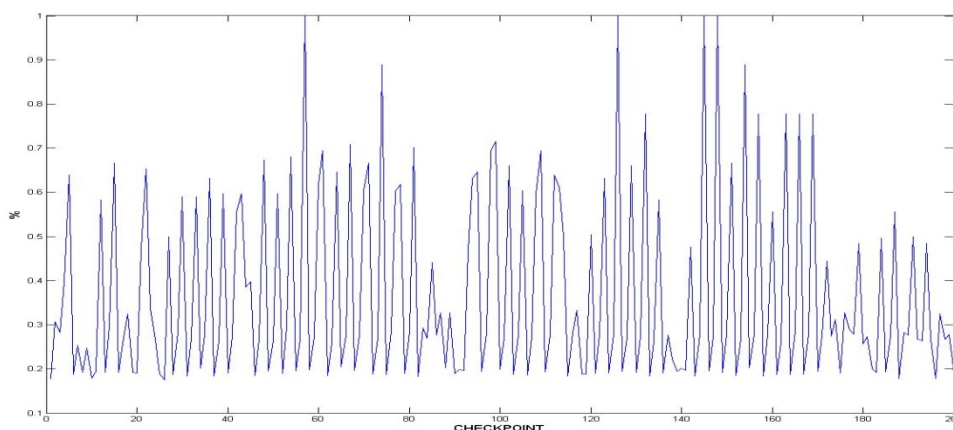


Figura 5.3 - Comportamento da Eficiência efetiva a cada *checkpoint* (densidade de 100 nodos).

Devido à probabilidade de envio ser estipulada com base em uma estimativa, a mesma pode sofrer uma grande variação em vários instantes de tempo devido a probabilidade não ser uma característica determinística. Uma replicação de 50 experimentos resultou na Tabela 5.2 que resume a variação das métricas avaliadas para as densidades de 100 e 50 nodos.

Para 100 nodos, o desvio padrão ficou em 3%. Enquanto que para 50 nodos este resultou em 2%. A Eficiência Nominal apresentou um comportamento bem variado em ambas as densidades em relação a Eficiência Efetiva. Estes valores indicam que a densidade além de influenciar diretamente na QoF também influencia na variabilidade da rede uma vez que o desvio padrão mostra que para densidade menor a dispersão é relativamente baixa, e a medida que a densidade da rede aumenta, essa variação também aumenta.

Tabela 5.2 - Análise de dispersão das métricas para as densidades de 100 e 50 nodos.

	100 Nodos			50 Nodos		
	Eficiência Nominal	Eficiência Efetiva	QoF	Eficiência Nominal	Eficiência Efetiva	QoF
Média	29%	37%	14	29%	22%	17
Desvio Padrão	5%	3%	1.4	7%	2%	2

A presente abordagem permitiu visualizar o comportamento do algoritmo genético frente à necessidade de aumentar a eficiência da rede diminuindo o consumo de energia a qualquer custo, sem preocupação com a qualidade da fusão de dados. Os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios, dado o comportamento do algoritmo pois este tentou manipular a probabilidade de envio para atingir o objetivo estipulado a ele.

5.3 Abordagem II: Multi-Objetivo

A segunda abordagem busca conciliar o aumento da Qualidade da Fusão de dados com o da Eficiência da rede. Para esta abordagem, tem-se um limiar pré-especificado que determina o segundo objetivo para o algoritmo genético: manter a QoF acima ou igual a este limiar ao mesmo tempo que tenta maximizar a Eficiência da rede.

A princípio, necessitou-se avaliar o comportamento do gráfico de acordo com alguns limiares para que seja avaliado o seu comportamento na tentativa de atender aos seus objetivos e, como consequência, avaliar se a abordagem realmente funciona. O gráfico da Figura 5.4 mostra o teste feito para alguns limiares (escolhidos de forma aleatória) estipulado ao algoritmo genético. Nos limiares 9, 11, 12 e 13 o algoritmo genético conseguiu manter a qualidade da fusão acima ou igual ao limiar determinado. Porém, já para o limiar 15 a QoF ficou em 14,5 o que possibilita concluir que o algoritmo genético tentou atingir o limiar desejado no entanto não foi possível, mas deixou tão próximo quanto possível. Destaca-se ainda, que a eficiência efetiva da rede se manteve, relativamente, estável entre os limiares simulados. Estes dados são mostrados para uma rede cuja densidade é de 100 nodos.

Os resultados para a densidade de 50 nodos são apresentados na Figura 5.5, este cenário também foi submetido ao teste de limiar para analisar o seu comportamento. Para os limiares de 9, 11 e 12 a QoF se manteve acima do limiar estabelecido. Um comportamento interessante pode ser observado entre os limiares 13 e 15. Com o limiar igual a 13, o algoritmo conseguiu manter a QoF no valor alvo; já com o valor 15, o comportamento foi similar ao da rede com 100 nodos, onde a QoF ficou em 14,4 para um limiar igual a 15.

Analisando paralelamente o comportamento do limiar para as densidades de 50 e 100, observa-se que para redes onde a densidade é mais alta, o limiar pode ser facilmente atingido resultando em uma variação relativamente boa entre a QoF e o limiar desejado.

A Eficiência Efetiva e a Eficiência Nominal em ambos os gráficos (Figura 5.4 e 5.5), se comparado com os resultados obtidos com os experimentos anteriores, se comportaram da mesma forma que vinham se comportando, com certa margem de diferença entre as duas eficiências. No entanto, se analisarmos a eficiência efetiva em ambos os gráficos, tendo como base os limiares é possível notar que a esta eficiência se manteve estável para os limiares utilizados, com uma variação entre eles muito baixa. Este comportamento é interessante porque mostra que é possível atingir certo nível de QoF com pouco impacto na eficiência efetiva permitindo com que o algoritmo genético equilibre as métricas.

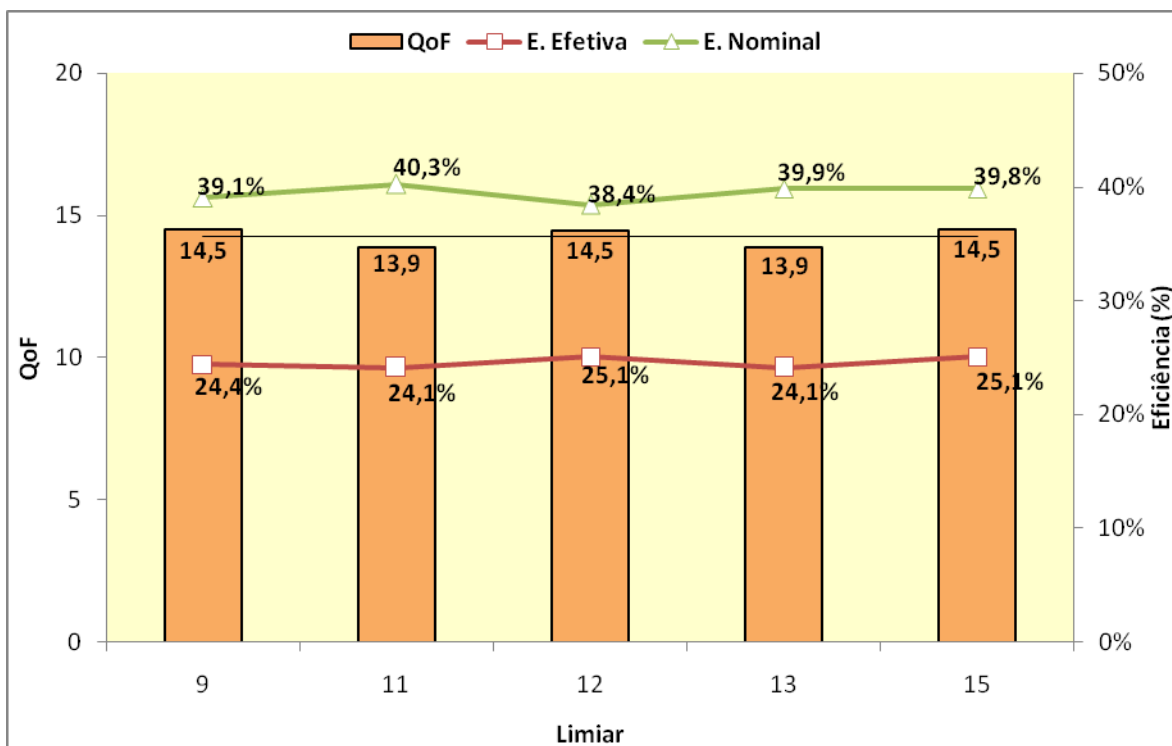


Figura 5.4 - Teste de limiar para densidade de 100 nodos.

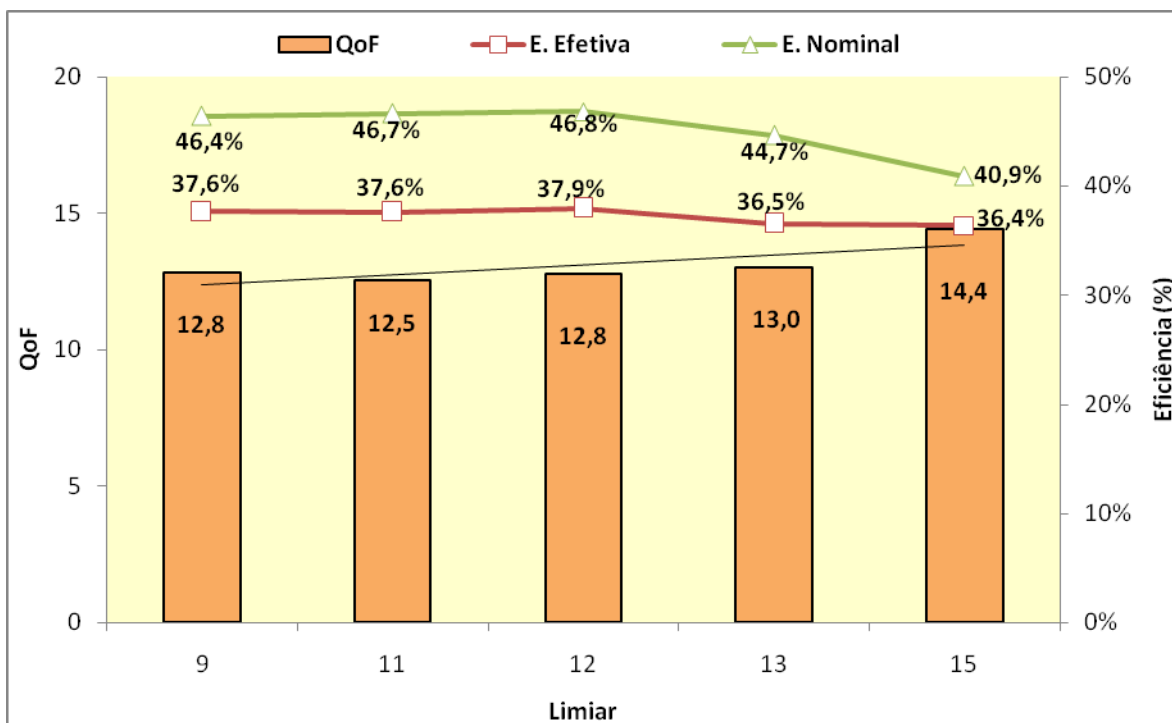


Figura 5.5 - Teste de limiar para densidade de 50 nodos.

A avaliação do comportamento da rede com base na variação da densidade foi efetuada escolhendo aleatoriamente um limiar já testado. Para tanto, optou-se pelo limiar

igual a 12. O resultado do experimento pode ser acompanhado através do gráfico da Figura 5.6 que mostra que à medida que a densidade da rede aumenta, a QoF vai ficando cada vez mais distante do limiar por atingir um patamar acima do estipulado. Para a densidade igual a 25 nodos sensores, o algoritmo não consegue atingir o limiar resultando em uma QoF abaixo do esperado. Este fato ocorre devido ao índice de perda de mensagens na rede para esta densidade que pode ser acompanhado pela Tabela 5.3. Apesar do algoritmo genético ter possibilitado o recebimento de 52% das mensagens enviadas esta quantidade não foi o suficiente para posicionar a QoF de acordo com o limiar desejado. Portanto, como já percebido, o limiar desejado também sofre influência da densidade utilizada.

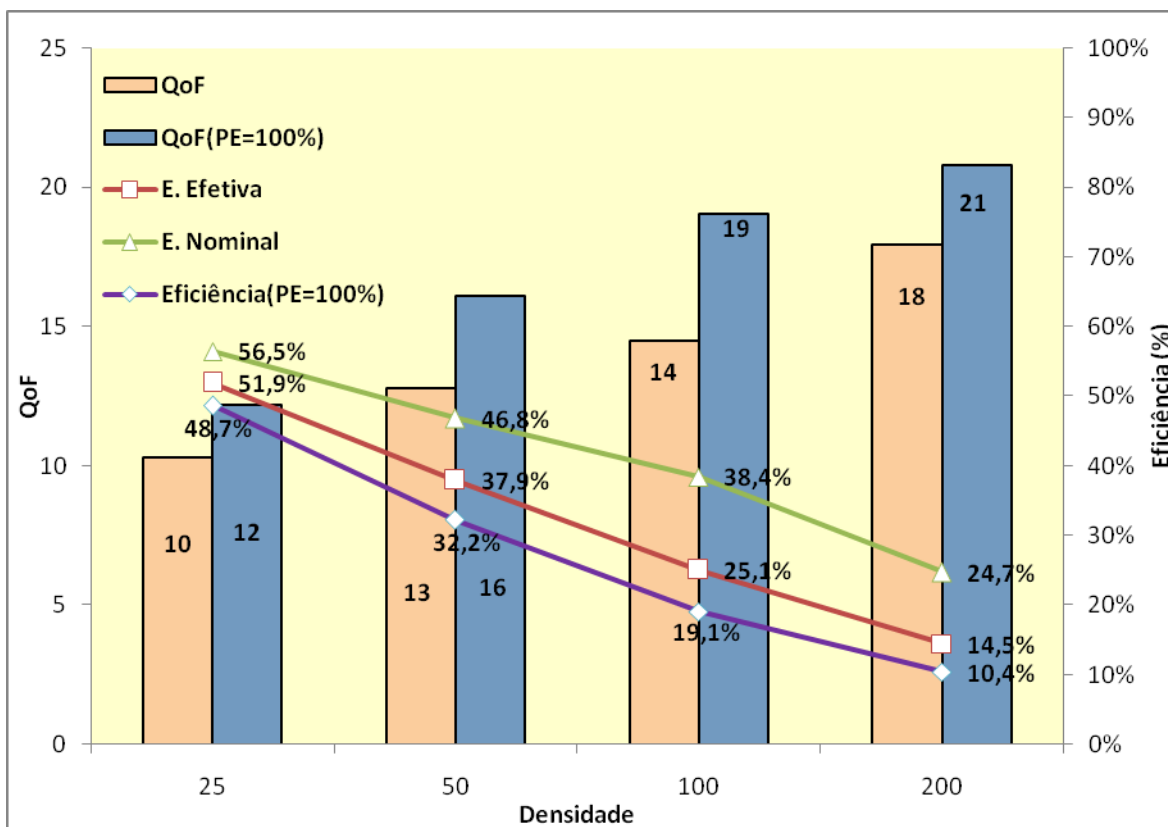


Figura 5.6 – Teste para limiar igual a 12 variando a densidade da rede.

Analisando as métricas, eficiência e qualidade da fusão, a abordagem multi-objetivo se mostrou ser uma abordagem promissora. Apesar da qualidade da fusão ter sido menor em relação ao experimento para PE=100%, este se manteve acima do limiar estipulado ao algoritmo genético. Quanto a eficiência efetiva, esta se apresentou melhor. Comparando as duas abordagens (mono-objetivo e multi-objetivo) as eficiências efetivas ficaram muito próximas. Mesmo assim houve uma leve diferença entre ambas e a qualidade da fusão também foi afetada por esta leve melhora.

Tabela 5.3 – Percentual de mensagens recebidas e perdidas.

Densidade	Recebidas	Perdidas
200	14%	86%
100	25%	75%
50	38%	62%
25	52%	48%

O gráfico da Figura 5.7 mostra o comportamento da Eficiência Efetiva para a densidade de 100 nodos referente ao experimento efetuado e apresentado na Figura 5.6. Comparando este gráfico com o da Figura 5.3, observa-se que a oscilação foi muito mais intensa, por outro lado não houve picos significativos que levassem à eficiência ao extremo, fazendo com que ocorressem picos de quase 100% de eficiência. Tal comportamento foi assegurado pelo algoritmo genético quando este tenta atingir o limiar de qualidade da fusão da rede. Como o limiar estabelecido para este experimento foi igual à 12 o algoritmo em apenas alguns *rounds* conseguiu descobrir uma faixa de valores que possibilitava com que o limiar desejado fosse atingido e mantido, o que pode ser conferido pelos gráficos das Figuras 5.7 e 5.8 no intervalo de 0 à 20 *checkpoints*.

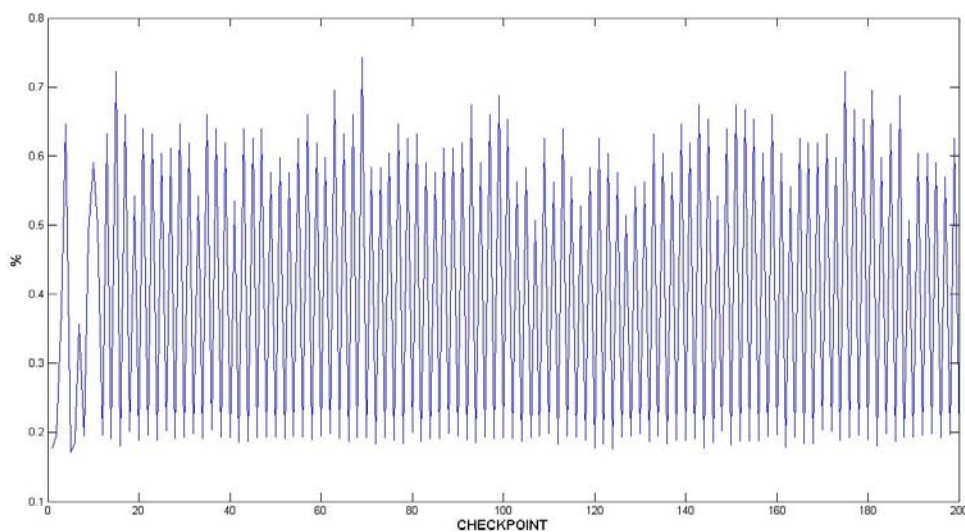


Figura 5.7- Eficiência efetiva para a densidade de 100 nodos.

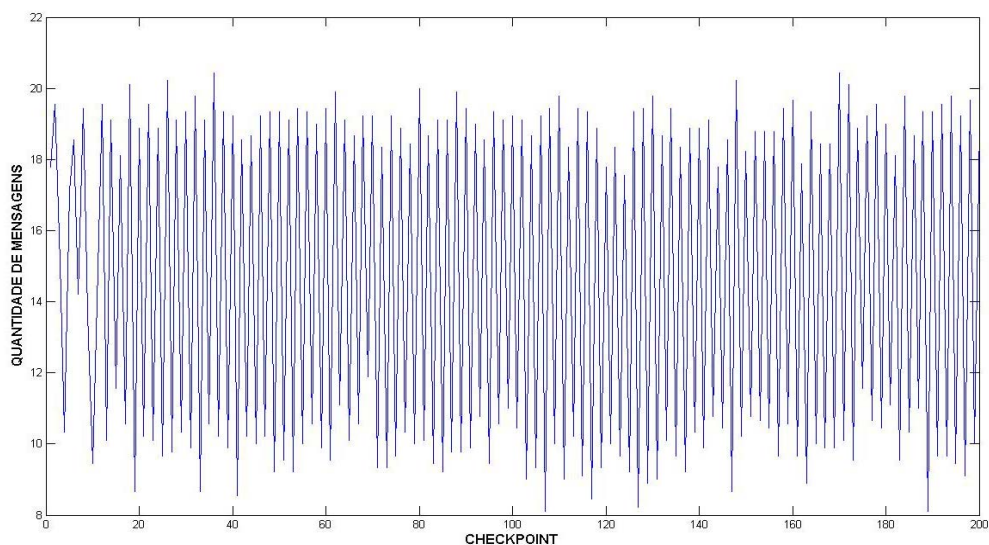


Figura 5.8 - Qualidade da fusão para a densidade de 100 nodos.

No gráfico da Figura 5.8 tem-se alguns picos que podem ser vistos. Picos com tendência a 0 e outros com uma tendência acima da média. Estes pontos que ocorrem podem ser provenientes de diversos fatores como por exemplo a interferência do meio que provoca essa baixa de qualidade da fusão e aumento da eficiência. Outra possibilidade é o número de mensagens que chegam carregando um ID diferente, e na sessão seguinte essa contagem de IDs diferentes influencia na determinação da probabilidade de envio da sessão seguinte (Figura 5.9).

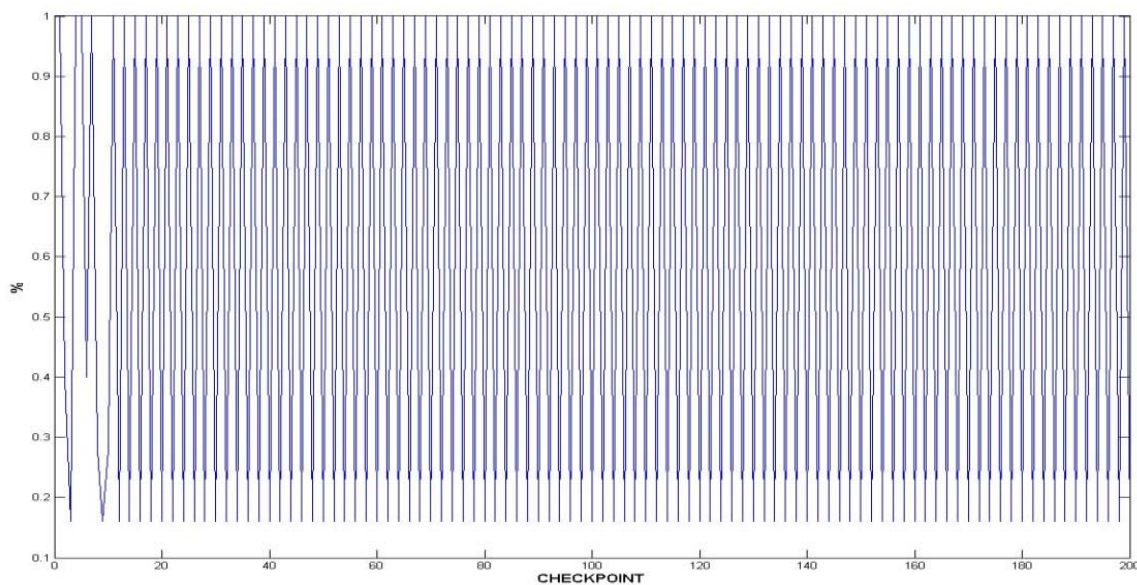


Figura 5.9 – Probabilidade de envio a cada *checkpoint* para densidade de 100 nodos.

A Figura 5.10 traz o impacto da variação do *checkpoint* sobre uma rede de densidade 100 nodos, o limiar foi mantido em 12 para seguir a coerência com os resultados anteriormente apresentados. O *checkpoint* determina o número de rounds monitorados dentro da sessão, para um *checkpoint* igual à 10 tem-se 9 *rounds* sendo monitorados, já para um *checkpoint* igual à 80 tem-se 79 *rounds* monitorados dentro da sessão.

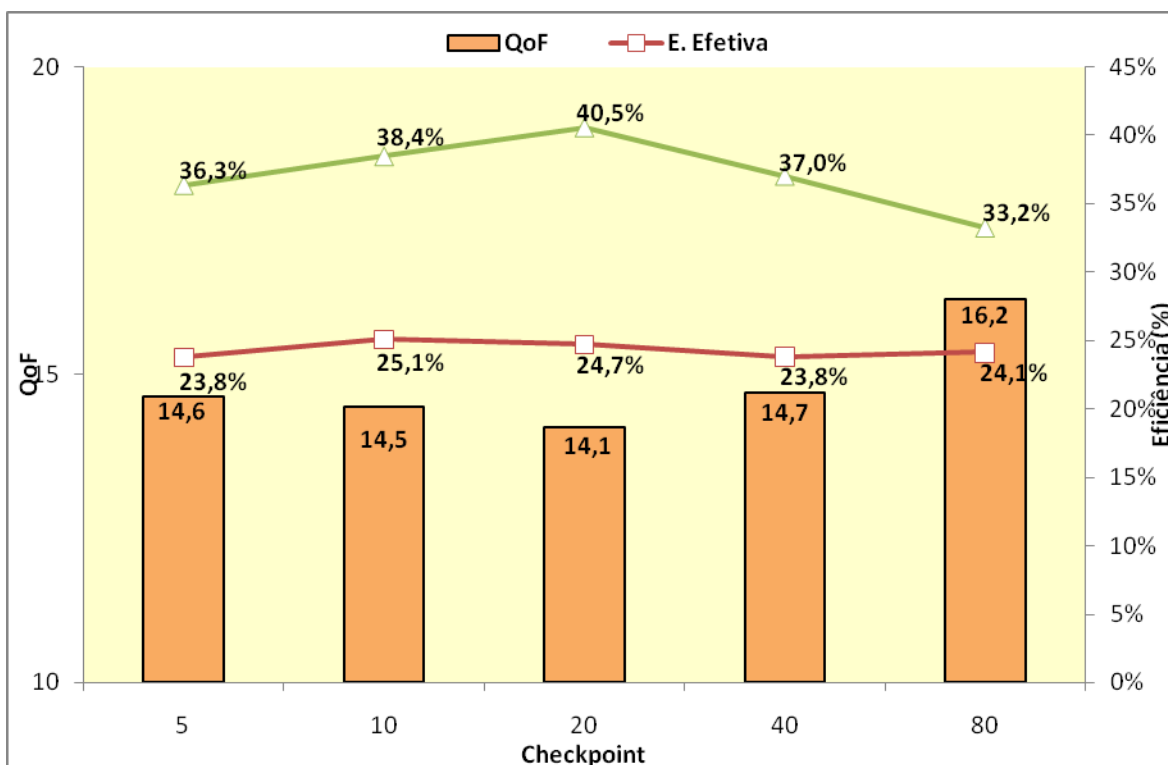


Figura 5.10 – Checkpoint para um limiar fixo igual a 12 e densidade igual a 100 nodos.

À medida que há uma redução na frequência do *checkpoint*, a Eficiência Efetiva e a Qualidade da Fusão de dados sofrem algumas mudanças em seu comportamento. A diminuição da frequência resulta em um menor *overhead* da rede. A Eficiência Efetiva teve uma oscilação muito pequena em relação à eficiência nominal. Já a QoF resultou em um comportamento oscilatório e como resultado interessante a se destacar tem-se o *checkpoint* igual a 80 que resultou em uma QoF significativa de 16,2. Para tal, o *overhead* que esta frequência causou foi de 25 *rounds*. Quanto mais *rounds* sendo monitorados, a tendência é a QoF ser elevada em relação as anteriores. Apesar deste resultado significativo, se as demais frequências forem analisadas, pode-se concluir que não apresentaram mudança significativa quanto ao resultado da QoF. A Tabela 5.4 traz um resumo do *overhead* em *rounds* provocado por cada frequência apresentada no gráfico da figura 5.10, o total de rounds monitorados dentro do tempo total de simulação também é apresentado.

Tabela 5.4 – Overhead em round calculado para cada frequência de *checkpoint*.

Frequência	5	10	20	40	80
Overhead	400	200	100	50	25
Monitorado	1600	1800	1900	1950	1975

A variabilidade da rede pode ser acompanhada pela Tabela 5.5, onde são apresentados a média e o desvio padrão para uma replicação do experimento da Figura 5.6. O desvio padrão para a densidade de 100 nodos foi o mesmo para o desvio padrão da Abordagem I ilustrado pela Tabela 5.2. Já a densidade de 50 nodos apresentou um aumento considerável de 2% no que diz respeito à eficiência efetiva da rede. A QoF se manteve com a mesma variabilidade em ambas as densidades e um pouco diferente com relação à abordagem anterior. Isso pode indicar que apesar da diferença de QoF entre densidades, as dispersões podem ser equivalentes dentro de sua faixa de valores relativa.

Tabela 5.5 – Análise de dispersão das métricas para as densidades de 100 e 50 nodos.

	100 Nodos			50 Nodos		
	Eficiência Nominal	Eficiência Efetiva	QoF	Eficiência Nominal	Eficiência Efetiva	QoF
Média	30%	23%	17	40%	36%	14
Desvio Padrão	8%	3%	1.9	7%	4%	1.9

Os resultados obtidos com esta segunda abordagem podem ser considerados satisfatórios. Comparando as duas abordagens, observou-se que a diferença foi mínima em termos dos resultados obtidos. No entanto, o limiar se comportou como o esperado, fazendo com que haja um equilíbrio entre as duas métricas.

5.3.1 Aumento da densidade em tempo de execução

A abordagem II foi submetida a possibilidade do usuário da rede vir a inserir novos nodos sensores na rede com o intuito de tentar melhorar a qualidade da fusão de dados em um determinado instante de tempo. A rede iniciou com 100 nodos sensores e no instante de tempo de 1000 segundos de simulação mais 100 nodos sensores foram incorporados na rede, totalizando 200 nodos sensores. Estes novos sensores não iniciaram as suas coletas e transmissão de dados no mesmo instante em que entraram na rede, e sim aguardaram um pacote de sincronização que é enviado pelo nodo mestre a cada *checkpoint*. Portanto nestes experimentos, os sensores que entraram não provocaram perturbação na rede, pois sua atividade inicial foi apenas de escutar a rede.

Devido a este aumento significativo de nodos sensores na rede houve uma condição de adaptabilidade surgida pelo algoritmo genético, onde o mesmo tentou se adaptar à mudança da rede. O algoritmo genético é capaz de diagnosticar a presença de novos sensores na rede através da identificação de IDs diferentes daqueles recebidos até o tempo de 1000 segundos.

A Figura 5.11 apresenta o comportamento da eficiência da rede quanto ao aumento da densidade. Onde marca 100 *checkpoints* no gráfico pode ser observado que houve uma queda considerável da eficiência em um primeiro instante de tempo e como conseqüência a mudança de comportamento da eficiência também pode ser observado frente a este gráfico.

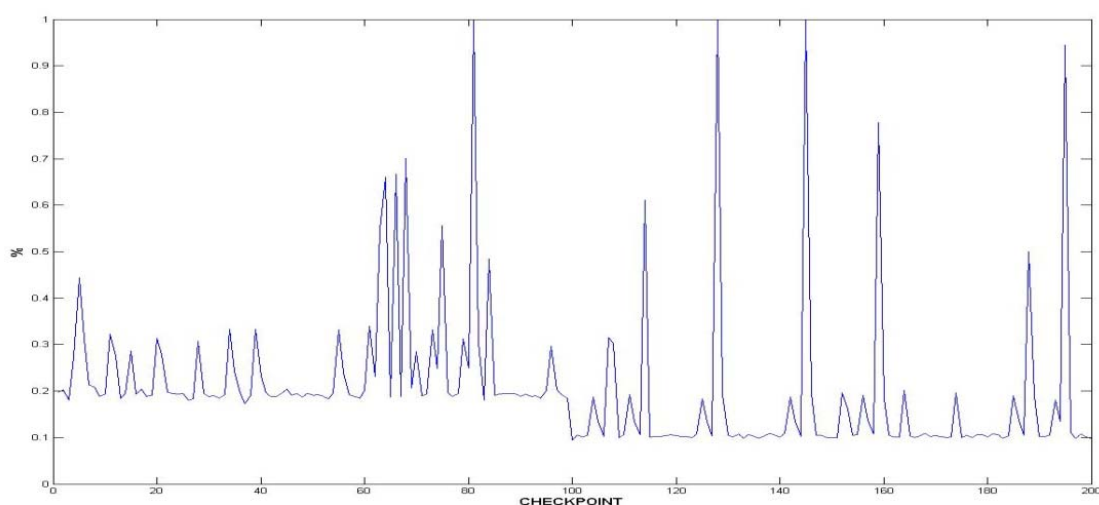


Figura 5.11 – Comportamento da eficiência para o acréscimo de nodos sensores.

A qualidade da fusão de dados também foi acompanhada neste experimento. O que se pode observar foi que no instante de tempo em que a densidade aumentou, a qualidade da fusão sofreu um leve aumento. Este comportamento leva a crer que a métrica Eficiência (Figura 5.11) é mais sensível ao aumento da densidade quando comparada com a Qualidade da Fusão de dados da Figura 5.12.

A Figura 5.12, quando seccionada ao meio, apresenta a QoF para a densidade de 100 nodos no lado esquerdo; e do lado direito a QoF para a densidade de 200 nodos. Do lado esquerdo pode ser observado que a qualidade da fusão estava no intervalo de *checkpoints* que varia de 10 a 60 apresentou um comportamento que de certa forma pode ser considerado como estável. Já para o intervalo de tempo que varia entre 60 a 90 tem-se um comportamento bastante instável, onde a QoF quase chegou a zero. O lado direito da figura para a densidade de 200 nodos sensores permite avaliar um comportamento similar. No entanto, o que fica evidente é que a densidade de 200 nodos oscilou consideravelmente dentro deste intervalo de tempo, com picos que tendiam a uma QoF muito baixa; porém não tão baixa quando a densidade de 100 nodos.

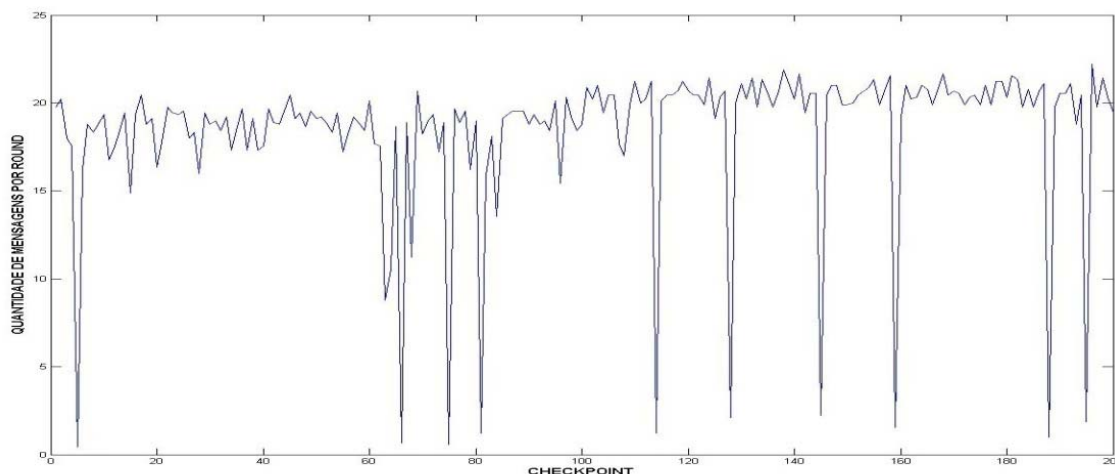


Figura 5.12 – Comportamento da qualidade da fusão.

O comportamento da Qualidade da Fusão de dados discutida acima pode ser melhor compreendido quando analisado o gráfico da Probabilidade de Envio disposto na Figura 5.13. O resultado é que se os picos excedentes forem retirados do gráfico seria visualizado uma espécie de limite inferior igual a um valor aproximado de 50%, os picos da probabilidade são provenientes do caos da abordagem probabilista que em determinados momentos pode gerar valores discrepantes que provocam este comportamento que em muitos casos pode ser desfavorável à abordagem, pois com uma Probabilidade de Envio muito baixa a Qualidade da Fusão pode ser comprometida devido a poucos nodos sensores enviarem seus dados. Por outro lado, pode-se dizer que a quantidade certa de nodos sensores podem enviar seus dados e assim atingir o limiar desejado de QoF.

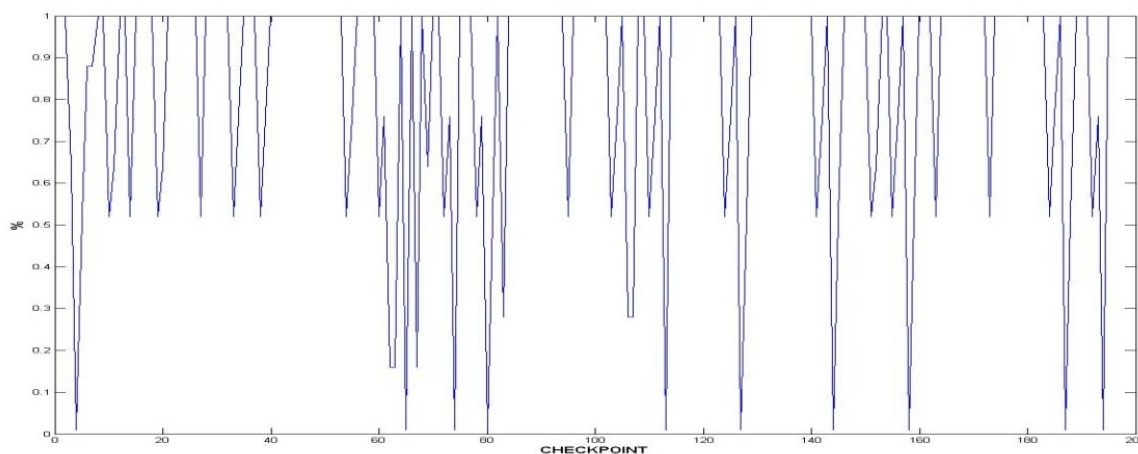


Figura 5.13 – Comportamento da probabilidade de envio.

5.4 Considerações finais

O presente capítulo apresentou os resultados obtidos com o uso de algoritmos genéticos com o intuito de auto-gerenciar a RSSF. Aqui foram apresentadas duas abordagens, onde foi estabelecido para o algoritmo genético que a eficiência deveria ser atendido como fator principal, tal abordagem foi apresentada como mono-objetivo. A segunda abordagem procurou conciliar o aumento da Eficiência da rede com a Qualidade da Fusão, onde tentou-se manter um equilíbrio entre as duas métricas. O capítulo buscou também fazer um comparativo, indiretamente, entre as duas abordagens.

6 Conclusão e Trabalhos Futuros

Redes de sensores sem fio são dinâmicas, devido as suas características e aplicações; apresentam diversas limitações que são tratadas diferentemente para as mais diversificadas aplicações a qual são submetidas. Tais aplicações, características e limitações exigem com que as redes de sensores sejam capazes de se auto-gerenciar. Além disso, a aplicação que fará uso dos nodos sensores também exige em muitos casos o uso de restrições temporais que estabelecem à rede mais um objetivo a ser atendido além das necessidades impostas pela própria rede. Portanto, redes de sensores sem fio, sofrem requisitos de necessidade provenientes do meio físico ao qual está inserido, além das necessidades impostas pela sua própria rede.

Com base nessas necessidades, esta dissertação objetivou analisar a viabilidade do uso de uma técnica de otimização, que possibilitasse com que a rede de sensores se comportasse de forma dinâmica e fosse capaz de se adaptar aos requisitos da rede e do ambiente. Por este motivo, analisou-se a viabilidade do uso de algoritmos genéticos implementado na camada de aplicação, objetivando melhorar a troca de mensagens para a realização da fusão de dados, onde em muitas aplicações estas técnicas se fazem de suma importância. Como métricas que ajudaram a avaliar a viabilidade do uso de algoritmos genéticos utilizaram-se a eficiência e a qualidade da fusão de dados.

Como pode ser observado neste trabalho, o uso de algoritmos genéticos é possível e pode apresentar comportamento satisfatório quando bem utilizados, e adequados a aplicação que se deseja. O mesmo possibilitou atender a dois requisitos básicos da computação autônoma, que correspondem a auto-configuração e a auto-otimização. Para a auto-configuração o algoritmo conseguiu se adaptar ao aumento da densidade da rede, enquanto que para a auto-otimização o algoritmo tentou atingir os objetivos estabelecidos como manter a QoF igual ou acima do limiar desejado manipulando a probabilidade de envio dos nodos sensores. Como consequência foi possível notar que o algoritmo genético apresentou um comportamento de auto-aprendizado determinando a probabilidade de envio que melhor atendia ao objetivo estabelecido.

Apesar desde trabalho ter proporcionado analisar a viabilidade do uso de algoritmos genéticos, observa-se que ainda há muito que se desenvolver nesta linha de pesquisa. Como trabalhos futuros podem ser efetuados testes com o uso de uma RSSF que possua mobilidade, e assim analisar dinamicamente o comportamento do algoritmo genético frente a esta característica de rede. Nos experimentos efetuados neste trabalho é possível perceber que a abordagem usando algoritmos genéticos possui uma forte tendência a ser aplicada a situações onde a RSSF é extremamente dinâmica. Portanto, pode ser levado em consideração para trabalhos futuros, além da mobilidade de nodos sensores, a possibilidade destes entrarem e saírem dinamicamente da rede. Além disso, outras métricas podem ser

inseridas no algoritmo para análise. O comportamento mediante a tolerância a faltas poderia ser avaliado também para a presente abordagem. Além do mais, as outras características da comunicação autonômica, como auto-proteção e auto-cura – onde ambas poderiam envolver a questão de segurança dos nodos -, poderiam ser implementadas no algoritmo genético para que também fossem atendidas.

Apêndice A - Resultados da Abordagem de Probabilidade de Envio Variável

A abordagem aqui discutida segue os parâmetros de configuração da Tabela A.1. Como pode ser acompanhado os parâmetros são diferentes em relação aos parâmetros utilizados pelos experimentos do Capítulo 5 o que impede a comparação direta de resultados entre as abordagens.

Tabela A.1 - Parâmetros do TrueTime utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor
Data Rate	250.000 bps
Transmit Power	-3 dbm
Receiver Signal Threshold	-48 dbm
Pathloss Exponent	3,5
ACK Timeout	0,864 ms
Retry Limit	3
Error Coding Threshold	0,03
Deadline de Mensagens	950 ms
Período de Leitura	1 segundo

Os parâmetros da Tabela A.1 foram utilizados pelo trabalho [38], como resultado obteve-se o gráfico da Figura A.1. A Tabela A.2 traz os resultados obtidos para um teste de simulação com os mesmos parâmetros acima descritos desconsiderando a abordagem probabilista. Esta abordagem representa a probabilidade de envio de 100%, ou seja, periodicamente todos os sensores enviam seus dados monitorados para o nodo escravo.

Tabela A.2 - Resultados de simulação para uma rede sem abordagem probabilista.

Densidade (Nodos)	Média de mensagens em round	Eficiência (%)
25	12	49
50	16	32.2
100	19	19
200	21	10.5

Para avaliar o efeito da probabilidade de envio sobre a rede, fixou-se a densidade em 10 nodos sensores e variou-se a probabilidade de envio em uma escala de 10 em 10 por cento, o resultado pode ser acompanhado pelo gráfico da Figura A.1

À medida que a probabilidade de envio diminui para uma dada densidade, tanto a média de mensagens (QoF) quanto a eficiência sofrem comportamento oposto, a eficiência aumenta à medida que a média de mensagens recebidas diminui. Portanto, observa-se claramente que a probabilidade de envio afeta diretamente o comportamento da rede. O gráfico da Figura A.2 apresenta o comportamento da abordagem probabilista para uma densidade de 50 nodos dentro de sete sessões consecutivas.

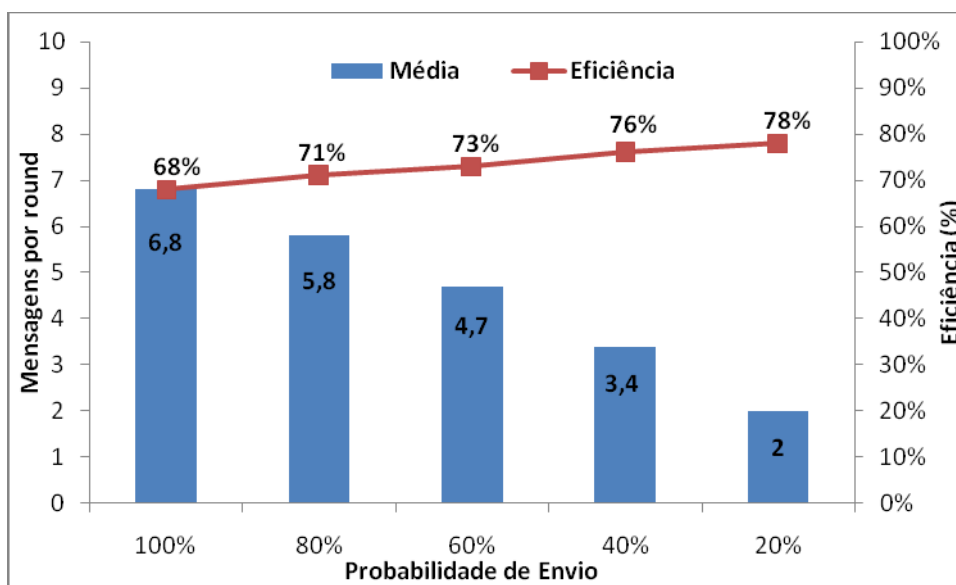


Figura A.1 - Mensagens recebidas e eficiência com densidade de 10 nodos.

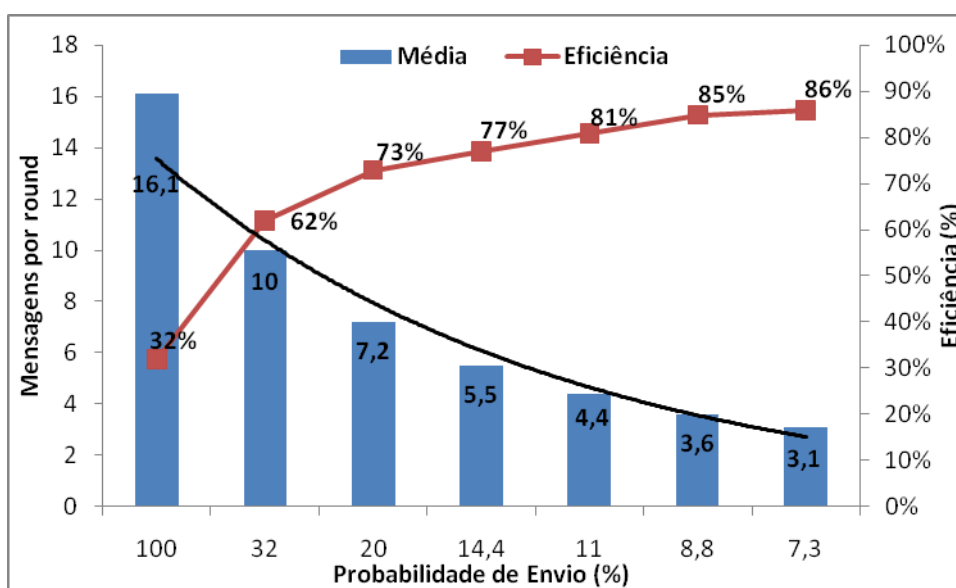


Figura A.2 - Abordagem adaptativa usando diferentes probabilidades de envio no início de cada sessão de monitoramento para densidade de 50 nodos.

Referências Bibliográficas

- [1] CULLER, D.; ESTRIN, D.; SRIVASTAVA, M.; “**Overview of sensor networks**”, IEEE Computer Vol. 37, no. 8, pp. 41-49, 2004.
- [2] MENEZES G.; MATEUS G. R.; NAKAMURA F. G.; “**Uma Abordagem Lagrangeana para os Problemas de Densidade, Cobertura e Conectividade em uma Rede de Sensores Sem Fio**”. In: VI Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel (Fortaleza: 2004), Vol.1, pp. 192-201.
- [3] CORREIA, L.H.A.; MACEDO, D.F.; SANTOS, A.L.; NOGUEIRA, J.M.S.; LOUREIRO, Antonio A. F.; **Uma Taxonomia para Protocolos de Controle de Acesso ao Meio em Redes de Sensores Sem Fio**. In: Annales des Telecommunications. (Paris: 2005)
- [4] PINTO, A.R.; BITENCORT, B.R.; MONTEZ, C.; **Uma Abordagem de Fusão de Dados com restrições de Tempo Real em Redes de Sensores Sem Fio**. In: VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (Florianópolis: 2007). vol. 1, p.1-5.
- [5] AKYILDIZ, I.F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI E.; **A Survey on Sensor Networks**. Communications Magazine, IEEE, vol.40, no.8, pp. 102-114, 2002.
- [6] SILVA, F.A.; BRAGA, T.R.M.; RUIZ, L.B.; NOGUEIRA, J.M.S.; **Tecnologia de Nós Sensores Sem Fio (RT)**. In: Revista Controle e Instrumentação, pp. 76-86, 1992.
- [7] LOUREIRO, A.A.F.; NOGUEIRA, J.M.S.; RUIZ, L.B.; MINI, R.A.F.; **Redes de Sensores Sem Fio**. In: 21° Simpósio da Sociedade Brasileira de Computação (Tutorial), pp. 193-234, 2002.
- [8] RUIZ, L.B.; CORREIA, L.H.A.; VIEIRA, L.F.M.; MACEDO, D.F.; NAKAMURA, E.F.; FIGUEIREDO, C.M.S.; VIEIRA, M.A.M.; BECHELANE, E.H.; CAMARA, D.; LOUREIRO, A.A.F.; NOGUEIRA, J.M.S.; JUNIOR, D.C.S.; **Arquitetura para Redes de Sensores Sem Fio**. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (22°:Maio:Gramado,RS), Proceedings of the 22nd Brazilian Symposium on Computer Networks, pp. 167-218. ISBN: 85-88442-82-5.
- [9] POOLE, I.; **What exactly is . . . ZigBee?**, Communications Engineer, vol.2, no.4, pp. 44-45, 2004.
- [10] LOUREIRO, A.A.F.; NOGUEIRA, J.M.S.; RUIZ, L.B.; MINI, R.A.F.; NAKAMURA, E.F.; FIGUEIREDO, C.M.S.; **Redes de sensores sem fio**. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores(21°:Natal:2003), pp.179 – 226.
- [11] SHEN, Chien-Chung.; SRISATHAPORNPHAT, C.; JAIKAEAO, C.; **Sensor Information Networking Architecture and Applications**, In: IEEE Wireless Communications, Vol.8, N°4, pp.52-59, 2001.
- [12] PATNAIK, M.S.; **Genetic Algorithms: A Survey**. In: IEEE Computer, Vol. 27, n°6, pp. 17-26, 1994.

-
- [13] RIBEIRO, G.M.; LORENA, L.A.N.; **Roteamento de Veículos Dinâmicos Usando Algoritmos Genéticos**, In: XIX ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Recife), 2005.
- [14] CATARINA, A.S.; BACH, S.L.; **Estudo do efeito dos parâmetros genéticos sobre a solução otimizada e sobre o tempo de convergência em algoritmos genéticos com codificações binárias e real**. Acta Scientiarum, Technology, v. 25, n°2, pp.147-152, 2003.
- [15] NÁCUL, A.C.; PILLA, M.L.; OLIVEIRA, R.S.; **Aplicando Algoritmos Genéticos na Alocação de Tarefas em Sistemas Distribuídos de Tempo Real**. In: Workshop de Tempo Real (III:Florianópolis:2001).
- [16] MAINWARING, A.; POLASTRE, J.; SZEWCZYK, R.; CULLER, D.; ANDERSON, J.; **Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring**, In: Proceedings of the 1st ACM international Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (Atlanta, Georgia, USA, 2002). WSNA'02. ACM, New York, NY, pp. 88-97.
- [17] FORESTI, G.L.; SNIDARO, L.; **A Distributed Sensor Network For Vídeo Surveillance Of Outdoor Environments**. In: Image Processing, Proceeding 2002 International Conference on, vol.1, pp. I-525-I-528, 2002.
- [18] TEIXEIRA, Ingrid. **Roteamento com Balanceamento de Consumo de Energia Para Redes de Sensores Sem Fio**. Rio de Janeiro, 2005, 94f. Dissertação(Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica), Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [19] PINTO, Antonio José Gonçalves.; **Mecanismo de Agregação de Dados Empregando Técnicas Paramétricas em Redes de Sensores**. Rio de Janeiro, 2004, 99f. Dissertação(Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica), Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [20] CAMPBELL, A.T.; CONTI M.; GIORDANO, S.; **Mobile Ad Hoc Networks**. In **Handbook of Wireless Networks and Mobile Computing**, Wiley Series on Parallel and Distributed Computing. Mexico: John Wiley e Sons, Inc, 28 de Fevereiro.
- [21] RUIZ, L.B.; NOGUEIRA, J.M.S.; LOUREIRO, A.A.F.; **MANNA: Uma arquitetura para o Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio**. In Communications Magazine, IEEE, Vol. 41, n°2, pp116-125, 2003.
- [22] HOBLOS, G.; STAROSWIECKI, M.; AÏTOUCHE, A.; **Optimal Design of Fault Tolerant Sensor Networks**. In Control Applications. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications. pp. 467-472, 2000.
- [23] STANKOVIC, J.A.; ABDELZAHER, T.; LU, C.; SHA, L.; HOU, J.; **Real-Time Communication and Coordination in Embedded Sensor Networks**. Proceedings of The IEEE, Vol. 91, n°7, pp. 1002-1022, 2003.
- [24] BULUSU, N.; ESTRIN, D.; GIROD, L.; HEIDEMANN, J.; **Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems**. In International Symposium on Communication Theory and Applications, Ambleside, UK, 2001.
- [25] IYAS, Mohammad; MAHGOUB, Imad; **Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems**. USA: CRC Press, 2004.

-
- [26] MACKER, J.P.; CORSON, M.S.; **Mobile ad-hoc networking and the IETF**. ACM Mobile Computing and Communication Review, Vol.2 e 3, n°1,2,3,4, pp. 9-14, 1999.
- [27] SANTI, P.; **Topology control in wireless ad hoc and sensor networks**. ACM Computing Surveys. Vol. 37, n°2, pp. 164-194, 2005.
- [28] CARLE, J.; SIMPLOT-Ryl, D.; **Energy-efficient area monitoring for sensor networks**. In Computer, Vol. 37, n°2, pp. 40-46, 2004.
- [29] PINTO, A.; BITENCORT, B.; CABREIRA, U.; RIBEIRO, M.A.; CARLOS, M.; **Fusão de Dados Tempo Real em Redes de Sensores Sem Fio Multimídia**. In Webmedia, (Gramado:2007). Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web, vol. 1, pp. 95-102.
- [30] MISRA, Devendra K.; **Radio-Frequency and Microwave Communication Circuits Analysis and Design**. Wiley-Interscience, 2001.
- [31] STALLINGS, William; **Wireless Communications and Networking**, Prentice Hall, 2001.
- [32] COULOURIS, G.; DOLLIMORE, J.; KINDBERG, T.; **Sistemas Distribuídos: Conceitos e Projeto**. 4° edição. Bookman, 2005.
- [33] SINHA, A.; CHANDRAKASAN, A.; **Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks**, IEEE Design e Test of Computers. Vol.18, n°2, pp.62-74, 2001.
- [34] PARK, S.; SAVVIDES, A.; SRIVASTAVA, M.B.; **Simulating networks of wireless sensors**. In Proceedings of the 33rd Conference on Winter Simulation (Arlington: Virginia,2001). Winter Simulation Conference. IEEE Computer Society, Washington, pp. 1330-1338.
- [35] STANKOVIC, J.A.; **Research Challenges for wireless sensor networks**. ACM SIGBED Review. Vol. 1, n°2, pp. 9-12, 2004.
- [36] WOO, A.; CULLER, D.; **A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks**. In Proceeding of the 7th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking (Italy:2001). MobiCom'01. ACM, New York, pp. 221-235.
- [37] CHIRAS, T.; PATERAKIS, M.; KOUTSAKIS, P.; **Improved medium access control for wireless sensor networks – a study on the S-MAC protocol**. Local and Metropolitan Area Networks, 2005. LANMAN 2005. The 14th IEEE Workshop on, pp. 18-21.
- [38] PINTO, A.; BITENCORT, B.; CABREIRA, U.; DANTAS, M.A.R.; CARLOS, M.; **Probabilistic Real-time Data Fusion in Wireless Sensor Networks with ZigBee**. In: 7th IFAC International Conference in Fieldbuses and Networks in industrial Embedded Systems.(Toulouse:2007). Vol. 1, pp. 267-271.
- [39] MENASCÉ, D.A.; KEPHART, J.O.; **Autonomic Computing**. In IEEE Internet Computing, IEEE Computer Society, pp. 18-21, 2007
- [40] HE, T.; STANKOVIC, J.; LU, C.; ABDELZAHER, T.; **SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communications in Ad Hoc Sensor Networks**. Distributed Computing Systems. Proceedings 23rd International Conference on, pp. 46-55, 2003.

- [41] BUSTARD, D.W.; STERRITT, R.; (2006) A requirements engineering perspective on autonomic systems development. In: Parashar M, Hariri S. **Autonomic computing: concepts, infrastructure, and applications (Handbook of autonomic computing)**. CRC Press, ISBN 0849393671.
- [42] KEPHART, J.O.; CHESS, D.M.; **The Vision of Autonomic Computing**. Computer, IEEE, vol.36, n°1, pp.41-50, 2003.
- [43] CHENYANG, Lu; BLUM, B.M.; ABDELZAHER, T.F.; STANKOVIC, J.A.; TIAN, He.; **RAP: a real-time communication architecture for large-scale wireless sensor networks**. In Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2002. Proceedings. Eighth IEEE, pp. 55-66, 2002.
- [44] MAINSAH, E.; **Autonomic Computing: the next era of computing**. In: Electronics & Communication Engineering Journal, vol.14, n° 1, pp. 2-3, 2002.
- [45] STERRITT, R.; **Autonomic Computing**. Innovat Syst. Softw. Eng. 2005; vol. 1, n°1, pp. 79-88, 2005. DOI: 10.1007/s11334-005-0001-5
- [46] STERRITT, R.; PARASHAR, M.; TIAFIELD, H.; UNLAND, R.; **A concise introduction to autonomic computing**. In: Advanced Engineering Informatics. Autonomic Computing, Vol. 16, n°3, pp. 181-187, 2005.
- [47] KEPHART, J.O.; **Research challenges of Autonomic computing**. In Proceedings of the 27th international Conference on Software Engineering (St. Louis:2005). ICSE'05. ACM, New York, pp.15-22, 2005.
- [48] KANG, H.; LI, X.; MORAN, P.J.; **Autonomic Sensor Network: A new paradigm for Collaborative Information Processing**. In: IEEE International Symposium on Dependable, Autonomic and Secure Computing, pp.258-268, 2006.
- [49] ABRÃO, Maria Silvia; **O que permite que as partes do nosso corpo funcionem em sintonia?**. In: Universo On-line, Educação, 2007. URL: <http://educacao.uol.com.br/ciencias/ult1686u27.jhtm>. Acesso em 07/10/2007.
- [50] DOBSON, S.; DENAZIS, S.; FERNÁNDEZ, A.; GAÍTI, D.; GELENBE, E.; MASSACCI, F.; NIXON, P.; SAFFRE, F.; SCHMIDT, N.; ZAMBONELLI, F.; **A Survey of autonomic communications**. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS). Vol.1, n°2, pp. 223-259, 2006.
- [51] QUITADAMO, R.; ZAMBONELLI, F.; **Autonomic Communication Services: a New Challenge for Software Agents**. In: Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Springer, 2007.
- [52] GANEK, A.G.; KORBI, T.A.; **The dawning of the autonomic computing era**. In: IBM Systems Journal, vol. 42, n°1, pp. 5-18, 2003.
- [53] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4 – 2003, IEEE Standard for Information Technology – telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – **Part 15.4: Wireless**

Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) New York: IEEE Press. 2003.

[54] JÚNIOR, O.D.B.O, **Otimizações de Horário em Instituições de Ensino Superior Através de Algoritmos genéticos**. Florianópolis, SC, 2001: Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Departamento de Ciências da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina.

[55] SANTOS, C.J.; OLIVEIRA, J.R.F.; DUTRA, L.V.; SANT'ANNA, S.J.S.; RENNÓ, C.D.; **Seleção de atributos usando algoritmos genéticos para classificação de regiões**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, Florianópolis:2007, pp. 6143-6150.

[56] GREFENSTETTE, J.J.; **Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms**. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.16, n°1, pp.122-128, 1986.

[57] JÚNIOR, A.A.B.; FREITAS, A.L.:(2006) **Algoritmos Genéticos Paralelos**. Departamento de Ciências da Computação – Universidade Federal da Bahia. Disponível: <http://twiki.dcc.ufba.br/pub/MAT054/SemestreArtigos20061/AlgoritmosGeneticosParalelos-AmadeuLage.pdf>. Acesso em 27/12/2007.

[58] BATISTA, M.A.F.; GUIMARÃES, L.N.F.; **Algoritmos Genéticos em Ambientes Paralelos**. WorkCAP (5°:2005:São José dos Campos-SP), INPE, pp.1-6, 2005.

[59] GOLDBERG, D. E., **Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning**, Addison-Wesley, New York, 1989.

[60] HOLLAND, J. H., **Genetic Algorithms and adaptation**, in Proc. Of the NATO Advanced Research Institute on Adaptative Control of Ill-Defined Systems, pp.317-333, 1984.

[61] **ZigBee Specification**, Disponível em <http://www.zigbee.org>. Acesso: Abril, 2007.

[62] FOGARTY, T.C.; **Classifier Systems for Control**. In: Colloquium on Genetic Algorithms for Control Systems Engineering, IEEE, pp. 8/1-8/3, 1993.

[63] HOLLAND, J.H.; **Adaptation in natural and artificial systems**. Ann Arbor: Univ. of Michigan Press, 1975. ISBN: 0-262-58111-6

[64] SILVA, Angelo José Moreira. **Implementação de um Algoritmo genético utilizando modelo de ilhas**. Rio de Janeiro, 2005: Dissertação(Mestrado em Engenharia Cívil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[65] HARIRI, S.; KHARGHARIA, B.; CHEN, H.; YANG, J.; ZHANG, Y.; PARASHAR, M.; LIU, H.; **The Autonomic Computing Paradigm**. In Cluster Computing. Springer. Vol. 9, n°1, pp. 5-17, 2006.

[66] AC Blueprint (2006). **An Architectural Blueprint for Autonomic Computing**. Disponível em http://www-03.ibm.com/autonomic/pdfs/AC_Blueprint_White_Paper_4th.pdf

[67] LIANG, BING; LIU, QUN; **A Data Fusion Approach for Power Saving in Wireless Sensor Networks**. First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences. Vol.2, pp. 582-586, 2006

- [68] PATIL, S.; DAS, S.R.; NASIPURI, A.; **Serial data fusion using space-filling curves in wireless sensor networks**. First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. IEEE. pp. 182-190, 2004.
- [69] MACHADO, M.V.; GOUSSEVSKAIA, O.; MINI, R.A.F.; REZENDE, C.G.; LOUREIRO, A.A.F.; MATEUS, G.R.; NOGUEIRA, J.M.S.; **Data dissemination in autonomic wireless sensor networks**. IEEE Journal on Selected Áreas in Communications. Vol. 23, n°12, pp. 2305-2319, 2005.
- [70] D’COSTA, A.; SAYEED, A.M.; **Data versus decision fusion in wireless sensor networks**. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Vol. 4, pp. IV-832-5, 2003.
- [71] CI, S.; GUIZANI, M.; **Energy Map: Mining Wireless Sensor Network Data**. In IEEE International Conference on Communications, vol. 8, pp. 3525-3529, 2006.
- [72] SO, J.; KIM, J.; GUPTA, I.; **Cushion: Autonomically Adaptive Data Fusion in Wireless Sensor Networks**. In Proceedings of IEEE Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems, 2005.
- [73] RUIZ, L.B.; BRAGA, T.R.M; SILVA, F.A.; ASSUNÇÃO, H.P.; NOGUEIRA, J.M.S.; LOUREIRO, A.A.F.; **On the design of a self-managed wireless sensor network**. IEEE Communications Magazine, vol.43, n°8, pp. 95-102, 2005.
- [74] SOHRABI, K.; GAO, J.; AILAWADHI, V.; POTTIE, G.J.; **Protocols for self-organization of a wireless sensor network**. In IEEE Personal Communication, vol.7, n°5, pp. 16-27, 2000.
- [75] DRESSLER, F.; KRÜGER, G.F.; GERMAN, R.; **Self-Organization in Sensor Networks using Bio-Inspired Mechanisms**, Proceedings of 18th ACM/GI/ITG International Conference on Architecture of Computing Systems – System Aspects in Organic and Pervasive Computing: Workshop Self-Organization and Emergence, Innsbruck, Austria, 2005.
- [76] SAFARIC, S.; MALARIC, K.; **ZigBee wireless standard**. In 48th International Symposium ELMAR focused on Multimedia Singnal Processing and Communications. pp.259-262, 2006.
- [77] Zigbee Alliance. **Padrão ZigBee**. Disponível em <http://www.caba.org/standard/zigbee.html>. Acesso em Outubro de 2006.
- [78] POLASTRE, J.; SZEWCZYK, R.; CULLER, D.; **Telos: enabling ultra-low power wireless research**. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, pp.364-369, 2005.
- [79] KALPAKIS, K.; DASGUPTA, K.; NAMJOSHI, P.; **Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks**. In Computer Networks, vol.42, n°6, pp. 697-716, 2003.
- [80] CORRÊA, J.M.; MELO, A.C; **Using a Classifier System to Improve Dynamic Load Balancing**. In Proceeding International Conference on Parallel Processing, IEEE Press, Valencia, Espanha, pp.411-416, 2001.
- [81] FOGARTY, T.C.; **Classifier Systems for Control**. In Colloquium on Genetic Algorithms for Control Systems Engineering, IEEE, pp. 8/1-8/3, 1993.

[82] PINTO, A.S.R.; **Abordagem de Escalonamento Dinâmico de Tarefas Baseada em Sistemas Classificadores**. Florianópolis, 2004. 62f., Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação), Departamento de Ciências da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina.

[83] O'HARE, G.M.P., O'GRADY, M.J., MARSH, D., RUZZELLI A. G., TYNAN, R.; **Autonomic Wireless Sensor Networks: Intelligent Ubiquitous Sensing**. In proceeding of ANIPLA, International Congress on Methodologies for Emerging Technologies in Automation, 50 anniversary of ANIPLA, the Italian National Association for Automation, 2006.